REDESC LI M

IMTA
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO: EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS

Coordinadores:
Juan Manuel Rodríguez Esteves
Carlos Manuel Welsh Rodríguez
Ma. Lourdes Romo Aguilar
Ana Cecilia Travieso Bello

REDESCLIM

IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO: EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS

Coordinadores:
Juan Manuel Rodríguez Esteves
Carlos Manuel Welsh Rodríguez
Ma. Lourdes Romo Aguilar
Ana Cecilia Travieso Bello

551.55 Rodríguez Esteves, Juan Manuel (coord.)
R63 Riesgo de desastres en México: eventos hidrometeorológicos y climáticos / Juan Manuel Rodríguez Esteves... *et al.*, coordinadores. -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018.
440 p.

ISBN 978-607-8629-03-9 (Obra digital)

1. Hidrometeorología 2. Desastres naturales 3. Riesgos ambientales 4. México

Coordinadores:
Juan Manuel Rodríguez Esteves
Carlos Manuel Welsh Rodríguez
Ma. Lourdes Romo Aguilar
Ana Cecilia Travieso Bello

Edición:
Gema Alín Martínez Ocampo
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Diseño:
Gema Alín Martínez Ocampo

Ilustración de portada:
Oscar Alonso Barrón

Primera edición: 2018

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
México
www.imta.gob.mx

REDESClim
Centro de Ciencias de la Tierra
Calle Francisco J. Moreno 207
Col. E. Zapata
CP 91090, Xalapa, Ver.
México
http://www.redesclim.org.mx/

ISBN 978-607-8629-03-9 (Obra digital)

Fotografías de entrada de capítulo:
https://pixabay.com/es/
A excepción del capítulo 2: Tornado. Cortesía de Ivan Camilo Henao.

Las opiniones, datos y citas presentados en esta obra son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan, necesariamente, los puntos de vista de la institución que edita esta publicación.

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los coordinadores.

Hecho en México

Contenido

PRÓLOGO 9
Verónica Bunge Vivier

INTRODUCCIÓN 13
Juan Manuel Rodríguez Esteves, Carlos Manuel Welsh Rodríguez, Ma. Lourdes Romo Aguilar y Ana Cecilia Travieso Bello
Sobre esta obra 20
Datos y Monitoreo 20
Diagnóstico, Vulnerabilidad y Riesgos 23
Referencias 26

1. Monitoreo de indicadores de resiliencia urbana ante huracanes para las ciudades costeras: Playa del Carmen, caribe mexicano 29
Oscar Frausto Martínez ; Aidé Beatriz Vázquez Sosa; Orlando Colín Olivares; María Luisa Hernández Aguilar ; Lucinda Arroyo Arcos; David Velázquez Torres
1.1. Resumen 29
1.2. Introducción 30
1.3. Los indicadores 31
1.4. Indicadores de resiliencia urbano costera 34
1.5. Materiales y métodos 36
1.6. Metodología 38
1.7. Resultados 40
1.8. Discusión 49
1.9. Conclusiones 52
1.10. Agradecimiento: 53
1.11. Referencias 53

2. Análisis espacio temporal y perspectivas de tornados en México 59
José Francisco León-Cruz; Noel Carbajal; Luis Felipe Pineda-Martínez
2.1. Introducción 60
2.2. Los tornados en México 62
2.3. Resultados 64
2.4. Resultados 71
2.5. Conclusiones 78
2.6. Agradecimientos 79
2.7. Referencias 79

3. Desastres asociados a ciclones tropicales en la Costa Occidental de México: 2011-2015 83
Luis M. Farfán; Blanca Natalia Castillo Bautista; Jorge Luis Vázquez Aguirre
3.1. Resumen 83
3.2. Introducción 84
3.3. Objetivo 87
3.4. Materiales y métodos 87
3.5. Resultados y discusión 89
3.6. Manuel (13-19 septiembre, 2013) 93
3.7. Odile (10-18 septiembre, 2014) 95
3.8. Patricia (20-24 de octubre, 2015) 98
3.9. Pronósticos oficiales 100
3.10. Conclusiones 102
3.11. Agradecimientos 104
3.12. Referencias 104

4. Métodos para la generación y organización de bases de datos, metadatos y visualizaciones cartográficas de clima extremo, bioclima y cambio climático en el estado de Tabasco y áreas adyacentes, México **109**
Agustín Fernández Eguiarte; Carolina Ivonne Castelán Hernández; Ángel Valentín Bautista Durán; Rosa Irma Trejo Vázquez ; Jorge Zavala Hidalgo; Rosario Romero Centeno
4.1. Resumen 109
4.2. Introducción 110
4.3. Estaciones climatológicas y control de calidad. Períodos 1921-2010 y 1961-2000 114
4.4. Bases de datos climáticas. Períodos 1921-2010 y 1961-2000 116
4.5. Parámetros bioclimáticos. Período 1921-2010 117
4.6. Climatología extrema en el período 1921-2010 118
4.7. Escenarios de cambio climático regionales 119
4.8. Forzamientos radiativos y horizontes a futuro 120
4.9. Promedios mensuales de escenarios de cambio climático. Horizonte 2015-2039 121
4.10. Porcentajes mensuales de cambio climático. Horizonte 2015-2039 122
4.11. Conclusiones 123
4.12. Agradecimientos 124
4.13. Referencias 124

5. El balanceo de las lluvias ¿mecanismo oscilatorio natural que explica las sequías en el altiplano mexicano y las lluvias abundantes en la costa de Nayarit? **127**
Luis Brito-Castillo; José Pablo Vega-Camarena; Luis M. Farfán; Luis Felipe Pineda-Martínez
5.1. Introducción 128
5.2. Ocurrencia de sequías 131
5.3. Índices climáticos asociados a sequías 132
5.4. Metodología 134
5.5. Divergencia y convergencia 136
5.6. Mapas compuestos de anomalías de viento, humedad específica y divergencia 137
5.7. Resultados 137
5.8. Modelo conceptual 144
5.9. Conclusiones 145
5.10. Agradecimientos 146
5.11. Referencias 146

6. Comparación del uso de datos meteorológicos observados y procesados en malla en la simulación hidrológica de eventos extremos en una cuenca en México **153**
Juan Alberto Velázquez Zapata ; Edgar Talledos Sánchez 153
6.1. Resumen 153
6.2. Abstract 154
6.3. Introducción 155
6.4. Materiales y métodos 158
6.5. Resultados y Discusión 161
6.6. Conclusiones 168
6.7. Agradecimientos 169
6.8. Referencias 170

7. Modelación numérica para la prevención de riesgos meteorológicos en el estado de Veracruz **175**
Jorge Humberto Bravo Méndez; Saúl Miranda Alonso 175
7.1. Resumen 175
7.2. Introducción 176
7.3. Antecedentes 177
7.4. Objetivo 178
7.5. Metodología 178

7.6. Visión general del sistema de pronóstico operativo 180
7.7. Dominios del Modelo 181
7.8. Arquitectura del sistema 182
7.9. Implementación operativa 184
7.10. Ejecución de la implementación 184
7.11. Mantenimiento y soporte del sistema 185
7.12. Resultados 185
7.13. Huracán Categoría 1 Franklin 2017 187
7.14. Huracán Categoría 1 Katia 2017 194
7.15. Desarrollo actual y trabajo por hacer 202
7.16. Separación del preproceso 202
7.17. Aumento en tiempo de pronóstico 202
7.18. Cómputo en la nube 202
7.19. Conclusiones 203
7.20. Referencias 203
ANEXO 1 204

8. Variabilidad de la temperatura superficial en Puerto Vallarta, Jal., México
Surface temperature variability in Puerto Vallarta, Jal., Mexico 207
Fátima Maciel Carrillo-González; Antonio Velázquez-Ruiz;
Julio Cesar Morales-Hernández; Virginia Martínez Hernández
y Héctor Javier Rendón Contreras
8.1. Resumen: 207
8.2. Introducción 208
8.3. Materiales y métodos 210
8.4. Resultados y Discusiones 214
8.5. Conclusiones 219
8.6. Agradecimientos 219
8.7. Referencias 220

9. Evaluación de la concentración de partículas pm10 en la zona urbana de Puerto Vallarta, Jalisco, y su relación con los fenómenos atmosféricos
Evaluation of the concentration of particles pm10 in the urban zone of Puerto Vallarta, Jalisco, and his relation with the atmospheric phenomena 223
Julio Cesar Morales Hernández; Fabiola Ponce Pelayo;
Víctor Manuel Cornejo López; Fátima Maciel Carrillo González
9.1. Resumen 223
9.2. Abstrac 224
9.3. Introducción 225
9.4. Área de estudio 227
9.5. Materiales y métodos 229
9.6. Resultados 230
9.7. Relación sistemas atmosféricos – concentración de PM10 233
9.8. 19 de febrero punto Ixtapa 233
9.9. 31 de marzo punto Aurora 236
9.10. Conclusiones 238
9.11. Recomendaciones 239
9.12. Agradecimientos 240
9.13. Referencias 240

10. Vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales el caso de dos ciudades del estado de yucatán 243
Marcelino García Benítez; Salvador Adame Martínez; Roberto A. Sánchez Rodríguez
10.1. Resumen 243
10.2. Introducción 245
10.3. Vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales 247
10.4. Materiales y métodos 249
10.5. Procesamiento de los indicadores 256

10.6. Escenarios de cambio climático en la península de Yucatán 258
10.7. Resultados 260
10.8. Discusión 264
10.9. Conclusiones 267
10.10. La gestión local ante la vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales 268
10.11. Agradecimiento 269
10.12. Referencias 269

11. Vulnerabilidad de la producción de maíz de temporal asociada a la variabilidad climática 275
Arturo Álvarez Bravo; Víctor Antonio Vidal Martínez; José Irán Bojórquez Serrano
11.1. Resumen 275
11.2. Abstract 276
11.3. Introducción 277
11.4. Materiales y métodos 280
11.5. Resultados y discusión 283
11.6. Caracterización de las fases del ENSO y el rendimiento 287
11.7. La vulnerabilidad del maíz de temporal 288
11.8. Conclusiones 288
11.9. Agradecimientos 289
11.10. Referencias 290

12. Desastre y vulnerabilidad: el caso de dos localidades veracruzanas afectadas por el huracán Karl y la tormenta tropical Matthew 295
Ana Cecilia Travieso Bello ; Carlos Manuel Welsh Rodríguez ; Carolina Andrea Ochoa Martínez
12.1. Resumen 295
12.2. Introducción 296
12.3. Huracán Karl y tormenta tropical Matthew 298
12.4. Materiales y métodos 299
12.5. Resultados y discusión 302
12.6. Análisis de la vulnerabilidad 305
12.7. Percepción sobre los cambios en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos 308
12.8. Conclusiones y recomendaciones 309
12.9. Referencias 311

13. La historia ambiental como herramienta en el manejo de riesgo de inundación: el caso de Ensenada, Baja California, México 315
Carlos Figueroa Beltrán; Alejandro García Gastelum
13.1. Resumen 315
13.2. Introducción 316
13.3. El surgimiento de la historia ambiental 318
13.4. Aportaciones de la historia ambiental 319
13.5. La historia ambiental en el manejo integral del riesgo ambiental (mira) 320
13.6. La historia ambiental en el manejo del riesgo por inundaciones 321
13.7. Materiales y métodos 322
13.8. Resultados 324
13.9. Conclusiones 327
13.10. Agradecimientos 328
13.11. Referencias 328

14. Caracterización hidrogeomorfológica de geoformas kársticas epigeas y amenaza de inundación en el estado de Campeche 331
A. Gerardo Palacio Aponte; Óscar Frausto Martínez
14.1. Resumen 331
14.2. Introducción 332
14.3. Antecedentes 334

14.4. Tipología e intensidad inferida de la susceptibilidad a la inundación 338
14.5. Materiales y métodos 340
14.6. Resultados 345
14.7. Conclusiones para la prevención de riesgos y desastres 350
14.8. Referencias 352

15. El riesgo de inundación suscrito a los cambios de usos de suelo de cuencas periurbanas 355
Daniel González Correa; Rocío Becerril-Piña; Carlos A. Mastchi-Loza;
Mónica Cervantes Jiménez; Aurelio Guevara Escobar; Ma. de Lourdes Romo Aguilar; Enrique González Sosa
15.1. Introducción 356
15.2. Marco teórico, modelo Shetran 357
15.3. Materiales y métodos 358
15.4. Evaluación de los cambios de uso del suelo 361
15.5. La precipitación y el escurrimiento en las cuencas 362
15.6. Análisis de sensibilidad de parámetros 364
15.7. Simulación de escenarios futuros 366
15.8. Resultados y discusión 367
15.9. Importancia de la resolución tamaño de pixel en la modelación hidrológica 368
15.10. Modelación de escenarios retrospectivos con los eventos del 01, 10 y 17 de septiembre de 2015 370
15.11. Reconstrucción del escenario 1986 y 2001 en la microcuenca San José 370
15.12. Reconstrucción del escenario 1986 y 2015 en la microcuenca Amazcala 372
15.13. El escenario en 2050 de las cuencas periurbanas de San José y Amazacala 374
15.14. Conclusiones y recomendaciones 376
15.15. Referencias 378

16. La problemática de las casas anglo-caribeñas en Chetumal, Quintana Roo, frente a las amenazas climáticas 381
Joel Francis Audefroy; Bertha Nelly Cabrera Sánchez; Edith Montesinos Pedro
16.1. Resumen 381
16.2. Introducción 382
16.3. La historia de la población de Payo Obispo.(Chetumal). 383
16.4. Los riesgos hidrometeorológicos en una ciudad costera: Huracanes, inundaciones y hundimientos. 389
16.5. Tipología de las casas anglo-caribeñas, patrimonio cultural de Chetumal 396
16.6. Discusión 400
16.7. Agradecimientos: 402
16.8. Referencias 402

17. Comportamiento de los índices de vegetación del cultivo de vid para producción de vino de mesa y los periodos de sequía en el Valle de Guadalupe, B. C. 405
Magdaleno Esquer Sheila Soraya; García Gastélum Alejandro; Hallack Alegría Michelle; Seingier Georges
17.1. Resumen 405
17.2. Introducción 406
17.3. Materiales y Métodos 410
17.4. Resultados y discusión 413
17.5. Conclusión 420
17.6. Referencias 421

18. CONCLUSIONES 423

Índice Figuras 429

Índice Cuadros 437

RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO:
EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS

Prólogo

Si bien el mundo nunca ha sido estático, es cierto que en términos de la historia de la humanidad, la velocidad con que ocurren los cambios hoy en día es mucho más rápida que antaño. Mientras que la revolución agrícola tomó 300 años, la digital tomó 30. Este cambio tecnológico, facilitó la comunicación y dispersión del conocimiento e incidió en el avance acelerado de la ciencia cómo en ninguna otra época. Sin embargo, así como se pueden enlistar avances benéficos para la humanidad, también se pueden resaltar cambios que conllevan al deterioro en la calidad de vida de la gente. La aplicación de la ciencia ha sido, en la mayoría de los casos, causa y solución de estos problemas. Derivado de esto, la percepción sobre la importancia de la ciencia y la tecnología, así como la política en torno a la aplicación y al desarrollo de éstas, también ha cambiado: hay un reconocimiento creciente de que las tomas de decisiones deben estar científicamente sustentadas y de la necesidad de impulsar la innovación para el bienestar social, así como de establecer una mayor articulación entre la investigación científica y tecnológica con el sistema productivo.

Sin duda alguna, uno de los grandes retos a los que se enfrenta la humanidad es atender de manera efectiva los efectos que el cambio climático tiene sobre la vida en nuestro planeta. México ha sido un actor entusiasta y propositivo en los acuerdos internacionales relacionados con la mitigación y adaptación al cambio climático. Los compromisos que se han adquirido en los foros internacionales implican una oportunidad para impulsar la investigación científica en torno a temas como la modelación del clima, el desarrollo de energías renovables o la generación de instrumentos de alerta temprana. Estos compromisos también representan una oportunidad para articular a los distintos sectores a fin de construir un frente común al problema del cambio climático que permita solucionarlo de manera equitativa en los aspectos espacial, temporal y social.

Existen personas que niegan el origen antrópico del cambio climático que estamos viviendo en esta época, sin embargo, la mayoría de ellas reconoce que se trata de un problema complejo, por lo que la interdisciplina se vuelve un imperativo científico para encontrar soluciones eficientes y eficaces , no como una meta por sí misma sino como un medio para acercarse a la investigación (Global Research Council, 2016).

Además de la interdisciplina, el enfoque integral o sistémico se percibe como la perspectiva que debe ser adoptada para atender la mitigación y la adaptación al cambio climático. Las investigaciones que vinculan el nivel micro, meso y macro de cualquier ecosistema o sistema de ecosistemas se consideran la visión correcta. Entender los fenómenos climáticos, así como la gobernanza de la biodiversidad y la comunicación efectiva sobre la relevancia de nuestro entorno natural son estudios que se entrelazan para explicar de manera conjunta problemas globales como es el caso del cambio climático.

Este libro es producto del trabajo entre investigadores de diferentes disciplinas que colaboran a través de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), por lo tanto, muestra una visión integral que permite hallar las mejores soluciones a la problemática aquí abordada.

El programa de Redes temáticas facilitó el trabajo de REDESClim desde su creación, por lo que recibe apoyo de recursos a fin de llevar a cabo colaboraciones interdisciplinarias que permiten encuentros entre investigadores, actores del gobierno, de empresas y de sociedad civil organizada y no organizada. Esta pluralidad ha sido fundamental no sólo para promover el flujo de información y el surgimiento de nuevas ideas, sino también para optimizar recursos e incidir de manera acertada en la sustentabilidad de nuestro entorno.

REDESClim se originó en 2011 como resultado de una de las primeras convocatorias publicadas por el programa de Redes Temáticas Conacyt. Cuenta actualmente con 76 miembros distribuidos en 34 instituciones y 23 entidades del país. Su incidencia traspasa el ámbito académico llegando a influir tanto las tomas de decisiones como en la elaboración de programas de protección civil.

En este libro, el lector podrá acceder a una serie de datos que evidencian los cambios en la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos en México, así como el incremento en la irregularidad de patrones de lluvia que generan periodos de largas sequías en algunos lugares y severas inundaciones en otros. De igual forma, podrá conocer la vulnerabilidad de nuestra población y su capacidad de resiliencia ante los desastres ocasionados por dichos eventos. Entre sus páginas, se manifiesta la heterogeneidad de nuestro país, tanto en ecosistemas biológicos como en comunidades humanas, lo cual vuelve más compleja la tarea de implementar acciones que contribuyan con la disminución de riesgos por eventos naturales extremos. Asimismo se demuestra que, además de la vulnerabilidad socioeconómica, la vulnerabilidad institucional es una de las más preocupantes. La falta de cumplimiento de reglas se menciona también como ese lastre infranqueable que lastima a los que menos tienen.

La ciencia y la tecnología tienen mucho que aportar en lo que a mitigación y adaptación al cambio climático se refiere. Sin embargo, el conocimiento experto no es suficiente para resolver este problema global. Se requerirá de un cambio profundo en los patrones de consumo que impera en las economías más avanzadas y en las sociedades con alto poder adquisitivo, también se necesita de voluntad política. De esta manera, ciencia, tecnología, sociedad y gobierno deben unir esfuerzos para enfrentar de manera justa y oportuna los desastres asociados al cambio climático global.

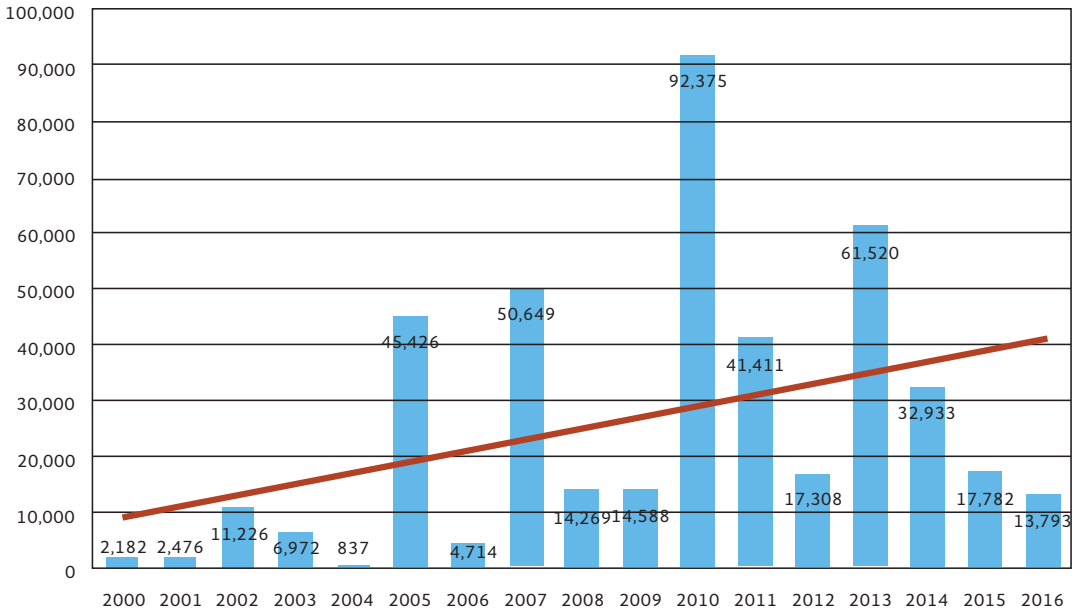
Verónica Bunge Vivier

RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO:
EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS

Introducción

Juan Manuel Rodríguez Esteves, Carlos Manuel Welsh Rodríguez, Ma. Lourdes Romo Aguilar y Ana Cecilia Travieso Bello

Por su ubicación entre el Océano Pacífico y el Océano Atlántico, México es susceptible a los efectos de un gran número de fenómenos naturales como huracanes, sismos, erupciones volcánicas, lluvias intensas, deslaves, etc., es decir, está expuesto a este tipo de amenazas naturales. Por otro lado, debido a la distribución de la población y zonas industriales en todo el territorio nacional, es propenso a otro tipo de amenazas consideradas como antropogénicas como pueden ser los incendios industriales, derrames químicos, explosiones, accidentes en el transporte, etc. La Gráfica I.1 muestra el impacto económico de los desastres durante el periodo 2000-2016.



Gráfica I.1. Impacto económico anual de los desastres en 2000-2016 en México (millones de pesos)
Fuente: Segob-Cenapred, 2018.

Con base en la información de la Gráfica I.1, para el periodo 2000-2016 (línea continua) se presenta un incremento en el monto de pérdidas económicas asociadas a fenómenos naturales intensos y a eventos antropogénicos. Dicho incremento puede estar asociado a dos circunstancias. Por un lado se podría deber al aumento en la intensidad y frecuencia de fenómenos naturales como huracanes, ondas de calor, sequías, etc., dentro de un contexto de cambio climático. Por otro lado, se podría deber a que los asentamientos humanos se encuentran más expuestos a este tipo de eventos al ocupar ciertas zonas consideradas de alto riesgo en algunas regiones costeras, llanuras de inundación, cauces de ríos y arroyos, laderas con fuerte pendiente, etc. De igual manera, el incremento de las pérdidas económicas de los desastres se podría deber a una combinación de estas dos situaciones.

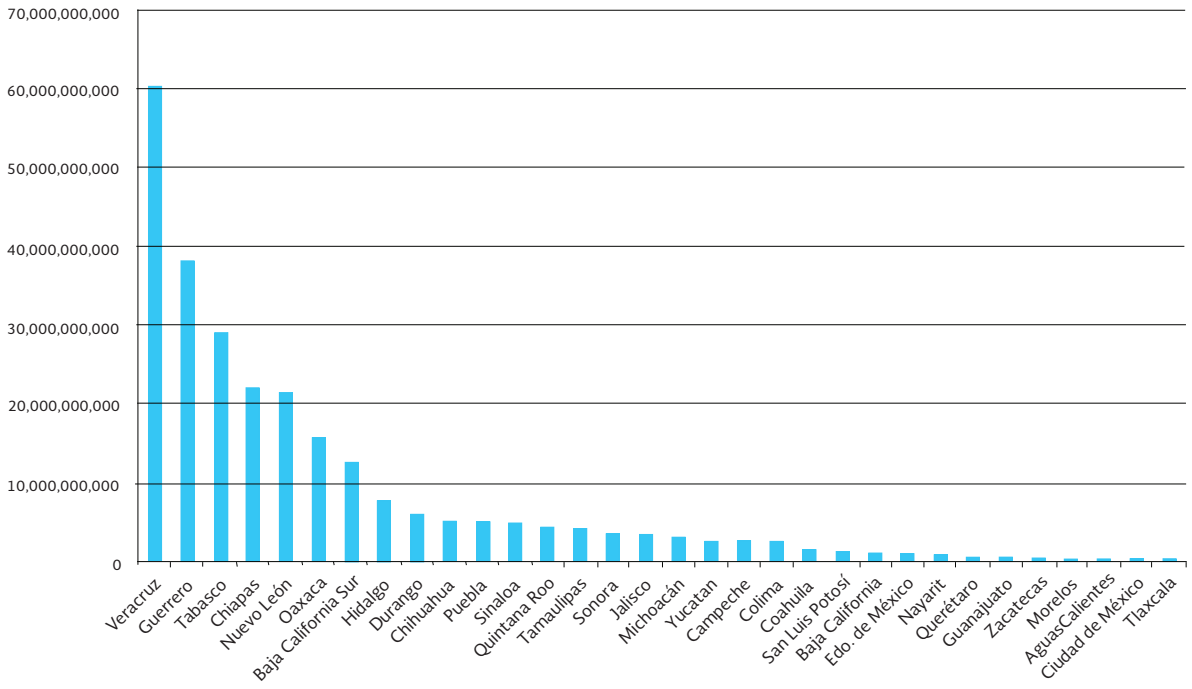
Los fenómenos naturales y los eventos antropogénicos no afectan a la sociedad de igual manera. Los sismos son los fenómenos naturales que por lo general provocan un mayor número de muertes en un solo evento, si se les compara con otro tipo de eventos como lluvias intensas o inundaciones, las cuales son más frecuentes y tienden a afectar una misma región en periodos relativamente frecuentes. En este sentido, los fenómenos denominados hidrometeorológicos fueron los responsables de provocar el 86% de los daños durante el año de 2016 en México, mientras que a nivel mundial, estos fenómenos provocaron el 90% de las pérdidas económicas de los últimos 20 años (Cred-Usaid, 2016).

En México los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos se presentan dependiendo de la distribución de la población a lo largo de su territorio. En un sentido amplio, el norte de México está caracterizado por sus bajos niveles de precipitación, frecuentes sequías y recurrentes ondas de calor. Por el contrario, el sur del país presenta los más altos registros de precipitación e inundación recurrentes, además de ser la región más afectada por los efectos de huracanes y otras tormentas tropicales.

Con base en información del Sistema Nacional de Protección Civil, coordinado por la Secretaría de Gobernación, el gasto con cargo al Fondo de Desastres Naturales (Fonden), fue concentrado en algunas entidades que se ubican tanto en la costa del Océano Pacífico como en las del Golfo de México, lo que permite tener una idea

general del grado de exposición a este tipo de fenómenos naturales en esos estados (ver Gráfica I.2).

La información presentada en la Gráfica I.2 hace referencia a los montos ejercidos por daños asociados a lluvias atípicas, inundaciones extremas, huracanes, tormentas tropicales, sequías severas y deslaves. De esta forma son los estados del sur y costa del Golfo de México como Veracruz, Guerrero, Tabasco, Chiapas y Oaxaca los que concentran los gastos para atender la reconstrucción de infraestructura dañada o destruida por efectos de eventos hidrometeoro lógicos. En la región norte de México, los estados de Nuevo León y Baja California Sur fueron los que requirieron mayores montos económicos para la reconstrucción.



Gráfica I.2. Impacto económico anual de los desastres en 2000-2016 en México (millones de pesos).
Fuente: Segob-Cenapred, 2018.

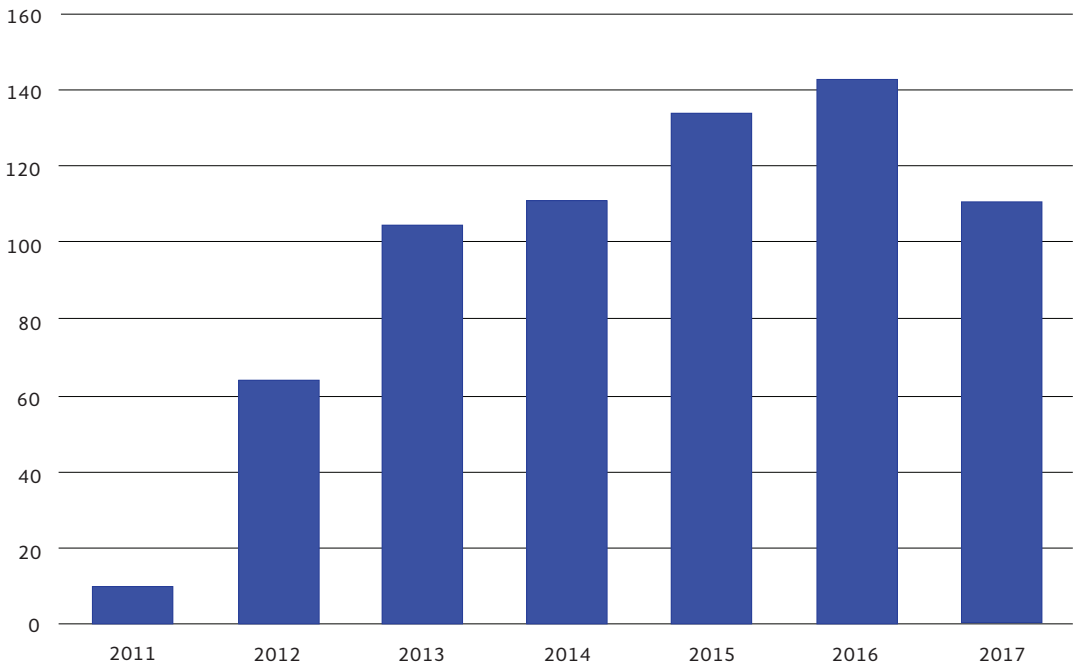
Ante esta panorama, en el año 2010, un grupo de diez investigadores del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (Cicese), la Universidad Nacional Autónoma de México (Unam), el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (Cibnor), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Imta) y El Colegio de

la Frontera Norte (El Colef), propusieron al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) la creación de la red temática de investigación Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) (www.redesclim.org.mx), la cual fue aprobada por el Consejo Asesor de Redes Temáticas del Conacyt en las sesiones del 29 y 30 de junio de ese año y el convenio de integración se firmó el 25 de febrero de 2010 en la Ciudad de México.

Desde su creación REDESClim ha trabajado para alcanzar los siguientes objetivos generales:

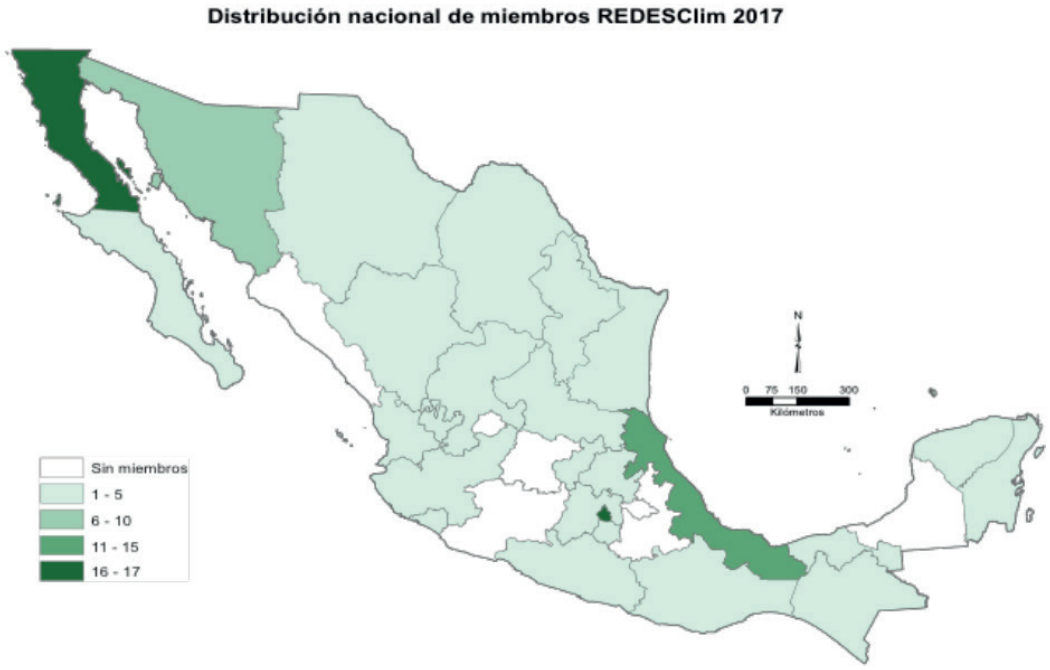
- Fomentar la investigación científica y la evaluación interdisciplinaria de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México.
- Fomentar la colaboración y el desarrollo de propuestas de investigación con instituciones académicas, gubernamentales y otras redes interdisciplinarias que trabajan con investigación aplicada, prevención y mitigación de desastres tanto a nivel nacional como internacional.
- Proponer el desarrollo de nuevas convocatorias de investigación en los temas de la red.
- Promover el desarrollo de capacidades humanas mediante cursos, talleres, posgrados interdisciplinarios y estancias académicas.
- Proponer medidas de prevención, mitigación y atención de los desastres asociados a fenómenos naturales.

Para lograr sus objetivos de REDESClim, Conacyt publicó una convocatoria para la adhesión de miembros a inicios de 2011, con lo que la incipiente red pasó de diez miembros, quienes conformaron el primer Comité Técnico Académico (CTA) a 64 miembros. Para los años siguientes, fue el propio CTA el responsable de emitir la convocatoria para el ingreso de nuevos miembros a la Red y cumplir con una de sus metas, tener presencia a nivel nacional e internacional. Para el 2018 REDESClim contó con 76 miembros, los cuales deben suscribir una carta compromiso donde se estipula su interés de colaborar y participar en las actividades organizadas por la Red a partir de sus áreas de especialidad (ver Gráfica I.3).



Gráfica I.3. Evolución del número de miembros REDESClim
Fuente: elaboración propia.

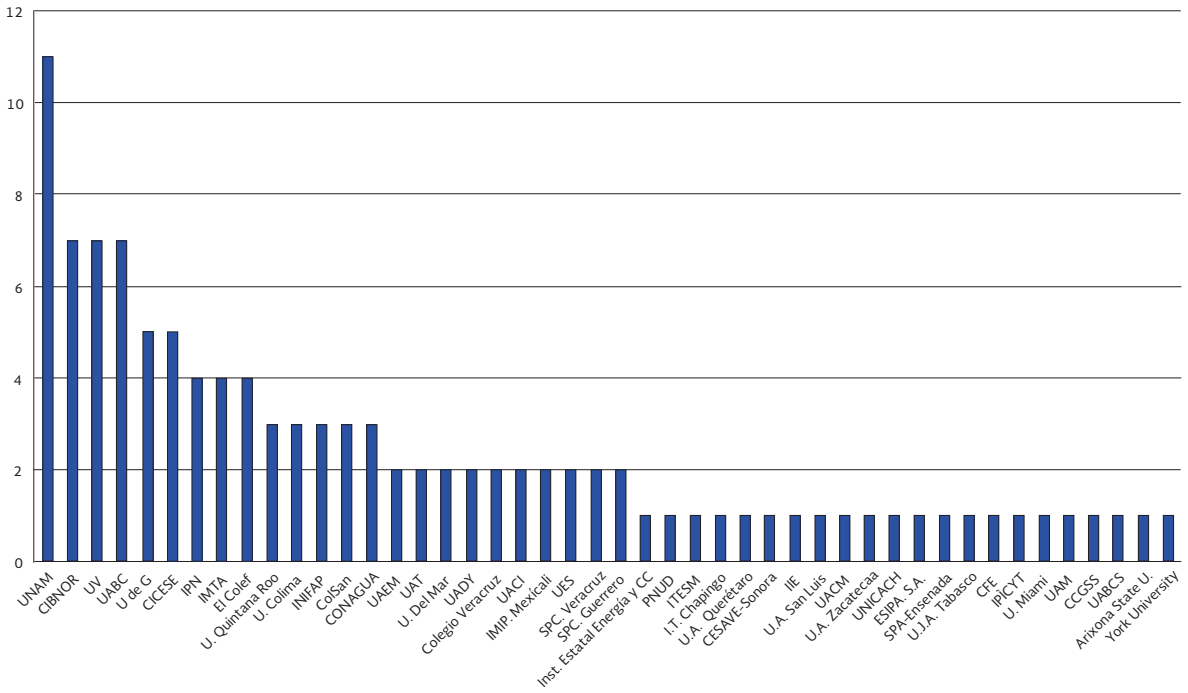
En el primer año de funciones, REDESClim solo tenía presencia en la región norte y centro del país (Baja California, Baja California Sur, Ciudad de México y Morelos), por lo que fue necesario buscar un mecanismo para ampliar la membresía, no solo en cuanto al número de miembros, sino de cubrir todo el territorio nacional, por lo que se buscó realizar actividades en diferentes estados. De esta forma, la primera reunión nacional de REDESClim se llevó a cabo en 2011 en Huatulco, Oaxaca, región expuesta a diversas amenazas y fuerte vulnerabilidad a eventos hidrometeorológicos, posteriormente se realizaron otras reuniones en Ciudad de México (2012 y 2014), Boca de Río, Veracruz (2015) y La Paz, Baja California Sur (2017). En la actualidad, los miembros de REDESClim se distribuyen en el 80% del territorio nacional (ver Gráfica I.4).



Gráfica I.4. Distribución de miembros REDESClim por entidad federativa (2017)
Fuente: Useg, El Colef, 2017.

El crecimiento de REDESClim también ha implicado una diversificación de las instituciones de adscripción de sus miembros. La Gráfica I.5 presenta la distribución por institución de los miembros de la Red, donde se distingue la diversidad de conocimientos en las áreas naturales, aplicadas y sociales. De esta forma se busca conformar un grupo interdisciplinario e interinstitucional para profundizar en la investigación, discusión y proposición de temas que buscan la reducción del riesgo de desastre ante eventos hidrometeorológicos y climáticos. Como también se puede apreciar, es la Universidad Nacional Autónoma de México la institución que aporta a un mayor número de investigadores a REDESClim, con 11 miembros, seguido por el Cibnor, Universidad Veracruzana (UV) y la Universidad Autónoma de Baja California (Uabc) con siete miembros cada institución.

La reducción del riesgo de desastre ante eventos hidrometeorológicos y climáticos conlleva la participación de una amplia variedad de especialistas en las áreas de meteorología, hidrografía, geografía, antropología, sociología, políticas públicas, etc. y en REDESClim se ha conformado un grupo de investigación en estas y otras disci-



Gráfica I.5. Adscripción institucional de los miembros de REDESClim (2017)
Fuente: elaboración propia.

plinas. Sin embargo, también es necesario contar con expertos tanto de la academia como de las áreas operativas, de planeación y de toma de decisiones, por lo que desde sus inicios la Red ha incluido a tres grandes grupos de miembros.

- Miembros académicos: son investigadores y profesores de instituciones académicas de universidades y centros públicos de investigación, tanto nacionales como extranjeros
- Miembros estudiantes, pertenecen a programas de posgrado en activo, y están asociados académicamente con algún miembro académico y,
- Miembros no académicos: son miembros adscritos a instituciones de los tres niveles gubernamentales, de la sociedad civil y empresas.

Con esto se busca fortalecer los estudios y otras actividades que desarrolla la Red para mejorar el conocimiento y diseño de políticas públicas en la reducción del riesgo de desastres.

Sobre esta obra

En las instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (Cibnor) se llevó a cabo del 12 al 13 de octubre de 2017 la Quinta Reunión Nacional REDESClim, la cual convocó a sus miembros para presentar avances, resultados y propuestas de investigación (ver FOTO I.1). Durante la Quinta Reunión se presentaron 26 trabajos organizados en cinco mesas de discusión y cuatro conferencias magistrales. Los trabajos presentados debieron cumplir con las normas básicas editoriales ya que serían el insumo para la elaboración de este libro. Las mesas de discusión presentadas en la Quinta Reunión de REDESClim fueron:

1. Datos y Monitoreo 1
2. Datos y Monitoreo 2
3. Diagnóstico y Procesos
4. Vulnerabilidad y Riesgo de Desastres 1
5. Vulnerabilidad y Riesgos de Desastres 2

El presente libro es resultado de los trabajos que realizan los miembros de REDESClim de manera conjunta presentados en la Quinta Reunión 2017. La obra consta de 17 capítulos organizados en dos partes que, más de una mera separación de los temas abordados, obedece a un orden funcional de los grupos de trabajo de REDESClim, por lo que existen capítulos que pudieran estar en una u otra sección. De esta forma, la primera sección está dedicada a Datos y Monitoreo y la segunda sección a Diagnóstico, Vulnerabilidad y Riesgos.

Datos y Monitoreo

Esta sección está conformada por nueve investigaciones dedicadas a los temas de tornados, ciclones tropicales, bases de datos, sequías, simulación hidrológica, modelación numérica, variabilidad de temperatura y monitoreo atmosférico. A continuación se hace una breve presentación.

En el trabajo "Monitoreo de indicadores de resiliencia urbana ante huracanes para las ciudades costeras: Playa del Carmen, Caribe Mexicano", Frausto y colaboradores proponen un conjunto de indicadores de resiliencia urbana, agrupados en siete temas: natural, social, económico, construido, organizacional, cultural y espacio-temporal. Dichos indicadores los aplican en Playa del Carmen para el período 2000-2017 y analizan sus limitaciones con base en la pertinencia, comprensión, fuente de datos, comparabilidad y capacidad predictiva. La aplicación de la propuesta metodológica con enfoque de cambio climático, permitió definir en las ciudades estudiadas, las áreas propensas a ser afectadas ante la presencia de futuros eventos ciclónicos.

El estudio "Análisis espacio temporal y perspectivas de tornados en México", que presentan León y colaboradores, muestra los patrones espacios temporales en la ocurrencia de estos fenómenos y analizan las condiciones sinópticas bajo las cuales se han detectado la formación de tornados, así como los daños que éstos han ocasionado en México.

El trabajo "Desastres asociados a ciclones tropicales en la costa occidental de México: 2011-2015" de Farfán y colaboradores, analiza los desastres asociados al desarrollo de ciclones tropicales en la costa occidental de México, con origen en la cuenca del Océano Pacífico Oriental, durante las temporadas 2011-2015. Como uno de sus aportes, se hace una comparación con eventos históricos relevantes que causaron desastres, tanto en la costa noroeste como en el suroeste y sur del país, en el período 1970-2010.

En un trabajo sobre "Métodos para la generación y organización de bases de datos, metadatos y visualizaciones cartográficas de clima extremo, bioclima, cambio climático y ecosistemas en el estado de Tabasco y áreas adyacentes", Fernández Eguiarte y sus colaboradores describen la generación de bases de datos de variables climáticas, de climatología extrema, bioclimáticas y de cambio climático, así como algunos aspectos de ecosistemas en el estado de Tabasco y áreas adyacentes que sirven de base para la toma de decisiones en la reducción de riesgo de desastres asociados a eventos hidrometeorológicos y climáticos, así como para la generación de propuestas de investigación e interpretación de la información ambiental y biológica actual y para

la simulación de escenarios futuros en diferentes escalas espacio-temporales en la región.

En el capítulo sobre "Balanceo de las lluvias ¿mecanismo oscilatorio natural que explica las sequías en el Altiplano Mexicano y las lluvias abundantes en la costa de Nayarit?", Brito-Castillo y colaboradores señalan que sus trabajos han mostrado que cuando en la región del Altiplano Mexicano (AM) las lluvias son prolíficas, en la costa occidental del Pacífico mexicano (COPM), llueve por debajo de la media y por el contrario, cuando en el AM se producen sequías, en la COPM llueve por arriba de la media. En este trabajo se describe con mayor detalle estas configuraciones para explicar la posible relación de las sequías en el AM con las lluvias abundantes en la COPM y viceversa.

En su trabajo Velázquez y Talledos hacen una "Comparación del uso de datos meteorológicos observados y procesados en malla en la simulación hidrológica de eventos extremos en una cuenca en México". Los resultados muestran que los datos en malla y los datos de reanálisis presentan diferencias importantes respecto a las observaciones. Por lo tanto, los datos meteorológicos procesados deben usarse con cautela en la simulación hidrológica.

Bravo y Miranda plantean una "Modelación numérica para la prevención de riesgos meteorológicos en el Estado de Veracruz" que constantemente está expuesto a fenómenos meteorológicos extremos como los provenientes de frentes fríos, ondas del este, fenómenos locales de mesoescala, ciclones y la interacción entre estos fenómenos. Estos autores señalan como un acierto integrar en una misma institución (Centro de Estudios y Pronósticos Meteorológicos - CEPM) a los previsores del tiempo con los operadores de las emergencias, permitiendo una interacción rápida y sustanciosa, para ello se ha implementado el modelo numérico "Weather Research and Forecasting" en forma operativa y automática.

Por su parte, Carrillo-González y sus colegas analizan la "Variabilidad de la temperatura superficial en Puerto Vallarta, Jalisco". En este trabajo se presenta un análisis de la variabilidad de la temperatura superficial en la ciudad de Puerto Vallarta, costa centro del Pacífico Mexicano, durante el periodo de 1926 al 2016. En sus resultados encon-

traron que la tendencia de la temperatura máxima está decreciendo, sin embargo, la mínima se ha incrementado, disminuyendo así la amplitud térmica anual.

Morales y colaboradores realizan una "Evaluación de la concentración de partículas PM10 en la zona urbana de Puerto Vallarta, Jalisco, y su relación con los fenómenos atmosféricos". Los autores exponen que la zona de estudio no cuenta con un sistema de monitoreo de calidad de aire por lo que ubicaron ocho puntos de muestreo con una unidad portátil en las zonas conurbadas de la región. Relacionaron las concentraciones de PM10 con los sistemas atmosféricos presentes y con las inversiones térmicas para cada día muestreado para observar si la variación de los datos está influenciada por estos aspectos. Concluyen que en algunos días se aprecia la relación de los sistemas atmosféricos presentes y las concentraciones obtenidas.

Diagnóstico, Vulnerabilidad y Riesgos

La segunda sección consta de ocho investigaciones relacionadas a los temas de resiliencia y vulnerabilidad ante ciclones tropicales, vulnerabilidad agrícola, desastres y vulnerabilidad, historia ambiental para el manejo del riesgo de inundación, caracterización hidrogeomorfológica, riesgo de inundación y cambio de uso del suelo, vivienda y amenazas climáticas y cambios del índice de vegetación y riesgos climáticos.

En el estudio "Vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales en dos ciudades expuestas del estado de Yucatán", de García-Benítez y colaboradores, se propone un índice de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales, que integra los subíndices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. Cada subíndice incluye variables que lo describen. El índice se aplicó a las ciudades de Motul y Progreso de Castro, Yucatán, contribuyendo a la gestión local del riesgo.

Álvarez-Bravo y colaboradores en su trabajo sobre "Vulnerabilidad de la producción de maíz de temporal asociada a la variabilidad climática en Nayarit", analizan el impacto de las fases del ENSO (fenómeno de El Niño Oscilación del Sur) en función de algunas variables meteorológicas, ciclo vegetativo del maíz y su grado de vulnerabilidad de la

producción. Se identificó que las fases del ENSO influyen de manera diferida según el tipo de ciclo vegetativo e incide de manera clara en algunas variables meteorológicas, las cuales son importantes en el desarrollo del maíz en temporal. Lo anterior explica el comportamiento del rendimiento, particularmente en variedades precoces en fase "Niño" y "Niña" (más humedad) y deja en claro cómo la vulnerabilidad de este cultivo puede disminuirse si se dispone de semilla adecuada para cada fase del ENSO.

El trabajo de Travieso-Bello y colaboradores "Desastres y vulnerabilidad: El caso de dos localidades veracruzanas afectadas por el huracán Karl y la tormenta tropical Matthew", presenta un análisis de los impactos del huracán Karl y la tormenta tropical Matthew, sobre las viviendas, actividades económicas, salud y vías de comunicación, en las localidades La Antigua y Nicolás Blanco, en el municipio La Antigua, estado de Veracruz. Además, propone un índice de vulnerabilidad global, integrado por las vulnerabilidades técnica, socioeconómica, educativa e institucional, que lo evalúan en ambas localidades. La información se obtuvo a partir de un cuestionario aplicado a una muestra representativa de la población en ambas localidades. Los tipos de vulnerabilidades que más contribuyen son: socioeconómica, institucional y educativa. En general, la población percibe un aumento de la frecuencia y sobre todo de la intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos. Los resultados obtenidos contribuyen a la gestión integral del riesgo en estas localidades.

Figueroa y García analizan la "Historia ambiental como herramienta en el manejo de riesgo de inundación para el caso de Ensenada, Baja California". Los autores plantean este tipo de análisis a partir de la historia de los fenómenos naturales y del ambiente biofísico en su relación con la sociedad. Concluyen entre otras cosas, que en el caso de Ensenada las frecuentes inundaciones son producto de una construcción social del riesgo, asociado a la ausencia de memoria histórica y a la carencia del manejo integral del riesgo por parte de autoridades locales, estatales y federales.

Palacio y Frausto en su trabajo "Caracterización hidrogeomorfológica de geoformas kársticas epigeas y amenaza de inundación en el Estado de Campeche" analizan las características morfométricas, morfológicas, morfopedológicas y ambientales que condicionan la susceptibilidad biofísica a inundaciones, mediante percepción remota,

obteniendo cuatro categorías de susceptibilidad a la inundación en el estado de Campeche. Esta propuesta la validaron con los muestreos realizados después del huracán Isidoro en 2002. Los resultados obtenidos contribuyen a la prevención de riesgos, evitando la acumulación histórica de la vulnerabilidad y reduciendo el riesgo potencial.

González y colabores en su trabajo "El riesgo de inundación suscrito a los cambios de usos de suelo de cuencas periurbanas" analizan, mediante imágenes satelitales y modelación hidrológica, los efectos de los cambios de uso de suelos sobre los componentes del balance hidrológico infiltración, escurrimiento y evapotranspiración, en dos cuencas periurbanas, ubicadas en el norte de la ciudad de Querétaro.

El trabajo "La problemática de las casas Anglo-Caribeñas en Chetumal, Quintana Roo

frente a las amenazas climáticas" de Audefroy y colaboradores, muestra la situación de las casas de madera estilo anglo-caribeño en Chetumal, que se encuentran en peligro de desaparición debido a distintos factores socioeconómicos, exposición frecuente a lluvias y ciclones tropicales, así como hundimientos por su localización en áreas que antes eran ocupadas por manglares. Se concluye que existen actualmente en la zona centro alrededor de unas 140 casas de madera, y apenas unas 27 se encuentran en buen estado. Asimismo existen algunos casos de alteraciones (ampliación, abandono, reconstrucción). El último huracán Janet azotó la ciudad en 1955 y destruyó buena parte de este patrimonio.

El trabajo "Comportamiento de los índices de vegetación del cultivo de vid para producción de vino de mesa y los periodos de sequía en el Valle de Guadalupe" que presentan García-Gastélum y colaboradores, evalúa para el período 2006-2016 el índice de vegetación del área agrícola, utilizando imágenes de satélite y lo contrasta con el índice estandarizado de precipitación, un indicador de sequía, para analizar su influencia de los cambios de la precipitación en la permanencia de las actividades agrícolas. Los resultados obtenidos comprueban la percepción informal que se tiene sobre el acelerado desarrollo vinícola en el Valle de Guadalupe; el aumento de pequeñas casas vinícolas con pocas hectáreas de cultivo de fines estéticos, representa un consumo elevado de agua para riego, que, considerando la sequía persistente, es incongruente

que los cultivos se incrementen, incluso cuando los varietales sean de temporal o estos no representen un cambio en el uso del suelo.

FOTO I.1. Participantes en la Quinta Reunión Nacional REDESClim, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, B.C.S., 2017
Fuente: CIBNOR.

Referencias

Cred-Usaid, 2016, Cred crunch, Brussels, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, United States Agency International Development, en https://www.emdat.be/publications?page=1, consultado el 28 de mayo de 2018.

Fonden, 1999-2017, Recurso autorizados por declaratoria de desastre, Fondo National de Desastres, México, en http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/Recursos_Autorizados_por_Declaratoria_de_Desastre, consultado el 15 de febrero de 2018.

REDESClim, 2010, Programa General de Trabajo 2011, Red temática de Conacyt, Desastres Hidrometeorológicos y Climáticos, septiembre de 2010.

Unidad de Servicios Estadísticos y Geomática (2017). Base de datos del USEG-El Colef. Disponible en: https://www.colef.mx/useg/

Segob-Cenapred, 2018, Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la Re-

pública Mexicana en 2016, Secretaría de Gobernación, Centro Nacional de Prevención de Desastres, en http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/384-IMPACTO2016OEFINAL12FEBRERO2018.PDF, consultado el 27 de febrero de 2018.

RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO:
EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS

1

Monitoreo de indicadores de resiliencia urbana ante huracanes para las ciudades costeras: Playa del Carmen, caribe mexicano

Oscar Frausto Martínez[1]* **; Aidé Beatriz Vázquez Sosa[2]*; Orlando Colín Olivares[3]*; María Luisa Hernández Aguilar[4]* **; Lucinda Arroyo Arcos[5]*; David Velázquez Torres[6]*

1.1. Resumen

El monitorio de indicadores sobre resiliencia urbana se fundamenta en el análisis de procesos de gestión de la información para la toma de decisiones, con el fin de prevenir y manejar contingencias ante desastres. La aplicación del monitoreo se lleva a cabo en la ciudad costera de Playa del Carmen, en el Caribe Mexicano. Ciudad urbana con más de 250 mil habitantes y con tasa de crecimiento anual mayor al 10 % en los últimos 20 años. Así, los indicadores se definieron bajo los principios del sistema socioecológico resiliente. Se identificaron siete temas (social, económico, natural, construido, organizacional, cultural y espacio-temporal) que comprenden 79 indicadores. Los indicadores se diferenciaron en clave y listas de verificación. El tiempo de cohorte es el año 2000, basado en los últimos huracanes- Emily y Wilma, 2005- de alto impacto para la ciudad.

1 E-mail: ofrausto@uqroo.edu.mx
2 E-mail: vazquez.aide@gmail.com
3 E-mail: colinolivareso@gmail.com
4 E-mail: malu@uqroo.edu.mx
5 E-mail: luarroyo@uqroo.com
6 E-mail: davvelaz@gmail.com
* Universidad de Quintana Roo-Unidad Académica Cozumel, Avenida Andrés Quintana Roo s/n, con 110 Sur frente a la Colonia San Gervasio C.P. 77600 Cozumel, Quintana Roo, México.
** Miembro de la REDESClim

Así, se analizan los cinco principios del monitoreo: pertinencia, la calidad de la información, objetivos, tendencia y significancia del sistema de indicadores de resiliencia urbana ante huracanes, confrontando los resultados con los usuarios directos de la gestión del riesgo local.

Palabras clave: Gestión de riesgo, calidad de datos, gestión local, peligros.

1.2. Introducción

Un tema prioritario a nivel nacional es la generación de políticas públicas que permitan el desarrollo de comunidades locales seguras. Por medio del reconocimiento de problemas nacionales que inhiben el crecimiento y que obstaculizan el bienestar de los habitantes, se hace necesario el estudio de la resiliencia urbana costera ante fenómenos naturales catastróficos (Sánchez, Cavazos y Morales, 2015). A su vez, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, la crisis económica y la pobreza extrema son solo unos indicadores que muestran la trasformación de los sistemas socioecológicos altamente vulnerables y con baja capacidad de adaptación (Pelling y Manuel-Navarrete, 2011; Birkmann, 2006).

La operacionalización del concepto de resiliencia en el estudio de los desastres fue focalizada en la evaluación de las amenazas y la vulnerabilidad, donde la resiliencia se entiende como la capacidad de la comunidad para restablecerse por sí misma ante los impactos de estos desastres (Cutter, Buerton, Emrich, 2010). Para Castillo y Velázquez (2015), la resiliencia ante desastres se en tiende como la capacidad de recuperación de una comunidad y se visualiza como un proceso de vinculación relaciones e interdependencias de actores integrantes de sistemas complejos comunitarios y sus capacidades de adaptación.

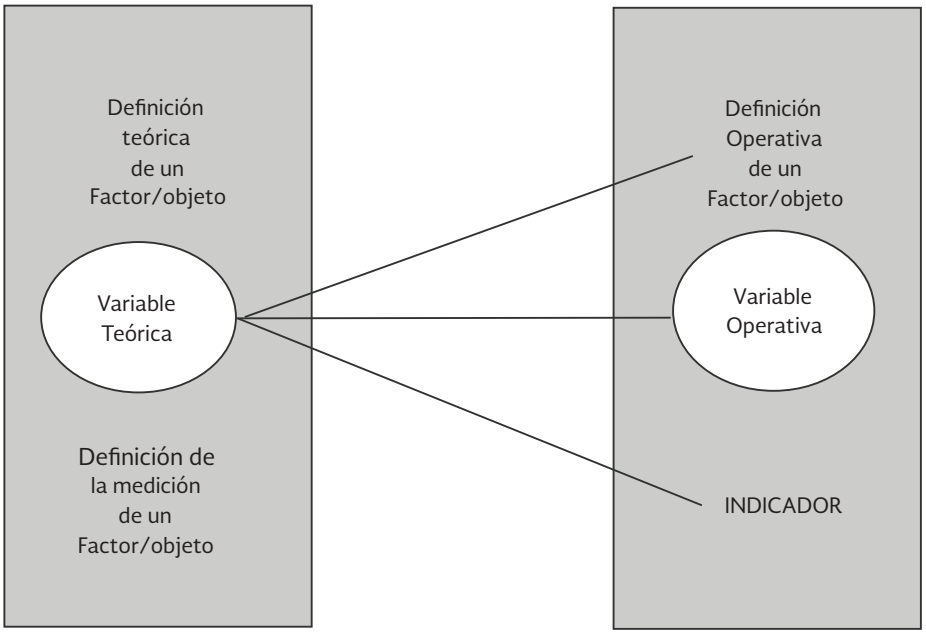
Así, las investigaciones hacen énfasis en la importancia de cuantificar la resiliencia, con el fin de estimar una línea base (de cohorte) y medir los progresos para aumentarla (Frazier, *et. al.*, 2013). Para la medición de la resiliencia se emplean los indicadores como herramienta de gestión eficaz que permite evaluar diversos fenómenos o pro-

cesos (desde los elementos de presión de una comunidad vulnerable y amenazada, el estado de exposición y la respuesta ante las afectaciones por un desastre), por lo que, a través del análisis del monitoreo de los indicadores, es posible una evaluación de la resiliencia urbana para ciudades costeras (Frausto, *et. al.*, 2016). Este trabajo tiene por objetivo caracterizar los procesos de monitoreo de indicadores como un eje central para la toma de decisiones y el quehacer de política pública de corto y largo plazo, presentando el caso de la gestión de la resiliencia urbana costera de la Ciudad de Playa del Carmen, ubicada en el Caribe Mexicano.

1.3. Los indicadores

Un indicador es una medición, cuantitativa o cualitativa, derivada de la observación de un hecho que simplifica y muestran la realidad de una situación compleja (Freudenberg, citado en: Carpenter, *et. al.*, 2001). Asimismo, resumen información, y no sólo hacen visible o perceptible cierto fenómeno de interés, sino cuantifican, miden y comunican información relevante para la toma de decisiones; pueden ser sencillos (determinados por una sola variable) o complejos (generados a partir de la relación o productos de dos o más variables) y ser de corte métrico o de lista de verificación (Frausto - Martínez, 2013). Los indicadores revelan la posición relativa de un fenómeno que es medido y evaluado en cierto tiempo – momento, puede ilustrar la magnitud de transformación o que muestra una dirección de cambio (Dakos, *et. al.* 2015). En la Gráfica 1.1, se muestran los elementos básicos que debe reunir un buen indicador.

Se tienen varios tipos de indicadores, entre los más usados están los siguientes (Wong, 2006): a) indicadores para implementación de políticas (mide progresos y alcance de objetivos); b) Indicadores temáticos (pobreza, violencia, desigualdad de género, de calidad de vida, vivienda, etc.); c) indicadores de seguimiento (a programas específicos, muy usados en la construcción del modelos de Presión-Estado-Respuesta), y d) indicadores de mejoramiento (se centran en el monitoreo, la evaluación de los procesos y resultados con el fin de identificar mejores prácticas), entre muchos otros. Sin embargo, pese a esta larga tradición en el tipo de indicadores y su aplicación, existe una brecha significativa en el uso, diseño, implementación, monitoreo y control (Birk-

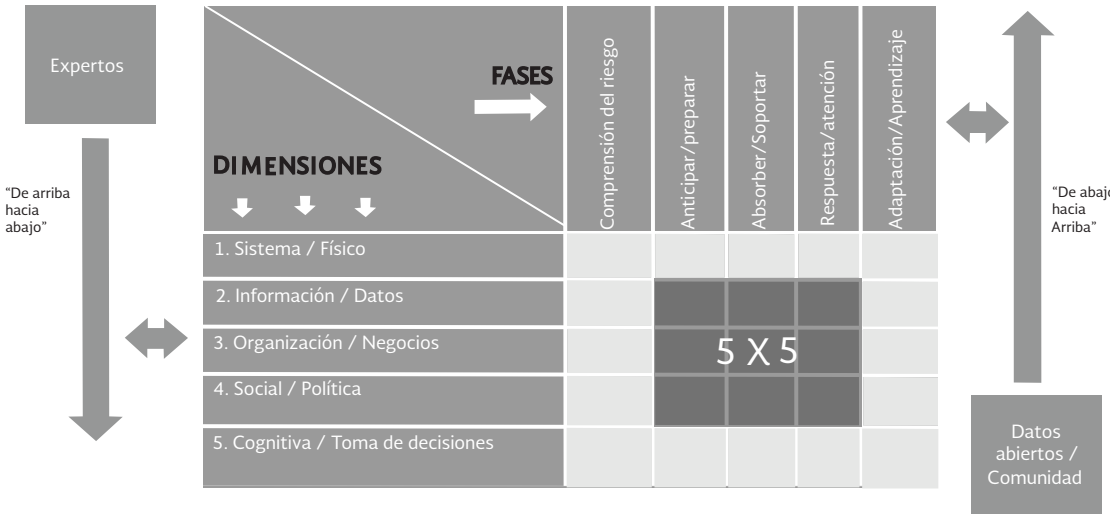


Gráfica 1.1. Generación conceptual de los indicadores
Fuente: Modificado de Jovanovic, *et. al.*, 2016.

mann, 2006; Magis, 2010; Frausto, *et. al.*, 2016).

Así, el primer estadio es reconocer el uso de los indicadores, donde se hace necesaria la diferenciación entre teorías y conceptos de definición de los indicadores para mediar y evaluar la resiliencia (Gráfica 1.2); en cuya etapa, la definición teórica de un indicador es eje central de discusión, donde el factor y las variables que lo componen se confronta con los elementos de medición y operación. Cuando se trata de medir y evaluar la resiliencia, es crucial que captemos las habilidades de resiliencia más importantes (a través de las fases, las dimensiones y el tema) (Jovanovic, *et. al.*, 2016).

Finalmente, la institucionalización de los indicadores (entendida como la configuración de procedimientos rutinarios y prácticas de mejora continua de un indicador y la legitimación de su concepto y métodos de medición), tiene una tradición y experiencia de más de 15 años en México, ya que por medio del compromiso de monitorear la Agenda Habitat y los Objetivos del desarrollo del Milenio se generaron mecanismos de implementación de indicadores para cumplir las Metas del Milenio, tanto a nivel nacional como a nivel local, bajo la responsabilidad de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol)



Gráfica 1.2. Proceso de reconocimiento de las dimensiones y fases de los indicadore
Fuente: Modificado de Jovanovic, *et. al.*, 2016.

y los Observatorios Urbanos Locales (Frausto y Guerra, 2010). Esta experiencia es retomada desde la Secretaría de Gobernación y de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu), bajo la supervisión del Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONUHABITAT), con el fin de monitorear el avance y cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible al 2030 y donde se muestra una guía para determinar el perfil de resiliencia urbana (Segob, 2016). Así, la definición de los indicadores y los datos para su obtención siguen un proceso de "Arriba hacia abajo" con el uso de bases de datos abiertas y de fuentes gubernamentales de generación de información (Inegi, Sedatu, Sedesol, Coneval, etcétera) (Frausto, 2013).

El gran problema de esta perspectiva generalizada de generación de indicadores es la homogeneización de la problemática de gestión de la resiliencia, así como la exclusión de particularidades y entornos críticos de los desastres. Por lo anterior, se hace necesario monitorear el sistema de indicadores de resiliencia urbana en contextos costeros, y que consiste en (Frausto, *et. al.*, 2016):

A) Análisis de la pertinencia del indicador, lo cual sirve en la toma de decisiones estratégicas, incluyendo las metas y tendencias.
B) Datos u obtención de la información, su análisis y la existencia de valores de umbral donde sea pertinente.

C) Comprensión del indicador, lo cual fortalece la credibilidad y confiabilidad para los usuarios.
D) Capacidad de predicción que permita advertir los problemas y cambios significativos, y
E) la valoración de los indicadores de acuerdo con la importancia para las decisiones y urgencia de uso o necesidad.

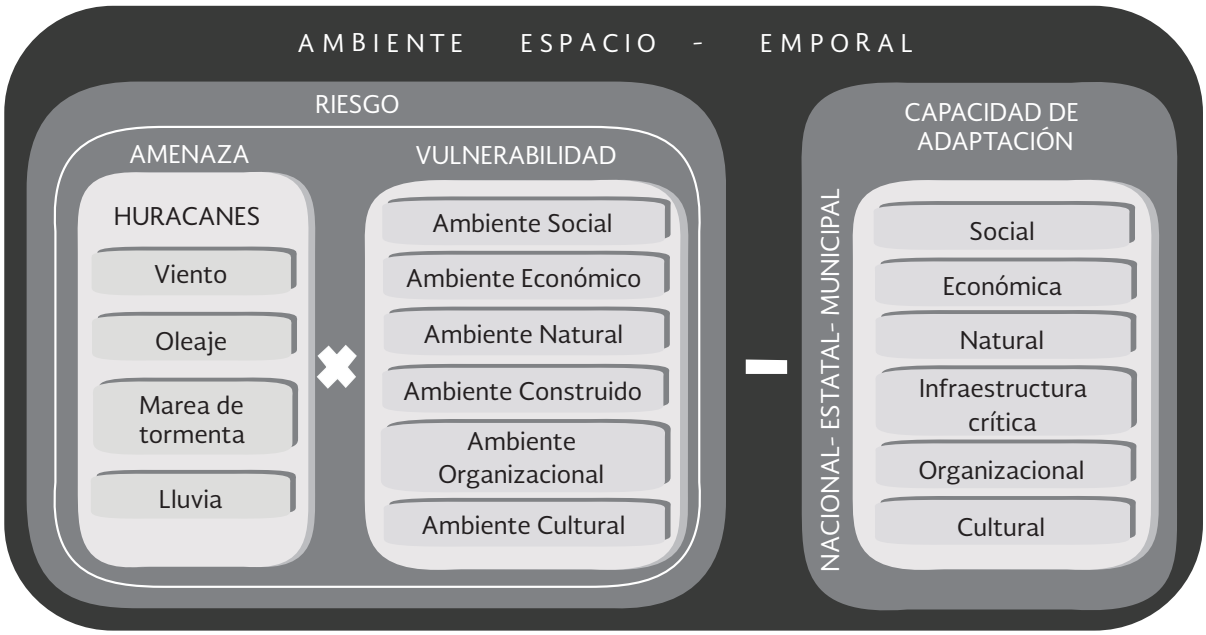
1.4. Indicadores de resiliencia urbano costera

El término de Sistema-Socio- Ecológico SSE (Berkes y Folke, 1998), se utiliza para referirnos a un concepto holístico, sistémico e integrador del "ser-humano-en-la-naturaleza". Por tanto se entiende como un sistema complejo y adaptativo en el que distintos componentes culturales, políticos, sociales, económicos, ecológicos, tecnológicos, entre otros, se relacionan (Resilience Alliance, 2010). Desde esta perspectiva, los SSE están compuestos de diversas partes que interactúan para formar una entidad mucho más compleja, la epistemología de esta visión busca ser sistémica y holística, en vez de enfocar la comprensión detallada de las partes, por lo que sus componentes son claves en la dinámica de todo sistema. Por tal motivo, surgen interacciones y retroalimentaciones socio-ambientales conocidas como "configuraciones emergentes", las cuales pueden auto-organizarse y adaptarse (Resilience Alliance, 2010).

De esta manera, los sistemas adaptativos complejos poseen una naturaleza evolutiva, lo que ha sido estudiado por Holling (2001), a través del concepto de "panarquía". La panarquía explica la estructura jerárquica en la que los SSE siguen unos interminables ciclos adaptativos de crecimiento, acumulación, reestructuración y renovación. La metáfora de "ciclos adaptativos" tiene su origen en la perspectiva ecológica planteada por primera vez por Holling (1973, 1992). Pero hoy en día, se afirma que estos ciclos adaptativos son aplicables a los SSE (Holling, 2001; Walker et al, 2002). Según Folke (2006), el reto del estudio de los SSE reside en el entendimiento de sus retroalimentaciones: (1) las que causan vulnerabilidad en el sistema y (2) las que fortalecen la resiliencia del sistema. Desde este contexto la capacidad adaptativa del sistema conlleva un papel muy significativo. La identificación de estos ciclos y sus

escalas nos puede servir para el fortalecimiento de la resiliencia del sistema y su camino hacia la sostenibilidad.

Bajo esta perspectiva de los SSE, se concibe el sistema de indicadores de resiliencia urbana ante huracanes para las ciudades costeras del Caribe Mexicano. Este modelo parte del modelo propuesto por Hernández (2014) y el modelo conceptual planteado por investigadores en el proyecto "Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano: Chetumal, Tulum y Playa del Carmen, CONACYT: 248375 (Gráfica 1.3). Así, el cálculo de la resiliencia, expresada en este trabajo como la capacidad de adaptación de un sistema, se realiza a partir de la combinación de fórmulas matemáticas empleadas por UNDRO (1980): Riesgo = Amenaza * Vulnerabilidad; y Henao (2013): Riesgo= (Vulne-



Gráfica 1.3. Modelo de indicadores de resiliencia de ciudades costeras ante huracanes
Fuente: Modificado de Hernández, 2014.

rabilidad/Capacidad de Respuesta)*Amenaza. Dando como resultado: Índice de Resiliencia = (Amenaza * Vulnerabilidad) – Capacidad de Adaptación.

Operacionalmente, se examina en una primera fase la amenaza, desde sus componentes

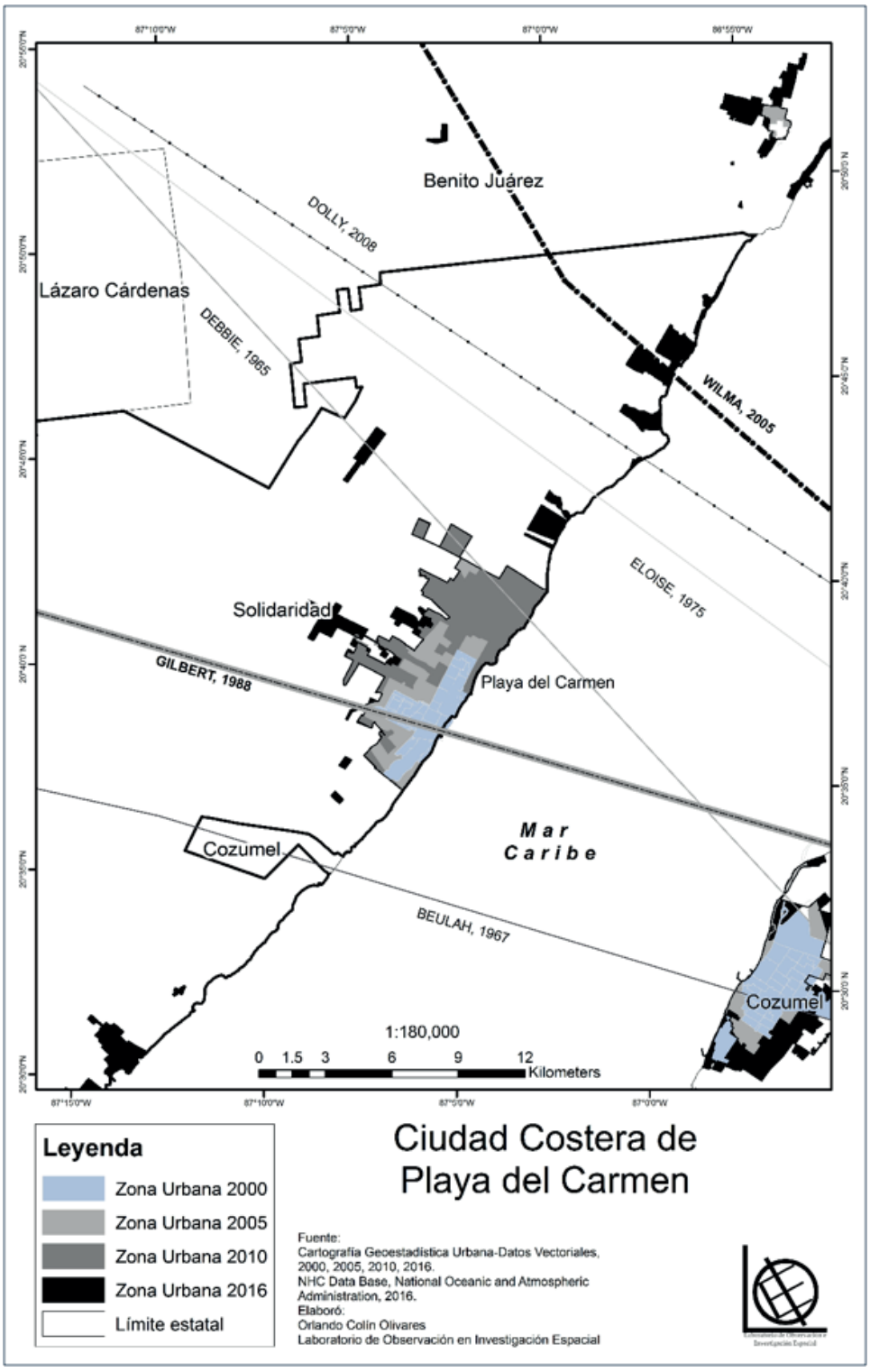
físicos, una segunda para el análisis de la vulnerabilidad del sistema, y una tercera, para medir la capacidad de adaptación alcanzada a partir de las diferentes dimensiones definidas, después del paso de un huracán. Se identifica a la ciudad costera como un sistema adaptativo complejo, donde actores sociales y biofísicos están interactuando a múltiples escalas temporales y espaciales, persiguiendo conocer esta posible re-organización.

Este modelo permite la identificación y clasificación de indicadores de Amenaza (A), Vulnerabilidades (V) y Capacidad de Adaptación (CA) encontrados en sistemas socio-ecológicos, como las ciudades costeras, permitiendo una comprensión más profunda de las variables implicadas y su sistematización al manejar dimensiones e indicadores en su estructura. Si bien, la metodología aplicada en esta investigación solo se enfoca a la amenaza de huracán, es posible también adecuarla a otras amenazas. Este modelo comprende un enfoque determinista, al recurrir a amenazas de épocas pasadas, sin embargo el modelo propuesto puede utilizarse para otras estimaciones y otras amenazas, así como para escenarios futuros a través de modelos de simulación (Hernández, 2014).

1.5. Materiales y métodos

Área de estudio

La ciudad de Playa del Carmen se ubica en la Región Caribe Norte (RCN), está integrada por los municipios de Benito Juárez (Cancún), Cozumel, Isla Mujeres, Tulum y Solidaridad, éste último se constituyó formalmente como octavo municipio del estado de Quintana Roo el 28 de julio de 1993, su cabecera municipal es Playa del Carmen, localizada al sureste de México, y al sur de Cancún en las coordenadas 20,62° Norte y 87,07° Oeste, tiene una extensión territorial de 2,205 km2 que representan el 4.33% respecto a la superficie total del estado de Quintana Roo; con 80 km de litoral en la costa del mar Caribe. Colinda al norte con el municipio de Puerto Morelos, al noroeste con el municipio de Lázaro Cárdenas; al este con el Mar Caribe y el municipio



Gráfica 1.4. Cuidad costera de Playa del Carmen, Municipio de Solidaridad, Quintana Roo, México
Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI, 2016, 2010, 2005 y 2000; NHC, 2016.

de Cozumel; y al sur con el municipio de Tulum (Gráfica 1.4) (Gobierno del Estado de Quintana Roo 2016; H. Ayuntamiento, 2016).

El clima del Municipio de Solidaridad es AX'(w2)iW'' de cálido subhúmedo con lluvias en el verano, con una temperatura media anual de 26°C; la temperatura máxima promedio es de 33°C, presente en los meses de abril a agosto, la temperatura mínima promedio es de 17°C en el mes de enero. Por su parte la precipitación media anual es alrededor de 1300 mm, la lluvia está presente durante todo el año, pero es más abundante de junio a octubre, meses donde la afectación de huracanes, tormentas tropicales e inundaciones es recurrente; la vegetación se conforma de selva mediana subperennifolia y subcaducifolia, y selva baja subperennifolia, valiosas para la explotación forestal debido a la presencia de maderas preciosas como la caoba y el cedro (INEGI, 2010).

Cabe señalar que en la primera década del año 2000, debido a la saturación de Cancún, las costas de Solidaridad y Tulum pasan a formar parte de la zona turística denominada "Riviera Maya", a la fecha han experimentado un crecimiento inusual (Arroyo, *et. al*; 2015). Entre ellos el crecimiento poblacional, que de acuerdo con los datos arrojados por el INEGI entre 1990 a 2000, pasó de 3,088 habitantes a 100,383, con una tasa de crecimiento media anual de 5.8 (INEGI, 2010). De igual forma se registra un crecimiento paulatino en oferta hotelera entre el año 2015 y 2016 en este último había un registro de 267 hoteles, con 38,135 habitaciones, entre otros indicadores importantes se encuentra: la afluencia turística con poco más de tres millones de personas, una ocupación hotelera entre 79% y 82% y gasto promedio del turista y cruceristа, que se mantuvo igual en ambos períodos (SEDETUR, 2015 y 2016).

1.6. Metodología

Para el logro del monitoreo del sistema de indicadores de resiliencia urbano costera de la ciudad de Playa del Carmen fue necesario:

a) Reconocer el concepto de resiliencia urbana costera en el contexto local, para ello se llevó a cabo un taller con expertos locales, el cual se desarrolló entre

el 22 y 23 de enero de 2016. En este taller participaron especialistas en el tema de la gestión de riesgos en contextos urbanos y costeros; se parte del principio de Wong (2006), donde el fundamento teórico y de base científica es de mayor peso con respecto a las experiencias empíricas y valorativas.

b) Identificar los problemas y riesgos para la resiliencia urbano costera ante huracanes, con base en la exposición de temas de campo concretos y recurrentes (muerte, abasto de agua, manejo de emergencias, inundaciones, alerta temprana, contaminación de playas, etcétera). Clasificación de riesgos y problemas de acuerdo con la importancia y complejidad, elaborando una tipología diferenciada por los temas de amenaza, vulnerabilidad y capacidad de adaptación; se definieron los indicadores y la fuente de información de datos siguiendo para ello el modelo de Hernández (2014) y Frausto, *et. al.*, (2016).

c) Desarrollo los indicadores de resiliencia urbano costera ante huracanes de la ciudad de Playa del Carmen con un tiempo de cohorte del 2000, 2005, 2010 y 2017, considerando para ello la secuencia de acción propuesta por Birkmann y Frausto (2001), que consiste en la diferenciación de indicadores en: 1) sencillos (dependientes de una variable) o complejos (dependiente de dos o más variables), y 2) con información (donde existe un fuente de datos y su acceso es inmediato) y sin información (cuyos indicadores dependen de proyectos específicos para obtener información para su desarrollo). Así, se reconocen cuatro etapas para el desarrollo de los indicadores: primero los indicadores sencillos con información, seguido de los complejos con información, continuando con los sencillos sin información y, finalizando, con los complejos sin información.

d) Monitoreo de los indicadores de resiliencia urbano costera ante huracanes para la ciudad de Playa del Carmen. El monitoreo se lleva a cabo una vez desarrollado el levantamiento y desarrollo de indicadores. En este se busca señalar las limitantes de acuerdo a los siguientes criterios propuestos por Frausto (2013): *pertinencia* —relevancia del indicador para la toma de decisiones estratégicas, incluyendo las metas y tendencias de desarrollo regional—;*comprensión* —acceso de manejo, credibilidad y confiabilidad para los usuarios de la información—; *fuente de datos* —análisis de la información y

la existencia de valores e índices—; *comparabilidad* —análisis local, regional, nacional e internacional— y *capacidad predictiva*—indicador que advierte de problemas, riesgos y cambios significativos. Para el análisis de los criterios de pertinencia y comprensión se llevaron a cabo entrevistas con los gestores de la ciudad de Playa del Carmen, se entrevistaros a tres funcionarios de alta dirección (Directora de ecología municipal, Director de protección civil municipal y Director técnico de protección civil municipal) y tres gestores comunitarios (Síndico municipal de turismo y ecología, Presidente del colegio de ingenieros civiles de Solidaridad y Directora de organización civil) durante los días 29 de mayo al 2 de junio del 2017. Para el caso de los criterios de datos, comparabilidad y capacidad predictiva, el análisis se ejecuta en función de la información de los indicadores.

1.7. Resultados

La resiliencia urbana costera se entiende como "…La capacidad que tienen las personas, los grupos y la sociedad costera y comunitaria para recuperarse de la adversidad y adaptarse a las nuevas condiciones utilizando su comportamiento y experiencias de aprendizaje para hacer frente a los efectos negativos y la destrucción causados por las inundaciones, los vientos, las lluvias, la erosión, y cómo se enfrentan a sus consecuencias, que pueden ser: emocionales, económicas, familiares, relacionadas con la tierra o bienes, materiales y socio-ecológicos; y que pueden ser a una escala espacial y temporal…" (Castillo, 2016).

Según esta definición, se han identificado los primeros factores clave para la integración y recolección de información en términos de espacio y tiempo: a) condiciones de vida de las personas, grupos, sociedad o comunidad; b) antecedentes de eventos adversos y adaptaciones, comportamiento y experiencias de aprendizaje en respuesta a estos eventos; c) la destrucción y el impacto negativo de los principales peligros; y d) medidas adoptadas para hacer frente a las adversidades.

Los factores que se determinaron para el análisis de la resiliencia se agrupan en factores de amenaza ante huracanes (viento, oleaje, marea de tormenta, lluvia), factores de vulnerabilidad diferenciado por ambiente (social, económico, natural, construido, organizacional y cultural), ambos determinan el riesgo; y los factores de la capacidad adaptativa (social, económica, natural, infraestructura crítica, organizacional y cultural).

Los indicadores de amenaza por huracán son cuatro: Viento, oleaje, marea de tormenta y precipitación. Para el caso de la Ciudad de Playa del Carmen, la última declaratoria de desastre por huracán se emitió el 28 de noviembre de 2005, en el Diario Oficial de la Federación, número 20.-3 (Segob, 2005), donde se hace referencia a la declaratoria con fundamento en los daños provocados por lluvias extremas, viento, oleaje, tormentas eléctricas y marea de tormenta ocasionadas por el paso del ciclón tropical Wilma los días 21 y 22 de octubre de 2005.

De acuerdo a la evaluación de El huracán "Wilma" que cruzó Playa del Carmen y Puerto Morelos con categoría 4, vientos de 220 km/h y rachas de 270 km/h atravesó al día siguiente. No obstante, a pesar de la intensidad y permanencia del ciclón y los ingentes daños económicos ocasionados al estado, sólo se reportó un número limitado de decesos atribuibles al mismo (3 en todo el estado). Se considera este huracán el más devastador de la historia del estado de Quintana Roo donde tuvo 63 horas de afectación continua. La precipitación pluvial fue de 1.5 veces la precipitación promedia anual. Todo ello ocasionó una notable pérdida de playas, que es uno de los recursos más señalados para la actividad turística de este estado. La región afectada contiene el 75% de la población total del estado y el 98% de la infraestructura hotelera. Dicha región genera una derrama turística anual de 4 mil millones de dólares, recibe a 10 millones de turistas y visitantes y genera nada menos que el 33% de las divisas que ingresan al país por concepto de turismo (Segob, 2005).

Los indicadores de vulnerabilidad se agrupan en seis ambientes y 48 indicadores. Se señala, la descripción los indicadores, la fuente de los datos, escala y el registro de la capacidad adaptativa en torno a la valoración de los indicadores frente al riesgo. La cohorte de datos es para el año 2000 al 2017.

La vulnerabilidad del ambiente social se determina a partir de cuatro factores y nueve indicadores (población- cinco indicadores; migración – un indicador; salud, dos indicadores, y educación – un indicador), de los cuales en sólo el 77 por ciento se tiene información para evaluar la capacidad adaptativa (Cuadro 1.1). Así, se reconoce una alta densidad de población, representación indígena, alto índice de población joven y con un 42 por ciento de población que no radicaba en la ciudad en los últimos cinco años, como el riesgo principal en la vulnerabilidad del ambiente social.

En el ambiente económico, la vulnerabilidad es valorada por medio de tres componentes y seis indicadores, donde la ausencia de datos en el 50% de los indicadores es relevante, por lo que la capacidad adaptativa gira en torno a las actividades asalariadas complementarias, los gastos y los ingresos del hogar. Por otro lado, la fortaleza en torno al conocimiento de la población económicamente activa, la identificación de los hogares con jefatura femenina y masculina permite establecer una prospectiva de estos hogares en caso de una contingencia (Véase Cuadro 1.2).

Los componentes de educación, vivienda y salud caracterizan el ambiente construido. Se evalúa por medio del seguimiento de uno, cinco y tres indicadores, respectivamente (Cuadro 1.3). De los nueve indicadores, sólo existe información de cinco. Destacan los datos de la calidad de las viviendas, sin embargo, no existen datos sobre las viviendas asentadas en sitios de riesgo y de aquellas que carecen de un seguro contra daños. Por otro lado, se cuenta con datos no actualizados sobre el hacinamiento, la calidad de las viviendas, vivienda con servicios y número de hospitales, cuya última fecha de actualización fue en el año 2005 o 2010.

La vulnerabilidad del ambiente organizacional se caracteriza por concentrar el mayor número de indicadores (16, véase Cuadro 1.4). Cuatro componentes se reconocen en este ambiente: emergencias, ambiental, ciudadanía y capacidad organizacional. El 82% de los indicadores cuentan con información para el año 2017, lo que representa una fortaleza para la Ciudad de Playa del Carmen. La ausencia de datos en torno a la taza de médicos y bomberos por habitante, así como la ausencia de información sobre el desarrollo de sensibilidad, conciencia cultural ante los huracanes y comunicación del riesgo restan significado a la resiliencia en el ambiente organizacional.

Cuadro 1.1. Indicadores de vulnerabilidad del ambiente social y su monitoreo para el año 2017

VULNERABILIDAD DEL AMBIENTE SOCIAL Y CAPACIDAD ADAPTATIVA								
Componente	Indicadores	Descripción / Cálculo	Fuente	Escala	Indicador / Resultado			Monitoreo
					2000	2005	2010	2017
Población	1. Densidad de población	Número de habitantes / Km2	INEGI	AGEB/ Ciudad	4,580.87	6,040	3,752.92	Si cumple
	2. Población joven	% personas de 0 a 15 años de edad	INEGI	AGEB /Ciudad	26.12	19.44	21.68	Si cumple
	3. Población de 65 años y más	% de personas de 65 años y más	INEGI	AGEB /Ciudad	1.036	0.926	1.27	Si cumple
	4. Población indígena	% Personas de 3 años y más que hablan alguna lengua indígena	INEGI	AGEB /Ciudad	N.D.	11.09	10.90	Si cumple
	5. Población con limitación en la actividad	% Personas que tienen dificultad para el desempeño y/o realización de tareas en la vida cotidiana	INEGI	AGEB /Ciudad	0.88	N.D.	2.4	Si cumple
Migración	6. %Población con residencia de más de 5 años en la ciudad	% de Personas de 5 años y más que en los años 2005 y 2010 residían en la misma ciudad	INEGI	AGEB /Ciudad	51.82	45.81	58.98	Si cumple
Salud	7. Tasa de mortalidad infantil	Mortalidad infantil por 1000 habitantes	INEGI	AGEB /Ciudad	N.D.	N.D.	N.D.	No cumple
	8. Población derechohabientes a servicios de salud	% personas que tienen derecho a recibir servicios médicos en alguna institución de salud pública o privada: IMSS, ISSSTE, PEMEX, SEDENA, SEMAR, SP.	INEGI	AGEB /Ciudad	N.D.	N.D.	N.D.	No cumple
Educación	9. Población de 15 años y más analfabeta	% Personas de 15 a 130 años de edad que no saben leer ni escribir.	INEGI	AGEB /Ciudad	3.87	4.74	2.59	Si cumple

Cuadro 1.2. Indicadores de vulnerabilidad del ambiente económicoy su monitoreo para el año 2017

AMBIENTE ECONÓMICOY CAPACIDAD ADAPTATIVA								
Componente	Indicadores	Descripción / Cálculo	Fuente	Escala	Indicador / Resultado			Monitoreo
					2000	2005	2010	2017
Actividades económicas	10. Población Económicamente Activa	Total de Personas de 12 años y más que trabajaron; tenían trabajo pero no trabajaron o; buscaron trabajo en la semana de referencia	INEGI	AGEB /Ciudad	20,792	N.D.	76,602	Si cumple
	11. Actividades asalariadas complementarias	% de Segunda actividad complementaria a la actividad principal como actividades turísticas, agrícolas, de construcción, pesqueras, artesanales, apicultura, u otras.	Encuesta	AGEB /Ciudad	N.D.	N.D.	N.D.	No Cumple
Empleo	12. Hogares censales con jefatura femenina	% de Hogares en viviendas particulares habitadas donde el jefe es mujer	INEGI	AGEB /Ciudad	5.55	19.49	22.38	Si cumple
	13. Hogares censales con jefatura masculina	% Hogares en viviendas particulares habitadas donde el jefe es hombre	INEGI	AGEB /C ciudad	83.77	80.49	77.62	Si cumple
Ingreso	14. Gastos del hogar	% del recurso del hogar se destina a diversos gastos: renta o hipoteca, servicios básicos, alimentación, educación, transporte.	Encuesta	Ciudad	N.D.	N.D.	N.D.	No Cumple
	15. Salarios mínimos	% de ingreso total por actividad económica realizada en salarios mínimos	INEGI/ Encuesta	Ciudad	66.81	N.D.	N.D.	No Cumple

Cuadro 1.3. Indicadores de vulnerabilidad del ambiente construido y su monitoreo para el año 2017

AMBIENTE CONSTRUIDOY CAPACIDAD ADAPTATIVA								
Componente	Indicadores	Descripción / Cálculo	Fuente	Escala	Indicador / Resultado Monitoreo			
					2000	2005	2010	2017
Educación	16. Planteles afectados por fenómenos naturales evaluados, validados y/o verificados.	% de planteles educativos, federales y estatales, dañados por desastres que hayan sido evaluados, validados y/o verificados, con objeto de restituirles las condiciones de seguridad, habitabilidad y funcionamiento.	INIFED/ SEGOB	Ciudad	N.D.	56	N.D.	Si Cumple
Vivienda	17.Viviendas con estructura durable	% de ocupantes de viviendas consideradas durables,	INEGI, Observatorios Urbanos	AGEB /Ciudad	96.22	72.65	N.D.	Si Cumple
	18. Viviendas particulares habitadas sin servicios básicos	% de Viviendas particulares habitadas que carecen de luz eléctrica, agua entubada de la red pública y drenaje	INEGI	AGEB /Ciudad	2.23	3.2	1.4	Si cumple
	19. Hacinamiento	Promedio de ocupantes por cuarto en viviendas particulares habitadas	Observatorios Urbanos	AGEB /Ciudad	N.D.	17.8	N.D.	Si Cumple
	20.Vivienda asegurada	% Viviendas habitadas que cuentan con algún tipo de seguro	Encuesta	AGEB /Ciudad	N.D.	N.D.	N.D.	No Cumple
	21.Viviendas en riesgo	% de viviendas construidas en sitios de riesgos	INEGI, Atlas de riesgo	Ciudad	N.D.	N.D.	N.D.	No Cumple
Salud	22. Hospitales (públicos y privados)	Numero de hospitales por cada 10,000 habitantes	DENUE	Ciudad	N.D.	N.D.	0.59	Si cumple
	23. Camas de hospital	Número de camas hospital por cada 1000 habitantes	SESA	Ciudad	N.D.	N.D.	N.D.	No Cumple
	24.Ambulancias	Número de ambulancias por cada 100 habitantes	SESA/Cruz Roja	Ciudad	N.D.	N.D.	N.D.	No Cumple

Cuadro 1.4. Indicadores de vulnerabilidad del ambiente organizacional y su monitoreo para el año 2017

AMBIENTE ORGANIZACIONALY CAPACIDAD ADAPTATIVA						
Componente	Indicadores	Descripción / Cálculo	Fuente	Escala	Resultado	Monitoreo
					2017	2017
Emergencias	25.Médicos por cada 1000 habitantes	Número de Médicos por cada mil habitantes	SESA	Ciudad	N.D.	No Cumple
	26.Bomberospor cada 1000 habitantes	Bomberos por cada 1000 habitantes	Bomberos	Ciudad	0.32	Si Cumple
	27. Policías por cada 1000 habitantes	Número de policías por cada mil habitantes	SSP	Ciudad	4.048	Si Cumple
	28. Refugios anticiclónicos	Número total de infraestructuras que sirven de refugios	PC	Ciudad	43	Si Cumple
	29. Estaciones Meteorológicas	Número, localización y tipo de estaciones meteorológicas	CONAGUA, SMN, PC, Entrevista	Ciudad	1	Si Cumple
Ambiental	30. Cobertura de recolección de RSU	% de recolección en relación con los residuos generados	Servicios públicos municipales	Municipio/ Ciudad	85	Si Cumple
	31. Gestión de residuos sólidos (tiradero a cielo abierto, rellenos de tierra controlados y rellenos sanitarios	Técnicas para la gestión de RSU 1: Tiraderos a cielo abierto 2: Rellenos de tierra controlados 3: Relleno sanitario	Servicios públicos municipales, PDU, Entrevista	Municipio/ Ciudad	1, 3	Si Cumple
Ciudadanía	32. Residuos sólidos urbanos	Toneladas Generación en: ton/día	Servicios públicos municipales	Municipio/ Ciudad	70	Si Cumple
	33. Residuos sólidos per cápita	Producción de residuos por habitante (kg/hab/día)	Servicios públicos municipales,	Municipio/ Ciudad	3.78	Si Cumple
	34.Asociaciones de ciudadanos	Número de organizaciones sin fines lucrativos, incluyendo ONG, por cada 10,000 habitantes.	Observatorios Urbanos / Encuesta	Municipio/ Ciudad	0.7	Si Cumple
	35.Desarrollo de sensibilidad y conciencia cultural ante los huracanes	Número de trípticos o información distribuida entre la población sobre prevención de amenazas y riesgos	PC / Encuesta	AGEB/ Ciudad	N.D.	No cumple

Cuadro 1.4 Indicadores de vulnerabilidad del ambiente organizacional y su monitoreo para el año 2017 (Continuación)

Capacidad Institucional	36.Comunicación del riesgo	Número de talleres/cursos impartidos para la comunicación del riesgo a la sociedad civil y en escuelas	PC / Entrevista	AGEB/ Ciudad	N.D.	No cumple
	37. Rutas de evacuación establecidas por protección civil	Número de rutas de evacuación establecidas por protección civil	Entrevista	Ciudad	Si	Si Cumple
	38. Existencia de Atlas de Riesgo actualizado	Se cuenta con un AR actualizado?	Entrevista	Ciudad	Si Última actualización diciembre 2016	Si Cumple
	39. Medios de comunicación para alertar a la población	Se cuenta con un SAT-CT y qué tipos de medios de comunicación se utiliza para su difusión	Entrevista	Ciudad	Si TV, Radio, Prensa escrita y digital, mensajes escritos e internet	Si Cumple
	40. Base de datos de huracanes	Si (1)/No(0)	PC/ Entrevista	Ciudad	1	Si Cumple

Cuadro 1.5. Indicadores de vulnerabilidad del ambiente cultural y su monitoreo para el año 2017

AMBIENTE CULTURALY CAPACIDAD ADAPTATIVA								
Componente	Indicadores	Descripción / Cálculo	Fuente	Escala	Indicador / Resultado toreo			Moni-
					2000	2005	2010	2017
Prevención	41 .Sistemas de recolección de agua pluvial	Disposición de sistemas de recolección de agua pluvial (curvatos)	Encuesta	Ciudad	N.A.	N.A.	N.A.	N.D
	42. Conocimiento de ubicación de refugios	Conocimiento sobre la ubicación de refugios	Encuesta	Ciudad	N.A.	N.A.	N.A.	N.D
	43. Plan de Emergencia Familiar	Disponen de un Plan de Emergencia Familiar	Encuesta	Ciudad	N.A.	N.A.	N.A.	N.D
Percepción	44. Percepción de los SAT-CT	Comunicación de SAT-CT en medios públicos (TV, radio, medio impreso, redes sociales, mensajes de texto, internet)	Encuesta	Ciudad	N.A.	N.A.	N.A.	N.D
	45. Percepción del riesgo	Qué entienden por riesgo	Encuesta	Ciudad	N.A.	N.A.	N.A.	N.D
	46. Percepción de vulnerabilidad	Qué entienden por vulnerabilidad	Encuesta	Ciudad	N.A.	N.A.	N.A.	N.D
	47. Percepción de resiliencia	Qué entienden por resiliencia	Encuesta	Ciudad	N.A.	N.A.	N.A.	N.D
Religión	48.Tipo religión	% de personas según su religión	INEGI	AGEB	94.79%	N.D.	80.87%	Si cumple

Finalmente, el ambiente cultural se analiza desde tres componentes: prevención, percepción y religión, los cuales consideran ocho indicadores (Cuatro 5). Sólo existen datos para el indicador de religión. El ambiente cultural para la reducción de la vulnerabilidad y la capacidad adaptativa pone de manifiesto la baja resiliencia de la ciudad de Playa del Carmen.

1.8. Discusión

Se reconocen 31 indicadores cuantitativos y 17 listas de verificación. De los 48 indicadores. El 39 por ciento de los indicadores carece de datos, siendo preocupante en el ambiente social y el ambiente cultural. El tiempo de cohorte es el año 2000, sin embargo, se reconoce la ausencia de datos actualizados que permitan tener prospectivas y serie de datos confiables. Así, a través del análisis de los discursos expuestos por los gestores de la ciudad se tiene:

a) *Pertinencia*. La relevancia del sistema de indicadores de resiliencia urbana es significativa para la toma de decisiones estratégicas, incluyendo las metas y tendencias de desarrollo regional, sobre todo en el contexto de ciudades con altos índices de crecimiento por inmigración.
   "...para que seamos resilientes, no debemos pasar al desastre. Si no pues, no nos sirvió de nada; no estamos preparados y esa es la meta que hoy tenemos..."
   Director de protección civil municipal, Hombre, 17 años de residencia, 8 meses en el cargo.
   "*...la gente aquí en la zona tiene mucha capacitación en este tipo de cosas, toman mucho sus precauciones, se dan los avisos en la radio, en la televisión, tienen la cultura del huracán mucha gente la tiene bien presente, yo creo que los que no la tenemos presente, somos los que vamos llegando, los que tenemos poco de llegar al destino de otras ciudades que realmente no parecen por allí el tema de huracanes..."*Colegio de Ingenieros Civiles, Hombre, 14 años de residencia, 5 meses en el cargo.
   "... de hecho, a partir de que nos han golpeado dos huracanes en los últimos tiempos, la verdad es que también se ha afianzado la cultura para el caso de los

huracanes, para la prevención y que hacer en el antes, durante y después; sin embargo, por la dinámica de inmigración que tenemos, que viene mucha gente de otros lados, y que esta ciudad llegó a estar entre las principales ciudades de Latinoamérica y del mundo en cuanto a índice de crecimiento anual, pues obviamente tenemos de muchos lugares del mundo y de muchas partes de la cuidad, en donde muy difícilmente han vivido o han tenido conocimiento de la magnitud de los huracanes, entonces luchamos contra la información…" Director de protección civil municipal, Hombre, 17 años de residencia, 8 meses en el cargo.

"…Tasa de migración, cuanta población llega o cómo podríamos conocer mensualmente, estimar la población. Por ejemplo tenemos población como Villas del sol que en unos 20 años va crecer más, doblemente de lo que es el centro de Playa del Carmen, va ser la ciudad más grande…" Directora de ecología municipal, Mujer, 17 años de residencia, 8 meses en el cargo.

"…Una gran concentración de casas habitación y cuando originalmente se planeó la ciudad y se instaló el drenaje, el diámetro del drenaje fue planeado para un crecimiento x, y este crecimiento se volvió exponencial en el tiempo, no había manera de que alguien pudiera determinar lo que iba a suceder con esta explosión demográfica…" Regidor, Hombre, 32 años de residencia, 8 meses en el cargo.

b) *Comprensión*. El sistema de indicadores proporciona certeza en el acceso de manejo, credibilidad y confiabilidad para los usuarios de la información, por lo que es necesario tener los canales de difusión y consulta de datos transparentes y de acceso inmediato.

"...está esporádica; porque se ha ido perdiendo esa información al ir cambiando las administraciones, a veces no se ha dado el seguimiento correcto y esa base de datos está muy incompleta, si hay alguna información, el meteorólogo tiene parte, su servidor tiene otra parte, pero no está completamente llena esa base de datos…" Director Técnico de Protección Civil, Hombre, 23 años de residencia, 14 años en el cargo.

"… precisamente estas comunidades mayas en algunas ocasiones se encuentran en sitios que no necesariamente tenemos ya una carretera definida, ni como carretera federal ni como carretera estatal, pero que si tienen caminos de accesos y que deben ser tomados en cuenta, sobre todo en el momento de la elaboración de un atlas de riesgo, porque seguramente van a ser caminos que van a repre-

sentar una problemática especial al paso del huracán…" Regidor, Hombre, 32 años de residencia, 8 meses en el cargo.

c) *Fuente de datos*. El análisis de la información y la existencia de valores e índices es una preocupación general. Se ha señalado que solo existe el 61 por ciento de información para solventar los indicadores, donde los valores e índices se pueden replicar. La necesidad de los datos se expone en los temas emergentes de la agenda local:

*"…en el tema de residuos 24, 960 casas todavía en octubre, por 4 personas de acuerdo al índice del estado era 3.7 personas por casa…nos da un total de 99 840 personas, si estuvieran cubiertas al 100%, por 1.5 kilos que generaban, estamos haciendo un total de 180 toneladas de residuos diarios...entonces si sería importante saber la cantidad de personas que entran y que salen…"*Directora de ecología municipal, Mujer, 17 años de residencia, 8 meses en el cargo.

*"…No hay lecciones aprendidas (solidaridad), cometimos el error de Playacar la zona costera, estaba llena de espigones y después vino la gran recuperación del huracán – que no fue integrada- y ahora volvimos a hacer los mismo en la zona norte, todas las instalaciones de la Riviera Maya los ves con muelles ciegos, con elefantes marinos, con muros de contención, con plantas inadecuadas, no hay lecciones aprendidas de lo que sucedió con Wilma, porque si ya vivimos esto porque lo repiten…"*Representante de ONG, Mujer, 17 años de residencia y experiencia.

"… problemas de riesgos sociales. Por ejemplo tenemos un crecimiento de desarrollo muy grande, pero con unas casitas de 2x 2mts…con ciudadanos que generan contaminación de mantos freáticos, con todo lo que tiene que ver con los terrenos irregulares, donde tenemos problemas de descargas de aguas negras a los mantos freáticos…" Directora de ecología municipal, Mujer, 17 años de residencia, 8 meses en el cargo.

d) *Comparabilidad* El sistema de indicadores según su escala y análisis local, regional, nacional e internacional debe de contar con definiciones claras, procesos de medición, señalar la fuente de datos y el cohorte. El sistema de indicadores cuanta con los elementos de control de la información que permite esta comparabilidad.

e) *Capacidad predictiva*. El sistema de indicadores advierte de problemas, riesgos y cambios significativos. Para la gestión del riesgo y aumentar la

resiliencia de la ciudad de Playa del Carmen, los entrevistados reconocen los siguientes escenarios:

*"...la construcción ha estado llegado a lugares donde no debimos haber llegado, hemos estado afectando manglares y entre el paso del tiempo se ha ido rellenando, entonces a la vuelta de dos años lo que antes era un manglar a hora es una calle y ya después de esa calle se ha ido rellenando más el terreno, entonces hemos tenido donde antes había manglar ahorita es relleno... estamos en una zona donde era manglar antes, entonces eso tarde o temprano va a volver a inundarse y así hay muchas áreas, hay muchos vados, hay lugares que antes eran cenotes, se van a ir recuperando poco a poco. El agua solita agarra su nivel..."*Colegio de Ingenieros Civiles, Hombre, 14 años de residencia, 5 meses en el cargo.

*"...20% del padrón ya oficial de habitantes son extranjeros nacionalizados, además tenemos el problema que más de cien mil son flotantes, no sabemos quiénes son ni dónde están, pero están aquí en Playa del Carmen..."*Director de protección civil municipal, Hombre, 17 años de residencia, 8 meses en el cargo.

"...*a esto se suma la falta de infraestructura de drenaje pluvial, tenemos un problema que el drenaje sanitario es el único sistema de captación de agua.....*" Regidor, Hombre, 32 años de residencia, 8 meses en el cargo.

"...*apenas en este periodo le hemos estamos dando una transformación a protección civil, tanto como autoridad y que vean nuestro trabajo. Porque, ¿sabes cómo nos veían a protección civil? como los talacheros del gobierno..."* Director de protección civil municipal, Hombre, 17 años de residencia, 8 meses en el cargo.

1.9. Conclusiones

La función de los indicadores de resiliencia tiene por fin visualizar los objetivos y metas a futuro, permitir análisis comparativos en el tiempo y el espacio, proporcionar información relevante para la toma de decisiones y anticipar situaciones de riesgo o conflicto.

A través de la operacionalización de conceptos como sistemas socioecológicos, vulnerabilidad, capacidad adaptativa, amenaza, riesgo y resiliencia, se presenta un sistema

de indicadores de resiliencia urbano costera ante huracanes, el cual se constituye de 48 indicadores, con una cohorte del año 2000 – 2017 y que es posible monitorear en un 60 por ciento.

Los componentes de educación, vivienda y salud caracterizan el ambiente construido preocupa la falta de información en el tema de salud, pero sobre todo que no existen datos sobre las viviendas asentadas en sitios de riesgo y de aquellas que carecen de un seguro contra daños.

Se reconoce, la ausencia de temas de la gestión urbana ante desastres que el modelo de indicadores de resiliencia no considera: tasa de inmigración, crecimiento de los asentamientos irregulares, ausencia de datos confiables y actualizados, así como el tiempo de residencia de la población y de los gestores.

1.10. Agradecimiento:

Los resultados de este escrito se desprenden de los proyectos "Indicadores de resiliencia urbano costera para tres ciudades en el Caribe Mexicano", CONACYT – Problemas Nacionales 2014: 248375; e Indicadores de desarrollo sustentable en asentamientos irregulares del Caribe -DAAD – RISE – UQROO.

1.11. Referencias

Arroyo. L., López. A., Segrado, P., Serrano, R. y Frausto, O. (2015) Diferencias socio-territoriales en Tulum: una ciudad organizada a partir del turismo masivo de litoral, Cultur, Año 9 vol. (2), pp 4-28. ISSN. 1982.5838. Publicación junio CULTUR - REVISTA DE CULTURA Y TURISMO. http://www.uesc.br/revistas/culturaeturismo/

Berkes, F., and C. Folke (editors). (1998). Linking sociological and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience. Cambridge University Press, New York, New York, USA

Birkmann, J. (2006). Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies. United Nations University Press, Hong Kong. http://archive.unu.edu/unupress/sample-chapters/1135-MeasuringVulnerabilityToNaturalHazards.pdf

Birkmann, J., & Frausto, O. (2001). Indicators for Sustainable Development for the Regional and Local Level: Objectives, Opportunities and problems: Case Studies from Germany and Mexico. Regional Development, 9.

Carpenter, S., Walker, B., Anderies, J. M., & Abel, N. (2001). From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? Ecosystems, 4(8), 765–781. https://doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9

Castillo, V. L., & Velázquez, T., D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socio- ecológicos y resiliencia. Quivera, 17 (2), 11-32.

Cutter, S., Burton, C. & Emrich, C. (2010). Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. Journal of Homeland Security and Emergency Management. Volume 7, Issue 1, ISSN (Online) 1547-7355, DOI: 10.2202/1547-7355.1732

Dakos V, Carpenter SR, van Nes EH, Scheffer M. (2015). Resilience indicators:prospects and limitations for early warnings ofregime shifts. Phil. Trans. R. Soc. B 370:20130263.

Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses Global Environmental Change 16, 253–267. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002

Frausto – Martínez, O. (2013). Sustainable indicators applied in tourism destinations on Mexico´s Caribbean Coast. In: Alvarado – Herrera, A. & Gonzalez – Damian, A. Sustainable Tourism Management and case studies. University of Quintana Roo, México. 107 – 120.

Frausto, O. y M. Welch (2010 a) "Monitoreo y control de los indicadores de la Agenda Hábitat a través de Observatorios Urbanos de México", en: Capel, H., P. Ciccolella y E. Quinn, La planificación territorial y el urbanismo desde el diálogo y la participación, Actas del XI Coloquio Internacional de Geocrítica, 2-7 de mayo de 2010, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

Frausto, O., Vázquez, A., Arroyo, L., Castillo, L. & Hernández, A. (2016). Hurricane resilience indicators in Mexican Caribbean Coastal Cities. International Journal of Safety and Security Engineering, Volume 6, Issue 4, 755 – 763. DOI 10.2495/SAFE-V6-N4-755-763

Frazier, T. G., Thompson, C. M., Dezzani, R. J., &Butsick, D. (2013). Spatial and temporal quantification of resilience at the community scale. Applied Geography, 42, 95–107. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.05.004

Gobierno del Estado de Quintana Roo (2016). Plan Quintana Roo 2011 – 2016. Gobierno del Estado de Quintana Roo. SEFIPLAN. http://www.sefiplan.qroo.gob.mx/coplade/su-

bidos/1450281127_Revitalizacion_Plan_QRoo_20112016_final_logo_institucional.pdf ,

H. Ayuntamiento de Solidaridad 2016-2018 (2016) "Plan Municipal de Desarrollo, Solidaridad 2016-2018). H. Ayuntamiento de Solidaridad, recuperado (16/08/2017) en: http://municipiodesolidaridad.com/wp-content/uploads/2017/03/pmd.pdf

Henao, A. (2013). Propuesta metodológica de medición de la resiliencia agroecológica en sistemas socio-ecológicos: un estudio de caso en los andes colombianos. Revista de Agroecología, 8(1), 85-91.

Hernández, M. (2014). "Evaluación del riesgo y vulnerabilidad ante la amenaza de huracanes en zonas costeras de caribe mexicano: Chetumal y Mahahual". Tesis Doctoral. Universidad de Quintana Roo. México.

Holling C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. Annu Rev Ecol Syst 4:1–23.

Holling, C. (2001). Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. Ecosystems (2001) 4: 390. https://doi.org/10.1007/s10021-001-0101-5

Holling, C. S. (1992). Cross-scale morphology geometry and dynamics of ecosystems. Ecological Monographs 62, 447–502.

INEGI (1990), XI Censo General de Población y Vivienda 1990, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INEGI, (2000). Cartografía Geoestadística Urbana-Datos Vectoriales. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx

INEGI (2000), XII Censo General de Población y Vivienda, 2000, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.

INEGI, (2005). Cartografía Geoestadística Urbana-Datos Vectoriales. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx

INEGI, (2010). Cartografía Geoestadística Urbana-Datos Vectoriales. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx

INEGI (2010), Censo de Población y Vivienda, 2010, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México. http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx.

INEGI, (2016). Cartografía Geoestadística Urbana-Datos Vectoriales. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/m_geoestadistico.aspx

Jovanovic, A. *et. al.* (2016). Analysis of existing assessment resilience approaches, indicators and data sources: Usability and limitations of existing indicators for assessing, pre-

dicting and monitoring critical infrastructure resilience, Deliverable D1.2 of the SmartResileince project, http://www.smartresilience.eu-vri.eu/

Magis, K. (2010): Community Resilience: An Indicator of Social Sustainability, Society & Natural Resources: An International Journal, 23:5, 401-416

NHC (2016). Data base. National Oceanic an d Atmospheric Administration. Disponible en: https://www.nhc.noaa.gov/data/

Pelling, M., and D. Manuel-Navarrete. 2011. From resilience to transformation: the adaptive cycle in two Mexican urban centers. Ecology and Society 16(2): 11. [online] URL: http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss2/art11/

Resilience Alliance. (2010). Assessing Resilience in Social-Ecological Systems: Workbook for Practitioners. Retrieved 04 29, 2016 from Resilience Alliance: http://www.resalliance.org/3871.php

Sánchez R., R., T. Cavazos y A. E. Morales S. (2015). Plan estratégico nacional para la prevención y la reducción del riesgo a desastres asociados a eventos hidrometeorológicos y climáticos en México. En T. Cavazos (Ed.), Conviviendo con la Naturaleza: El Problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México. REDESClim, México, Ediciones ILCSA, pp.121-143.

SEDETUR. Secretaria de Turismo Estatal de Quintana Roo (2015), Indicadores turísticos, [en línea], Portal de la secretaria de turismo del estado de Quintana Roo, [consulta 17 de agosto, 2016], Disponible en: http://sedetur.qroo.gob.mx/

SEDETUR. Secretaria de Turismo Estatal de Quintana Roo (2016), Indicadores turísticos, [en línea], Portal de la secretaria de turismo del estado de Quintana Roo, [consulta 17 de agosto, 2015], Disponible en: http://sedetur.qroo.gob.mx/

SEGOB (2005). Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2005. Secretaria de Gobernación, CEBAPRED. Serie 7. Impacto socioeconómico de los desastres en México. [en línea], Portal Protección civil, México.[Consulta 5 de octubre, 2017]. Disponible en: http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/375/1/images/7.pdf

SEGOB (2016). Guia de resiliencia urbana. Secretaria de Gobernación, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/179708/Guia_de_Resiliencia_Urbana_2016.pdf

UNDRO (1980). Natural disasters and vulnerability analysis: report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979). UNDRO- https://archive.org/details/naturaldisasters00offi

Walker, B., S. Carpenter, J. Anderies, N. Abel, G. S. Cumming, M. Janssen, L. Lebel, J. Norberg, G. D. Peterson, and R. Pritchard. 2002. Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. Conservation Ecology 6(1): 14. [online] URL: http://www.consecol.org/vol6/iss1/art14/

Wong, C. (2006). Indicators for urban and regional planning: the interplay of policy and methods. Routledge. London. 219 p.

ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL Y PERSPECTIVAS DE TORNADOS EN MÉXICO

2

Análisis espacio temporal y perspectivas de tornados en México

José Francisco León-Cruz[1]*; Noel Carbajal[2]*; Luis Felipe Pineda-Martínez[3]

Resumen

Los tornados son la manifestación más violenta del tiempo severo. En México decenas de eventos son documentados cada año, causando daños materiales y pérdidas humanas. Dada la importancia de este tipo de fenómenos, se crea una base de datos que establece patrones espacio temporales en la ocurrencia de estos fenómenos. Además, se analizan las condiciones sinópticas bajo las cuales se han detectado la formación de tornados, identificando tres patrones principales. El estudio de estos fenómenos se encuentra en una fase temprana, y muchos de los elementos necesarios para su formación no son conocidos. Las características de dinámica atmosférica y los impactos sociales que estos causan son expuestos como elementos del riesgo, analizando la exposición y la amenaza que los tornados representan para la sociedad mexicana. Los resultados muestran una perspectiva general de la problemática y exponen las representaciones que se generan sobre esta temática en el país.

Palabras clave

Tornados, desastres, distribución espacio temporal, análisis sinóptico.

1 E-mail: jose.leon@ipicyt.edu.mx. ORCID: 0000-0002-0374-6858
2 E-mail: noelc@ipicyt.edu.mx. ORCID: 0000-0002-3112-8504
3 E-mail: luisfpm23@gmail.com. Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), Universidad 108, Col. Progreso, C.P. 98066, Zacatecas, Zac., México. ORCID: 0000-0002-0803-5625
* División de Geociencias Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT), Camino a la Presa San José 2055, Col. Lomas 4ta Sección, C.P. 78216, San Luis Potosí, S.L.P., México.

2.1. Introducción

Las tormentas severas y los eventos de lluvia extrema representan un peligro en la población, sobre todo en aquellos sitios que están altamente expuestos a sus efectos. Las tormentas extremas pueden traer consigo gran cantidad de lluvia, pero también tener otros efectos importantes como ráfagas de viento, caída de granizo, y algunas ocasiones la formación de tornados. Estos últimos representan un gran potencial de amenaza debido a los fuertes vientos asociados. Un tornado se define como una columna de aire rotando, en contacto con la superficie, colgante de una nube cumuliforme, y a menudo, pero no siempre, visible como una nube embudo y/o escombros/polvo en circulación sobre el suelo (AMS, 2017). Si la circulación asociada (vórtice) con el embudo de condensación no llega a tocar la tierra, entonces se habla de una nube embudo (Davies-Jones, Trapp y Bluestein, 2001). A pesar de su corto tiempo de vida; su rápido desarrollo y mínima capacidad de predicción los convierten en fenómenos naturales potencialmente desastrosos. El tiempo de vida de un tornado puede variar desde unos pocos segundos hasta más de una hora, siendo 10 minutos el tiempo promedio. Su diámetro oscila alrededor de 200 m, pero se han documentado vórtices desde 10 m hasta 5 km. La velocidad del viento en un tornado varía entre 20 m s^{-1} hasta 142 m s^{-1}, y su velocidad de traslación promedio es 20 m s^{-1}, elemento importante para su capacidad destructiva (Bluestein, 2013).

Estados Unidos (EE. UU.) es el país donde se reportan más tornados a nivel mundial, siendo ~1000 eventos por año (NCDC, 2017), no obstante, estos se han observado en todos los continentes, exceptuando la Antártida (Goliger y Milford, 1998). Países como China, Bangladesh, Finlandia, España, Grecia, Colombia y recientemente México, cuentan con casos bien documentados (Gayà, 2011; Ortiz-Royero y Rosales, 2012; Rauhala, Brooks y Schultz, 2012; Matsangouras, Pytharoulis y Nastos, 2014; Yao et al., 2015; Bikos, Finch y Case, 2016; León-Cruz, Carbajal y Pineda-Martínez, 2017).

La convergencia de una masa de aire frío y relativamente seco con una más caliente y húmeda es determinante para la formación de superceldas y la posibilidad de tornadogénesis (Markowski y Richardson, 2009). Esta interacción se da con mayor fuerza en límite delantero de un sistema frontal y provoca la fuerte cizalladura del viento en niveles

bajos y medios, elemento que es considerado como esencial para el desarrollo de la rotación del sistema de tormenta (lo que comúnmente se conoce como mesociclón). Si bien las condiciones para la génesis de tornados son predominantes en la región del Tornado Alley (en las planicies en los EE. UU.), existen otras zonas del mundo donde dicha convergencia también existe: la zona limítrofe entre Argentina y Brasil, el oeste de China, Bangladesh y la región oriental de Europa por ejemplo (Brooks, Lee y Craven, 2003).

Dada la complejidad en la formación de un tornado, es evidente que no son todos iguales y una clasificación exacta de estos no es simple (Doswell y Burgess, 1993). Sin embargo, a grandes rasgos pueden ser catalogados en dos grupos: los que están asociados a un mesociclón (tipo I) y los que no lo están (tipo II) (Davies-Jones, Trapp y Bluestein, 2001). Esta categorización se ha reformado con los años, puesto que la definición de tornado también ha evolucionado, ampliando el espectro de análisis a otro tipo de vórtices.

Para el caso de tornados tipo I, se tienen con elementos clave: una fuerte corriente ascendente local que se extiende verticalmente a través de un campo de viento con alta vorticidad horizontal, de igual forma, la formación de una corriente descendente en el flanco trasero de la tormenta, misma que produce vorticidad vertical a la capa límite. La interacción de estas dos corrientes (ascendente y descendente) produce la inclinación de la vorticidad horizontal y el estiramiento de la vertical, creando así el ambiente perfecto para la formación de tornados (Agee y Jones, 2009). Los tornados más violentos son de este tipo, resultan relativamente fáciles de identificar en radares meteorológicos y se desarrollan en la fase madura de la tormenta.

Por otro lado, los tornados tipo II o no supercelulares, se caracterizan por ocurrir en la etapa inicial de la tormenta, y están asociados a circulación con un diámetro menor a los 4 km. Estos se han observado principalmente en zonas de límite (o regiones de convergencia de flujos) a nivel de superficie. Se caracterizan por un rápido incremento en la reflectividad (observable en el radar meteorológico), un menor tiempo de duración, una clasificación en la escala Fujita Mejorada de EF0 - EF2 o muy raramente EF3, y nubes cumulonimbos o cumulus congestus asociadas (Wakimoto y Wilson, 1989). Los dos ejemplos más comunes son los landspouts (tornado no supercelda sobre tierra) y los waterspouts (tornado sobre algún cuerpo de agua: lago, laguna, mar, presa, etcétera.

Comúnmente llamados trombas marinas). Es importante mencionar que gran parte de los tornados documentados en México corresponden a tornados tipo II.

Como dato interesante, los nombres con los que comúnmente se han denominado estos fenómenos, tanto en prensa como en comunidades alrededor del país son muy variados: tromba, culebra, culebra de agua, punta de tornado, feeder, mini tornado, torbellino, tolvanera, cola, cola de agua, cola de nube, cola de tornado, serpiente y serpiente de agua son algunos de los que se han logrado documentar. Esto es importante, dado que, si bien técnicamente son tornados supercelda o no supercelda, la utilización de sinónimos como los antes mencionados dificulta su rastreo y reconocimiento.

Si bien es cierto que se conocen las bases principales para la formación de los tornados tipo I, y un poco sobre los tornados tipo II, la mayor parte de las investigaciones se ha enfocado a su desarrollo sobre superficies con orografía simple, donde las variables meteorológicas no se encuentran con forzantes ajenos. Lo interesante en este sentido es que, México, es un país muy diverso en su configuración orográfica, y las altiplanicies, cadenas montañosas, valles, planicies costeras, etcétera; hacen aún más complicado el entendimiento del desarrollo de estos fenómenos.

Es en este marco general que se establecen como objetivos de la presente investigación: (1) analizar la distribución espacio temporal de tornados y trombas marinas en México, tomando como referencia la literatura existente y los propios datos generados a partir de 2013; (2) describir los ambientes sinópticos sobre los cuales se han observado estos fenómenos en el país; y (3) establecer la relación entre estos fenómenos naturales y la generación de situaciones de riesgo. Cada uno de estos objetivos se atacan en las tres distintas secciones que se desarrollan a continuación.

2.2. Los tornados en México

Antecedentes

En México se han documentado tornados desde la época de la conquista (Velasco Fuentes, 2010). Las primeras investigaciones se enfocaron en su identificación y reco-

nocimiento, dada su poca diferenciación con otras manifestaciones del tiempo severo (Macías, 2001). Recientemente se realizó la primera climatología de tornados en México, en un esfuerzo inicial para identificar patrones espaciales de estos fenómenos (Macías y Avendaño, 2014). Aspectos como la vulnerabilidad social (Macías, 2016) y las representaciones sociales (Toscana Aparicio y Valdés Pérez, 2014) también han sido retomadas en la literatura. Adicionalmente, se ha descrito su meteorología asociada (León-Cruz, Carbajal y Pineda-Martínez, 2017).

Los daños que generan los tornados en México son importantes. El evento de Piedras Negras en 2007, causó un alto impacto social y originó que se incluyera a estos fenómenos en el fascículo de tormentas severas del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) (Prieto González *et al.*, 2010). Existe también el caso ampliamente documentado de Ciudad Acuña en 2015; fenómeno causante de la mayor cantidad de decesos por tornado en México. No obstante, decenas de eventos son reportados cada año, representando pérdidas importantes para las poblaciones donde ocurren.

Materiales y métodos

Actualmente no existe una base de datos oficial sobre tormentas severas y tornados en México. A raíz de ello, en 2013 se comienza un trabajo de recopilación de datos propios, esto como un esfuerzo más de realizar un registro metódico de estos fenómenos, así como de material audiovisual que sustente su ocurrencia.

La fuente de datos es variable; información periodística en formato físico y digital, redes sociales, contacto directo con testigos oculares y reportes oficiales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) son los principales. Una vez obtenidos la mayor cantidad de datos de cada reporte de tornado (fecha, hora, lugar, daños, descripción, etcétera) son validados a partir de imágenes satelitales o, de estar disponibles, imágenes de radar meteorológico. Pasando por el filtro de calidad, estos son clasificados como reportes confirmados, posibles y probables, dependiendo de las evidencias recolectadas. Finalmente, los reportes son vaciados a una base de datos de actualización mensual. Estos datos se utilizan a fin de crear cartografía y estadísticos que ayuden a la comprensión del comportamiento espacio temporal de los tornados en México.

Con base en los registros ya mencionados, y teniendo como referencia final el año 2017, además de la climatología existente (Macías y Avendaño, 2014), se expone aquí su actualización más reciente. Es importante mencionar que de aquí en adelante los tornados sobre tierra (sean supercelda o no superlceda) son definen como tornados, por otro lado, los eventos sobre cualquier cuerpo de agua son descritos como trombas marinas.

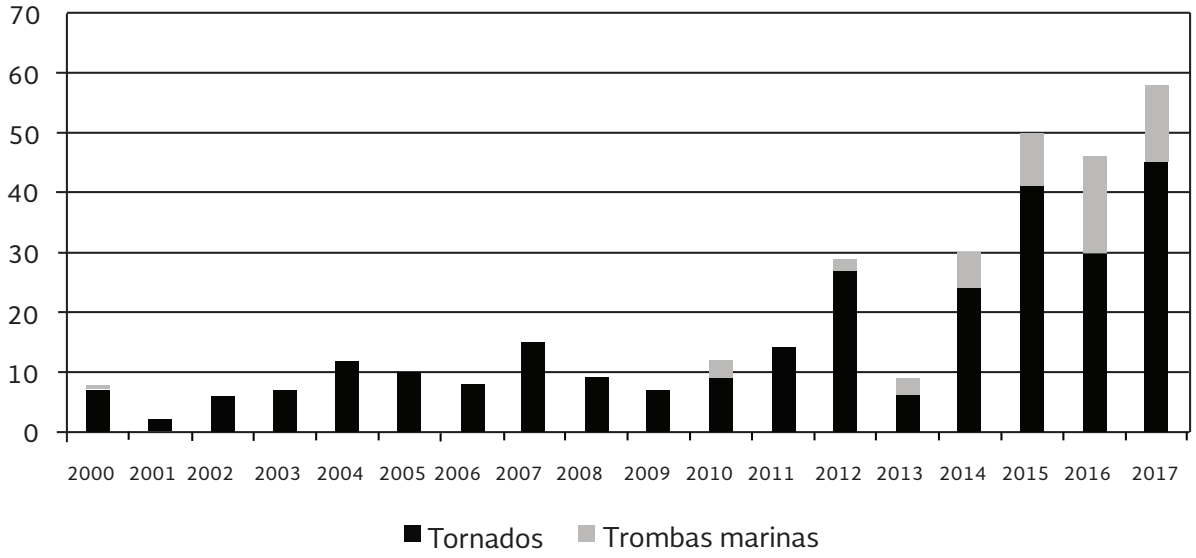
2.3. Resultados

Distribución temporal

Los reportes iniciales detallados por Macías y Avendaño (2014) (un total de 126 registros) señalan un promedio de 10 eventos por año, con una tendencia de incremento y teniendo como máximo la cuantificación de 25 reportes en un ciclo anual. La presencia de trombas marinas es mínima, dominando los eventos observados en tierra. El año 2013 marca el inicio de la base de datos propia y un bajo importante en el número de registros, misma que se atribuye a su tardía búsqueda y la dificultad para la localización de información confiable (Gráfica 2.1). Es a partir de 2014 cuando se observa un incremento importante de reportes, siendo para el 2014 (30), 2015 (50), 2016 (46) y 2017 (58), promediando 46 eventos por año y cuadruplicando a los datos publicados.

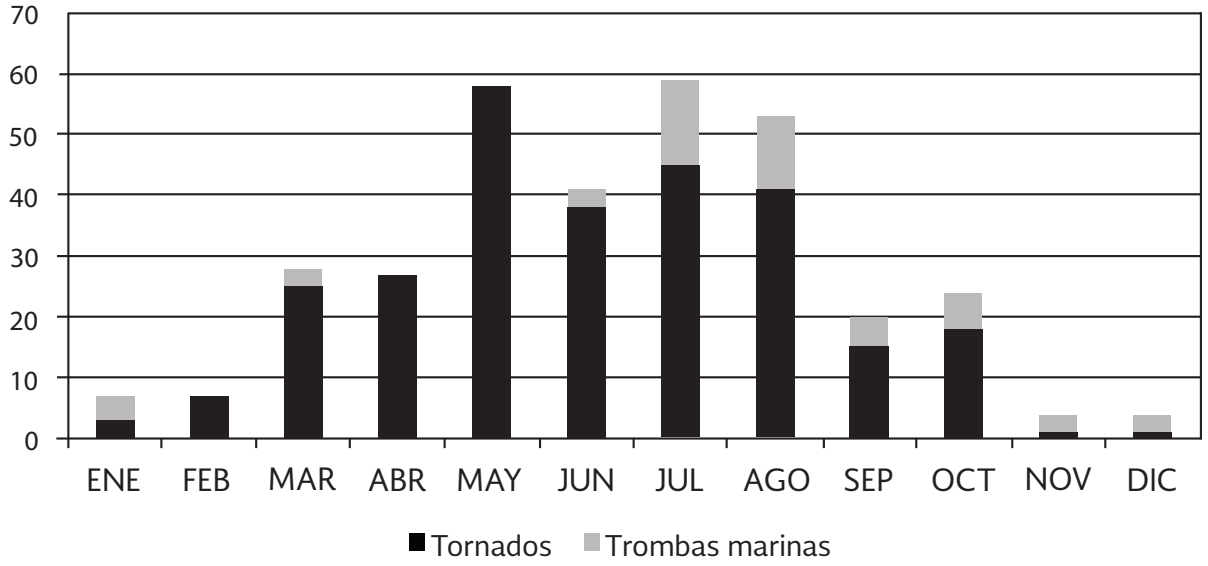
Este incremento repentino no puede ser atribuido al aumento del número de fenómenos, sino, al mayor acceso a la información y al mejoramiento en las técnicas de rastreo y registro de estos. Otro aspecto interesante, es una aparente estabilización en el número de reportes de tornados en los últimos años de registro, además, el incremento gradual en la documentación de trombas marinas, logrando alcanzar un máximo de 16 eventos en 2016. Eso resulta importante, puesto que algunos de los fenómenos observados sobre lagunas/lagos o el mar han logrado llegar a tierra causando pérdidas materiales importantes, tal es el caso del evento en Mazunte, Oaxaca en 2015.

Los reportes tienen un pico máximo de incidencia durante el mes de mayo y un segundo máximo en julio. La distribución de actividad tornádica indica que la tem-



Gráfica 2.1. Distribución anual de tornados y trombas marinas para el periodo de 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.

porada se extiende de mayo a agosto con un total de 63.5% de los reportes (Gráfica 2.2). En términos absolutos muestra un ligero retraso en su inicio, comparado con la actividad en EE. UU. Por otro lado, es interesante observar como la documentación de trombas marinas tiene su máximo entre julio y octubre, comportamiento que es atribuido a la relación entre éstas y la actividad ciclónica, así como de ondas tropicales. Para los meses de noviembre a febrero la actividad registrada es baja, reportando sólo 22 eventos en 18 años. Es importante notar que, si bien se tienen definidas épocas activas, inactivas y de transición, se han podido documentar tornados en todos los meses del año.



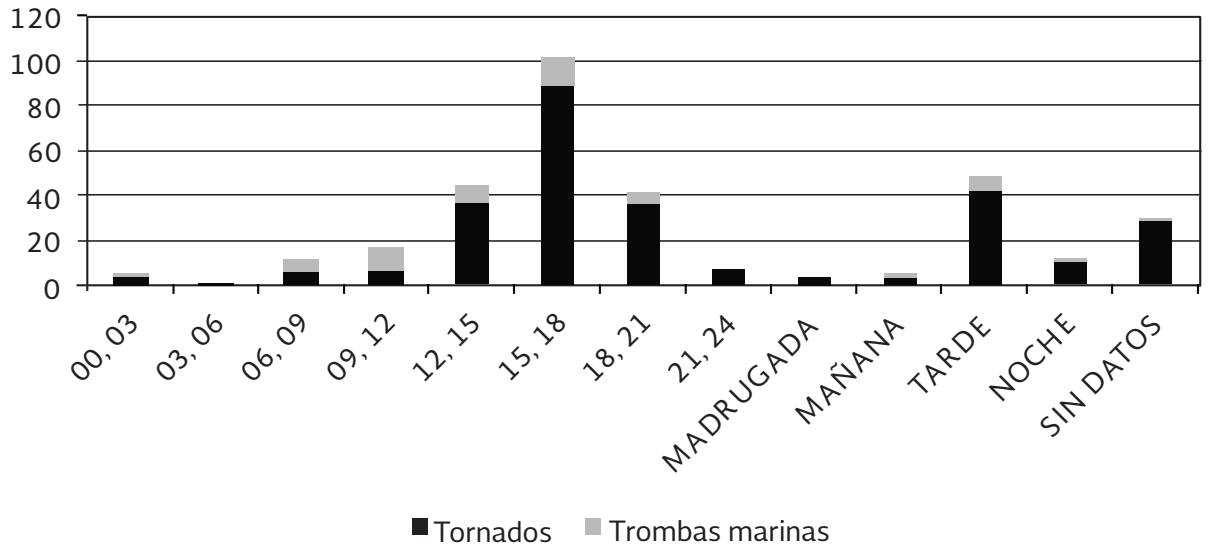
Gráfica 2.2. Distribución mensual de tornados y trombas marinas para el periodo 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.

En los que respecta a la distribución horaria, el 45.6% de los eventos registrados ocurrieron en horarios vespertinos entre 12:00 - 18:00 horas (Gráfica 2.3). Esto se atribuye a una mayor inestabilidad de la capa límite, facilitando la formación de tormentas. Aunque es importante notar que la falta de registros en horarios nocturnos podría estar asociado a menor capacidad de observación y, por ende, menor cantidad de reportes gráficos, esto no indica la ausencia de eventos. La formación de tornados nocturnos es posible y existe una mayor vulnerabilidad, teniendo alto potencial de riesgo en comparación con los que ocurren en horas del día (Ashley, Krmenec y Schwantes, 2008). Un aspecto a resaltar es la poca diferenciación horaria en el registro de trombas marinas, siendo comunes prácticamente todo el día.

Distribución espacial

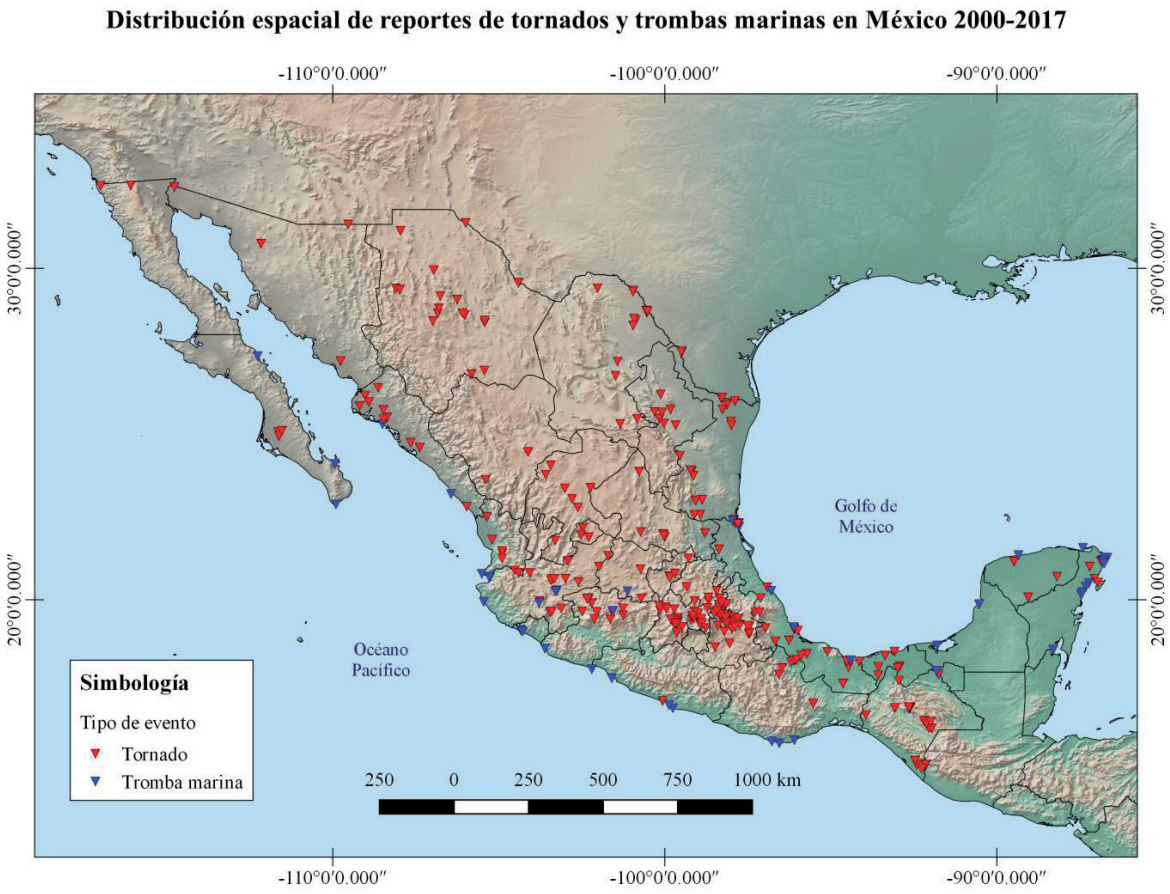
Se han registrado tornados en todo el territorio nacional, exceptuando la falta de registros en Morelos, aunque esto no indica que no hayan ocurrido. Los cinco estados con mayor número de reportes son: Estado de México, Chiapas, Veracruz, Tamaulipas y Chihuahua. Se distinguen también zonas interesantes como: la Península de Yucatán, la región Noreste, la costa del Pacífico, los Altos de Chiapas, las planicies costeras

del Pacífico Norte y el Golfo de México, y el Faja Volcánica Transmexicana (FVTM)) (Gráfica 2.4).



Gráfica 2.3. Distribución horaria de tornados y trombas marinas para el periodo 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.

En lo que respecta a la Península de Yucatán y los estados costeros del centro-sur del Pacífico, se puede ver una clara tendencia a la ocurrencia de trombas marinas. Por su posición geográfica, estas regiones son vulnerables al paso de ciclones tropicales y masas de aire cálidas y húmedas arrastradas por ondas tropicales, mismas que se han asociado como principales detonadores de la actividad tornádica. Cancún es un ejemplo interesante, donde en los últimos tiempos al menos un fenómeno es documentado en esta zona cada año. Si bien las condiciones orográficas en la Península de Yucatán propician la formación de tormentas severas como superceldas, muchos de estos tornados no han sido asociados a las mismas. La región centro del Pacífico tiene una situación contrastante en cuanto a la configuración orográfica se refiere, puesto que existen barreras naturales muy cercanas a la costa, no obstante, la formación de sistemas convectivos de mesoescala también ha sido documentada en la región (Valdés Manzanilla, Cortéz Vázquez y Pastrana Francisco, 2005). Si bien no se ha determinado una relación directa entre estos y la formación de tornados, es importante notar que el tiempo severo es posible y común en la región.



Gráfica 2.4. Distribución espacial de reportes de tornados y trombas marinas para el periodo 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.

En la región noreste del país se han registrado al menos dos casos de tornados tipo supercelda. En esta región se presentan tormentas severas y tornados debido a la interacción de sistemas frontales con flujos de humedad del Golfo de México (León-Cruz, Carbajal y Pineda-Martínez, 2017). En este sentido se puede considerar como una extensión al sur de la zona activa de tornados en EE. UU. También es importante señalar que en esta región es donde los tornados más destructivos han impactado. Otro aspecto interesante es que especialmente en esta zona se cuenta con información de radares meteorológicos (pertenecientes a EE. UU.) y el monitoreo de las diversas manifestaciones del tiempo severo es posible.

En las regiones adyacentes a la Sierra Madre Oriental (SMOr) y Occidental (SMOc), los reportes están concentrados sobre las planicies costeras: al este de la SMOr y al oeste de la SMOc, donde las altitudes varían desde el nivel del mar a unos cuantos cientos de metros de elevación. Sinaloa es un caso representativo, donde la región norte del estado es la más activa en todo el noroeste de México y gran parte de estos eventos se han documentado sobre las regiones agrícolas, cumpliendo con la relación entre éstas y los tornados (NCDC, 2017).

El mayor número de registros se localiza a lo largo del ENT. Esto se puede asociar a una mayor densidad poblacional, aunque investigaciones recientes han sugerido que ésta barrera natural funciona como un primer obstáculo perpendicular a la distribución de sistemas frontales (Carbajal *et. al.,* 2018). La lenta filtración de aire denso y frío a través de las montañas y valles de la región, en convergencia con flujos de humedad aportados por los océanos, dan como resultado condiciones de inestabilidad que favorecen la formación de tormentas severas y ocasionalmente tornados. La complejidad orográfica de la zona, además de la interacción de sistemas locales como flujos de montaña-valle y valle-montaña, y canalización del viento, hacen más difícil su análisis. Es interesante notar que todos los tornados documentados, se han presentado en regiones de valle entre uno o dos sistemas de montañas. Además de una clara concentración en los estados del centro y en elevaciones por encima de los 2000 metros sobre el nivel del mar.

Es así que se puede observar a una clara distribución de formación de tornados en México. No obstante, aún existen zonas poco estudiadas y de menor concentración poblacional, donde estos fenómenos se observan comúnmente: la región de altiplanicies de Zacatecas y San Luis Potosí, la parte central de Chihuahua y los Altos de Chiapas son algunos ejemplos. Así pues, la distribución espacial también puede ser una representación en función de la densidad de población y acceso a medios digitales.

Análisis de escala sinóptica

Contando con una fuente de información primaria con la base de datos ya mencionada, se han realizado estudios de caso y análisis temporales de ocurrencia de tornados en

el país. Partiendo de la idea de un escalamiento de la investigación de lo general a lo particular, el análisis sinóptico se vuelve el primer paso a realizar. Así pues, se efectuó un análisis de cartas meteorológicas para el ciclo anual 2016. Si bien los resultados solo representan las condiciones del año en cuestión, sirven como una referencia del tipo de forzantes que han sido identificados.

Materiales y métodos

Como punto de partida fueron utilizadas las cartas del Weather Prediction Center (WPC) (NWS, 2017) y del Centro de Análisis y Pronósticos Meteorológicos Aeronáuticos (CAPMA) (SENEAM, 2017). El objetivo de esto fue la revisión de los ambientes sinópticos y la comparación de análisis entre una institución de los EE. UU. y una nacional. Si bien no difieren en demasía, la precisión y detalle con las que se hacen los análisis fue un aspecto a tomar en cuenta.

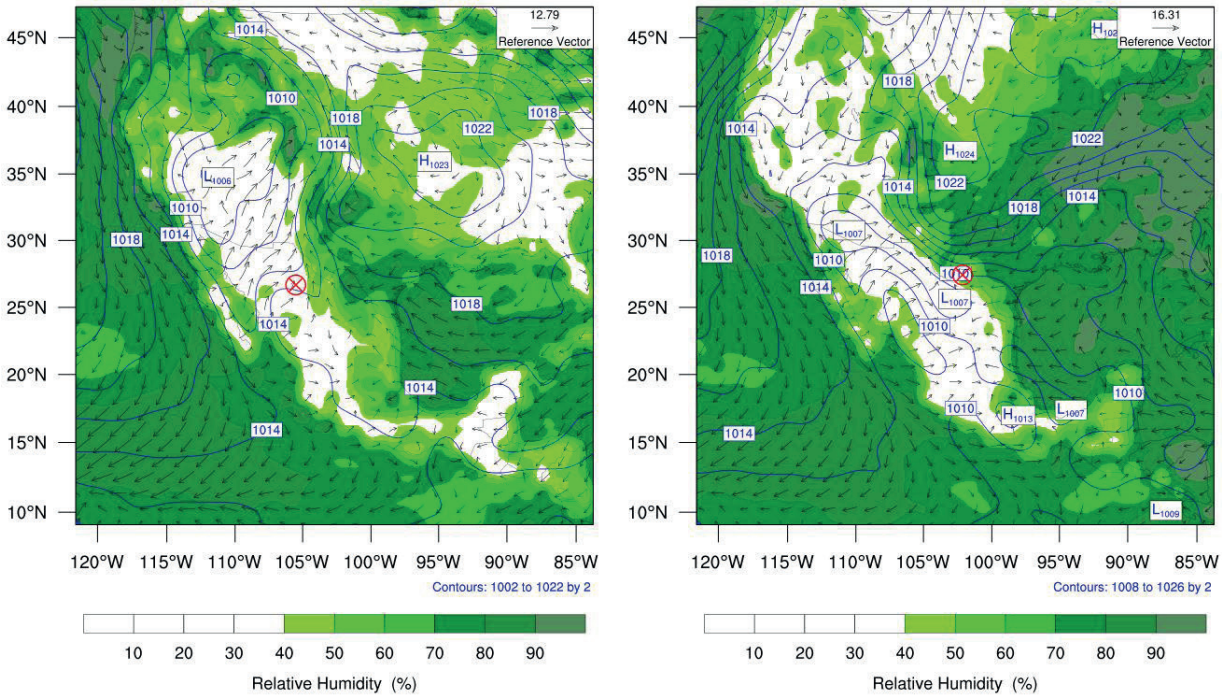
No obstante, y a pesar del material disponible, se optó por la realización cartas de análisis propias. Esto por la facilidad para la extensión del análisis a otro tipo de variables que resultan indispensables para la descripción de los ambientes sinópticos que adelante se detallan. En este sentido fueron utilizados datos de reanálisis del NCEP (NCAR-UCAR, 2017). Dichos cuentan con una resolución espacial de 1° x 1° y temporalidad de 6 horas (4 tiempos por día), además de contar con 26 niveles verticales de los 1000-hPa a los 10-hPa, dando posibilidad al estudio de toda la columna atmosférica.

El análisis consistió en la revisión de la evolución de variables como humedad relativa a 2 m, el campo de vientos a 10 m y la presión a nivel del mar. Se seleccionó la salida de datos más cercana a la hora de registro de cada tornado, posteriormente se analizó todo el día previo y se crearon las cartas correspondientes. Para esto fue empleado el lenguaje de interpretación NCL. Los resultados de cada caso fueron clasificados manualmente en 3 ambientes sinópticos, dependiendo de las características generales de circulación en superficie.

2.4. Resultados

Situación sinóptica tipo I

Este tipo de fenómenos están concentrados en la región norte del país, entre los estados de Chihuahua y Tamaulipas. Como características importantes se puede resaltar la existencia de un sistema frontal impulsado por una masa de aire frío y ocasionalmente seco desde el centro de EE. UU. y en dirección sur - suroeste. Además, un flujo de humedad proveniente del Golfo de México favoreciendo la convección en la zona de convergencia de estos límites. En el borde del sistema frontal se observa un ambiente de cizalla, o viento cortante (Gráfica 2.5), producto de la interacción de ambas masas, proporcionando otro elemento importante para la generación de las condiciones inestables. Los tornados que se han documentado de este tipo se han observado justo en este límite de convergencia.



Gráfica 2.5. Situación sinóptica tipo I, casos de 15-05-2016 en Chihuahua (izq.) y 17-05-2016 en Coahuila (der.). Humedad relativa (%) a 2 m, campo de vientos (m s-1) a 10 m y en contornos la presión a nivel del mar (hPa).

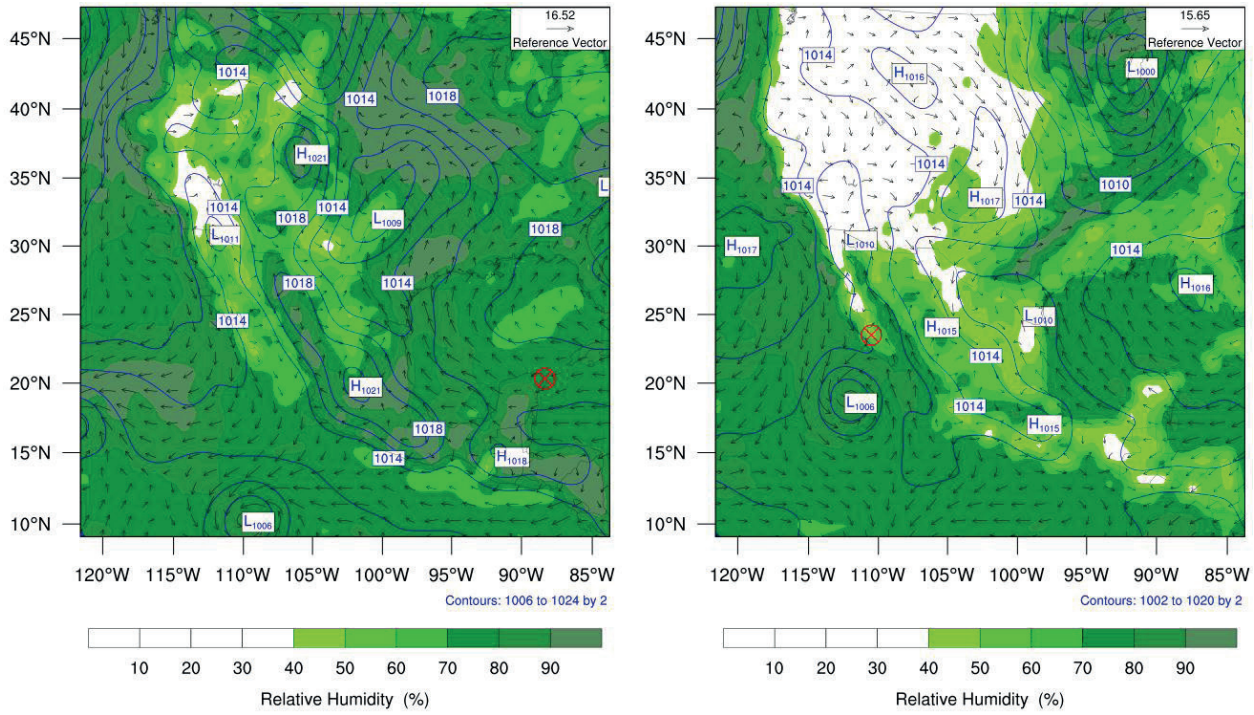
Esta configuración se encuentra similar a lo que se observa a principios de primavera en la región sur del Tornado Alley, y coincide con lo reportado anteriormente en esta región del país (León-Cruz, Carbajal y Pineda-Martínez, 2017). Varios de estos eventos se han catalogado como tornados tipo I y además de la formación de tornados, otras manifestaciones de tiempo severo como granizo o ráfagas descendentes han sido reportadas. Si bien representan un porcentaje bajo en ocurrencia, se demuestra que las condiciones para su desarrollo son posibles. Las épocas más activas para este tipo de configuración incluyen los meses de abril y mayo, cuando la penetración de frentes fríos en el norte del país es todavía posible.

Situación sinóptica tipo II

Este patrón se ha identificado en la región de la Península de Yucatán, Chiapas, Baja California Sur y la costa centro-sur del Océano Pacífico, entre Oaxaca y Nayarit. Los meses de mayor incidencia comprenden un periodo entre julio y octubre. Además, la mayor parte de trombas marinas entran en esta clasificación (Gráfica 2.6).

Estos eventos o bien se encuentran en la zona de influencia de las bandas nubosas de un ciclón tropical o en la zona activa de una onda tropical. Como característica primordial, estos fenómenos operan como detonadores de los flujos de humedad desde el océano, ya sea a través del campo de viento de los ciclones o favoreciendo el arrastre de humedad tierra adentro, ayudando la formación de sistemas convectivos locales y en ocasiones, sistemas convectivos de mesoescala. Escenario similar ocurre cuando en las planicies costeras el flujo de humedad se estrella con una barrera orográfica, siendo este el que proporciona un ambiente de convergencia de masas, ayudando a la formación de tormentas severas y esporádicamente tornados.

Las ondas tropicales causan un incremento generalizado en la humedad en el país, donde el campo de viento soplando desde el este (vientos alisios) favorece su ingreso desde la Península de Yucatán, en ocasiones llegando a penetrar hasta la región centro del país en forma de vaguada (zona extendida de baja presión). El caso de los ciclones tropicales se identifica por medio de las bandas nubosas del sistema. Muchas veces no es necesario que el punto donde se localice el tornado esté cercano a la región de



Gráfica 2.6. Situación sinóptica tipo II, casos de 03-07-2016 en Quintana Roo (izq.) y 20-08-2016 en BC.S. (der.). Humedad relativa (%) a 2 m, campo de vientos (m s-1) a 10 m y en contornos la presión a nivel del mar (hPa).

impacto del huracán o tormenta tropical, pero sí que se encuentre dentro de su zona de influencia. La relación entre tornados y ciclones tropicales no es nueva, y aunque gran parte de ellos se ha identificado por sistemas tropicales en el Golfo de México en la región suroeste de EE. UU. (Hill, Malkin y Schulz Jr, 1966), en nuestro país no se había establecido una relación directa.

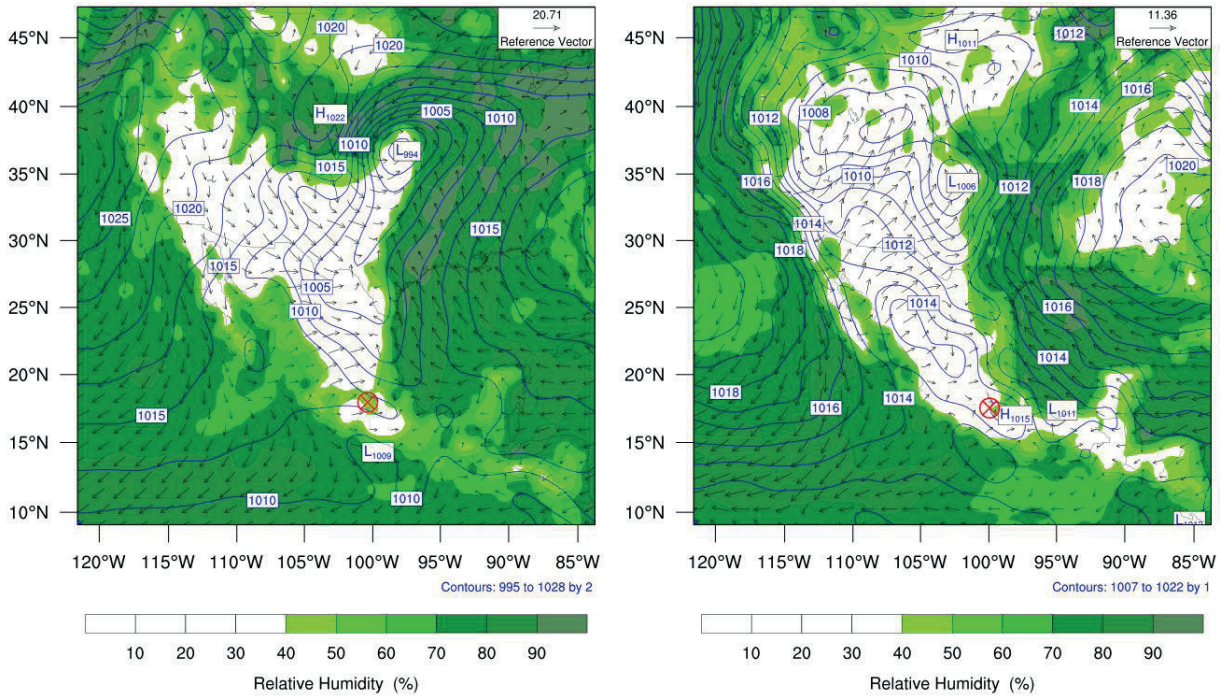
Situación sinóptica tipo III

Esta disposición de sistemas sinópticos es la más interesante. La mayor parte de estos eventos se ubica sobre la región norte de la FVTM, zona orográficamente compleja y que se extiende del Golfo de México al Pacífico central. Se han documentado este tipo de eventos de marzo hasta octubre, y representan el grupo con mayor frecuencia, alrededor del 40% del total de los registros. Un gran porcentaje de estos también han sido catalogados como tornados del tipo II.

El patrón consiste en un sistema de baja presión alargado (vaguada), desde el sur de EE. UU. hasta la región centro-sur del país en un ángulo de ~90° con respecto a la FVTM (Gráfica 2.7). Al este, un anticiclón dominante en el Golfo de México, proporcionando, gracias a su circulación asociada, un flujo de humedad hacia la región centro del país. Al oeste de la vaguada, se observa el campo de vientos paralelos a la costa del Pacífico sur y su penetración desde Nayarit hasta Sonora, en el Pacífico Norte. Esta configuración es ideal, y aunque no se replica al 100% en todos los casos, la mayor parte de los elementos se pueden notar.

Como consecuencia de esta situación, se observa una zona de convergencia en superficie paralela a la vaguada e intensificada en la región centro, casi siempre en los límites entre el sistema de baja y alta presión, propiciando así condiciones favorables para el desarrollo de tormentas convectivas. De igual forma, conforme mayor sea la penetración del flujo del Pacífico, más al este se ubicará la zona de convergencia de humedad. Sobre este tipo de fenómenos, se infiere al terreno como elemento esencial para la intensificación de las condiciones inestables, puesto que los sistemas de alta presión adyacentes a la vaguada, principalmente el del oeste, tiene sus límites en algún punto de la FVTM (coincidiendo con la ubicación del tornado). Es importante notar que, desde la región de propagación de sistemas frontales en América del Norte, no existe alguna una barrera orográfica importante perpendicular a ellos hasta la porción central de la FVTM, por ello se infiere que este podría funcionar como un reductor de la velocidad de estas masas de aire, canalizándolas entre las montañas y propiciando su convergencia en las regiones de valle (Carbajal *et. al.,* 2018).

Las variaciones de este patrón sinóptico son relevantes para entender los detonadores principales. Por ejemplo, se han identificado regiones de baja presión dominantes en el centro y muy cercanas a la vaguada previas a la ocurrencia del tornado. Luego, un sistema de alta presión, que generalmente se compone de aire seco y frío, ingresa desde el norte del país y converge, gracias a los flujos de humedad o del Golfo de México o de la costa del Pacífico. Aquí se puede establecer que el aire seco entrando en forma de cuña sobre la región centro provoca el ascenso de estas masas de aire húmedo y la saturación del vapor de agua, provocando así la formación de tormentas.



Gráfica 2.7. Situación sinóptica tipo III, casos de 23-03-2016 en Edo. de México (a) y 24-05-2016 en Edo. de México (b). Humedad relativa (%) a 2 m, campo de vientos (m s-1) a 10 m y en contornos la presión a nivel del mar (hPa).

Otro ejemplo podrían ser los frentes cálidos desde los océanos. En este caso la región centro estaría dominada por sistemas de alta presión, posibles remanentes de una masa de aire seco y frío. Los frentes cálidos impulsados por el campo viento llegarían a filtrarse por la región montañosa disminuyendo su velocidad, una vez localizados en las regiones de valle acelerarían y se estrellarían con este aire seco predominante. El resultado sería el rápido ascenso de estas masas húmedas y su saturación, provocando convección profunda y/o forzada por la orografía, y, por ende, la formación de tormentas severas y ocasionalmente tornados.

Si bien las condiciones descritas coinciden de manera general con el clásico paradigma de la convergencia de una masa de aire frío y seco con otra húmeda y caliente, se diferencian de estas por su extensión y génesis. Por un lado, se puede observar que la penetración de las masas de aire (frío y seco del norte, y húmedo y caliente de los océanos) puede ser mayor a lo que oficialmente es reportado, y por otro, que la compleja orografía funciona como un catalizador de las condiciones presentes, aumen-

tando el tiempo de interacción de estas masas. De igual manera, la interacción de estas masas de aire con características contrastantes se da de manera más puntual, y no tan extendida como normalmente se daría en una región plana.

Los tornados y el riesgo

El riesgo de desastre es definido como la probabilidad de que, durante un periodo específico de tiempo, se produzcan alteraciones graves en el funcionamiento normal de la sociedad, dando lugar a efectos humanos, materiales, económicos o ambientales adversos (Field, 2012). Es considerado una función de la amenaza (fenómeno natural y antropogénico que pueda causar un daño), la vulnerabilidad (predisposición para verse afectado negativamente) y la exposición (la presencia de personas, medios, servicios, infraestructura, etcétera en lugares donde puedan ser afectados negativamente) (Field, 2012).

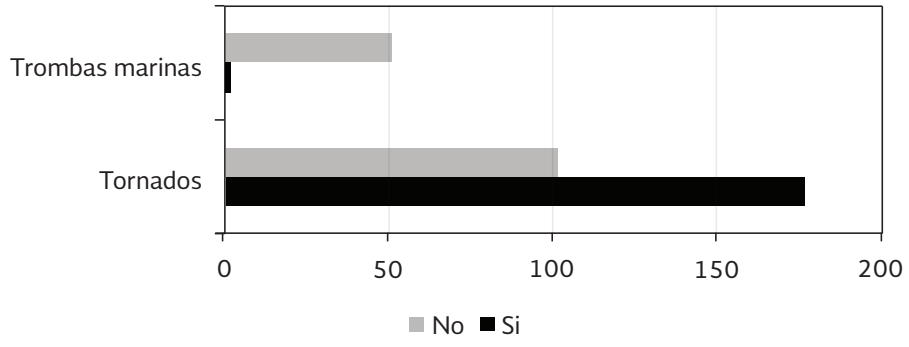
El objetivo de las investigaciones aquí expuestas busca la comprensión física de los tornados y la localización de la población propensa a sufrirlos, es decir la amenaza y exposición. Partiendo de la primicia que el mejor entendimiento de estos dos elementos del riesgo traerá consigo la toma de decisiones más acertadas en pro de la reducción de la vulnerabilidad, y con ello, la disminución del riesgo de desastre por tornados en el país.

En este sentido, México cuenta con poca información oficial disponible. Según el reporte del impacto socioeconómico de los desastres en México para 2000 al 2015, se tienen registrados, oficialmente, 8 eventos de tornado en el país (Cenapred, 2017). Dejando claro la minimización de la problemática que estos representan, no sólo en su identificación como fenómeno natural, sino también en su reconocimiento oficial. Esta situación deriva en la falta de creación de programas de reducción de riesgo enfocados a este fenómeno, como ya existe para huracanes o sismos, por ejemplo. Con relación a lo anterior, resulta interesante conocer que, en el 2015, el desastre con mayor cantidad de defunciones asociadas a un fenómeno hidrometeorológico fue un tornado (caso de Cd. Acuña, Coahuila).

Sobre esto, y a partir de la información recopilada por la base de datos, se puede observar que el 53% de los registros de tornados/trombas marinas han ocasionado algún daño a la población (Gráfica 2.8). Los daños se caracterizan por desprendimiento de techos (en su mayoría láminas de asbesto o aluminio), caída de bardas (la mayoría sin refuerzos estructurales), daños a los hogares y automóviles por caída de árboles o postes y parcelas de cultivo o invernaderos destruidos.

Por las características tan particulares de los tornados no resulta complicado reconocer su impacto; daños lineales y/o puntuales son comúnmente reportados. Diferenciando éstos de fenómenos hidrometeorológicos de mayor alcance como son huracanes, sequías o inundaciones. No obstante, el potencial de mortandad que tiene es importante, tanto por los fuertes vientos asociados como por su baja capacidad de predicción.

La relación existente entre la densidad de población y la distribución de reportes de tornados es importante. En lo que se refiere a términos de riesgo, en cuanto menor sea la población, menor será la probabilidad de existencia de un desastre. Como bien se ha observado en la distribución de reportes, la región central es la más afectada, no obstante, los daños causados son menores comparados con la región noroeste de México. Esto se debe a que la ocurrencia de tornados supercelda (los más violentos) se han documentado mayormente en esta región del país, lo que es evidencia que el elemento de amenaza (fenómeno natural) es un componente del riesgo muy importante,



Gráfica 2.8. Distribución de daños por tornados y trombas marinas para el periodo 2000-2017.
Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.

al menos en estos casos. Es decir, los daños esperados en una misma estructura por un tornado con vientos de 100 m s^{-1} se diferencian en demasía con los que se pueden esperar por un evento de 25 m s^{-1}. De ahí la importancia de la identificación, entendimiento y diferenciación del fenómeno natural.

Si bien es cierto que recién se comienza con el estudio de estos fenómenos en el país y aún no existe una visión completamente clara del porqué de su formación y distribución, este tipo de investigaciones busca un primer acercamiento a la problemática planteada por tan extraordinaria manifestación del tiempo severo. El reconocimiento y estudio de la dinámica atmosférica y los impactos sociales que los tornados generan buscan, por un lado, la dimensionalización de estos fenómenos naturales, y por otro, la vinculación entre científicos y autoridades, en beneficio del mejoramiento en la calidad de vida de la población mexicana. Además, se plantean como base de recomendaciones tales como una mayor instrumentación con radares meteorológicos en México y la creación de una base de datos oficial de tormentas severas y tornados.

2.5. Conclusiones

La formación de tornados en México es común, y en los últimos tiempos se han reportado alrededor de 46 eventos por año. La mayor parte de estos fenómenos son del tipo II, es decir tornados que no son asociados a un sistema de tormenta con rotación. Se ha encontrado patrones espaciales y temporales, mismos que son diferenciados por los sistemas meteorológicos predominantes. Se han identificado además, sistemas sinópticos como ciclones tropicales, frentes fríos, ondas tropicales y vaguadas al momento de ocurrencia de tornados. La región de la Faja Volcánica Transmexicana es una de las zonas más interesantes, debido a su complejidad orográfica y densidad poblacional. La convergencia de flujos húmedos y secos sea cual sea su origen, es típico en la formación de tormentas severas y tornados en la región centro del país, aunque la escala a la que estos se dan sea menor a la reportada comúnmente en la literatura.

La investigación de tornados en México se encuentra en una fase temprana. Pocos son los estudios que se han publicado sobre el tema, en cualquier ámbito que estos requieren. La falta de instrumentación en gran parte del país limita la investigación por datos reales, por lo que las simulaciones numéricas y datos de reanálisis demuestran ser una gran herramienta para su investigación. El incremento de estudios para estos fenómenos naturales es el primer paso para la comprensión completa del fenómeno natural, y, por ende, el mejor manejo de la gestión del riesgo de desastre ante ellos.

Existe mucho campo de aprovechamiento en el tema de tornados en México. El mejoramiento de las tecnologías y el mayor acceso a la información han demostrado ser elementos esenciales para el incremento de reportes de estos fenómenos en el país. Este tipo de trabajos sirven como base para la futura aplicación de tecnologías de alertamiento ante estos fenómenos naturales y el mejor manejo de emergencias en el país.

2.6. Agradecimientos

La presente investigación se realizó con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por medio de la beca de Doctorado con número de asignación 298737. Es producto del trabajo de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), donde los autores participan como miembro Investigador y Estudiante (Doctorado). Finalmente, agradezco a Ivan Camilo Henao Moran por proporcionarme la fotografía utilizada en la portada de este capítulo.

2.7. Referencias

Agee, E. y E. Jones (2009), "Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events", Weather and Forecasting, 24(2), pp. 609–617.

American Meteorological Society (2013), "Glossary of Meteorology", American Meteorological Society. [http://glossary.ametsoc.org/wiki/Tornado: 01 de octubre de 2017].

Ashley, W. S., A.J. Krmenec y R. Schwantes (2008), "Vulnerability due to nocturnal tornadoes", Weather and forecasting, 23(5), pp. 795–807.

Bikos, D., J. Finch y J.L. Case (2016), "The environment associated with significant tornadoes in Bangladesh", Atmospheric Research, Elsevier, 167, pp. 183–195.

Bluestein, H. B. (ed.; 2013), Severe Convective Storms and Tornadoes Observations and Dynamics, Springer, doi: 10.1007/978-3-642-05381-8.

Brooks, H. E., J.W. Lee y J.P. Craven (2003), "The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data", Atmospheric Research, Elsevier, 67, pp. 73–94.

Carbajal, N., J.F. León-Cruz, L.F. Pineda-Martínez, J. Tuxpan-Vargas y J.H. Gaviño-Rodríguez (s.a.), Occurrence of anticyclonic tornadoes in a topographically complex region of Mexico, Sometido a Advances in Meteorology, Hindawi.

Centro Nacional de Prevención de Desastres (2017), "Impacto socioeconómico de los desastres de 2000-2015", CENAPRED. [https://datos.gob.mx/busca/dataset/impacto-socioeconomico-de-desastres-de-2000-a-2015: 01 de octubre de 2017].

Davies-Jones, R., R.J. Trapp y H.B. Bluestein (2001), "Tornadoes and tornadic storms", en Severe convective storms, Springer, pp. 167–221.

Doswell, C. A. y D.W. Burgess (1993), "Tornadoes and toraadic storms: A review of conceptual models", The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Wiley Online Library, pp. 161–172.

Field, C. B. (coord.; 2012), Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press.

Gayà, M. (2011), "Tornadoes and severe storms in Spain", Atmospheric research, Elsevier, 100(4), pp. 334–343.

Goliger, A. M. y R.V. Milford (1998), "A review of worldwide occurrence of tornadoes", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier, 74, pp. 111–121.

Hill, E. L., W. Malkin y W.A. Schulz Jr (1966), "Tornadoes associated with cyclones of tropical origin-practical features", Journal of Applied Meteorology, 5(6), pp. 745–763.

León-Cruz, J. F., N. Carbajal y L.F. Pineda-Martínez (2017), "Meteorological analysis of the tornado in Ciudad Acuña, Coahuila State, Mexico, on May 25, 2015", Natural Hazards, Springer, 89(1), pp. 423–439.

Macías, J. M. (2001), Descubriendo tornados en México: el caso del tornado de Tzintzuntzan, CIESAS.

Macías, J. M. (2016), "Vulnerabilidad social en la Ciudad de México frente a tornados", Revista mexicana de sociología, Instituto de Investigaciones Sociales, 78(2), pp. 257–284.

Macías, J. M. y A. Avendaño (2014), "Climatología de tornados en México", Investigaciones Geográficas, 2014(83), pp. 74–87.

Markowski, P. M. y Y.P. Richardson (2009), "Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research", Atmospheric Research, Elsevier, 93(1), pp. 3–10.

Matsangouras, I. T., I. Pytharoulis y P.T. Nastos (2014), "Numerical modeling and analysis of the effect of complex Greek topography on tornadogenesis", Natural Hazards and Earth System Sciences, Copernicus GmbH, 14(7), p. 1905.

National Centers for Environmental Prediction / National Weather Service / NOAA / U.S. Department of Comcerce, 2000, updated daily. NCEP FNL Operational Model GLobal Tropospheric Analyses, continuing from July 1999, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. [https://doi.org/10.5065/D6M043C6: 14 de agosto de 2017].

National Climatic Data Center (2017), "U.S. Tornado Climatology", Extreme events, National Centers for Environmental Information. [https://www.ncdc.noaa.gov/climate-information/extreme-events/us-tornado-climatology: 01 de octubre de 2017].

National Weather Service (2017), "WPC Product Archive", Weather Prediction Center. [http://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/wpc_arch/get_wpc_archives.php: 15 de agosto de 2017].

Ortiz-Royero, J. C. y M. Rosales (2012), "Severe tornadoes on the Caribbean coast of Colombia since 2001 and their relation to local climate conditions", Natural hazards, Springer, 64(2), pp. 1805–1821.

Prieto González, R., A. Avendaño, L. Matías y H. Eslava (2010), "Tormentas severas", Serie Fascículos. 1a. edición, México, CENAPRED, México, p. 3.

Rauhala, J., H.E. Brooks y D.M. Schultz (2012), "Tornado climatology of Finland", Monthly Weather Review, 140(5), pp. 1446–1456.

Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (2017), "Cartas Análisis CAPMA", Centro de Análisis y Pronósticos Meteorológios Aeronáuticos. [http://capma.com.mx/capma/capma.html: 15 de agosto de 2017].

Toscana Aparicio, A. y V. Valdés Pérez (2014), "Representaciones sociales del desastre de 1940 en Santa Cruz Pueblo Nuevo, Estado de México", Investigaciones Geográficas, 2014(83), pp. 88–101.

Valdés Manzanilla, A., M. Cortéz Vázquez y J.J. Pastrana Francisco (2005), "Un estudio exploratorio de los Sistemas Convectivos de Mesoescala de México", Investigaciones geográficas, Instituto de Geografía, UNAM, (56), pp. 26–42.

Velasco Fuentes, O. (2010), "The earliest documented tornado in the Americas: Tlatelolco, August 1521", Bulletin of the American Meteorological Society, American Meteorological Society, 91(11), pp. 1515–1523.

Wakimoto, R. M. y J.W. Wilson (1989), "Non-supercell tornadoes", Monthly Weather Review, 117(6), pp. 1113–1140.

Yao, Y., X. Yu, Y. Zhang, Z. Zhou, W. Xie, Y. Lu, J. Yu y L. Wei (2015) "Climate analysis of tornadoes in China", Journal of Meteorological Research, Springer, 29(3), pp. 359–369.

DESASTRES ASOCIADOS A CICLONES TROPICALES EN LA COSTA OCCIDENTAL DE MÉXICO: 2011-2015

3

Desastres asociados a ciclones tropicales en la Costa Occidental de México: 2011-2015

Luis M. Farfán[1]; Blanca Natalia Castillo Bautista[2]*; Jorge Luis Vázquez Aguirre[3]*

3.1. Resumen

Mediante una selección basada en impacto a la población, se documentan características de ciclones tropicales que entraron a México desde el Océano Pacífico. Se incluye el desarrollo de Manuel (septiembre 2013), Odile (septiembre 2014) y Patricia (octubre 2015) con intensidad de viento en el rango de 110-250 km/h durante su paso por la costa. Se encuentran lluvias con respecto a acumulaciones en periodos de 1 a 3 días con algunos valores comparables, o mayores, a los máximos históricos disponibles hasta 2010. Cada ciclón está asociado a daños directos en centros de población con pérdidas económicas, afectados y muertes. Se hace una comparación con eventos históricos que fueron relevantes y que causaron desastres tanto en la costa noroeste así como en el suroeste y sur del país. De los tres ciclones seleccionados, Manuel fue el que causó el mayor impacto a la población, mediante lluvias extraordinarias en el estado de Guerrero, a pesar de sólo haber alcanzado una intensidad moderada mientras que Patricia fue el ciclón con mayor intensidad pero que causó daños materiales y sociales menores al impactar por la costa de Jalisco y Colima. Odile tuvo una intensidad intermedia y daños materiales en el sur de la península de Baja California. Se presentan varios aspectos sobre el comportamiento de pronósticos oficiales, de trayectoria e intensidad, emitidos antes de la entrada a tierra así como limitaciones técnicas

1 Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Unidad La Paz, Miraflores 334, Colonia Bellavista, 23050, La Paz, Baja California Sur, farfan@cicese.mx
2 E-mail: nathaly_chateau@hotmail.com
3 E-mail: j.climsci@googlemail.com
* Universidad Veracruzana, Facultad de Instrumentación Electrónica, Zona Universitaria, 91000 Xalapa, Veracruz

de la información para fines de prevención ante condiciones extremas en regiones costeras.

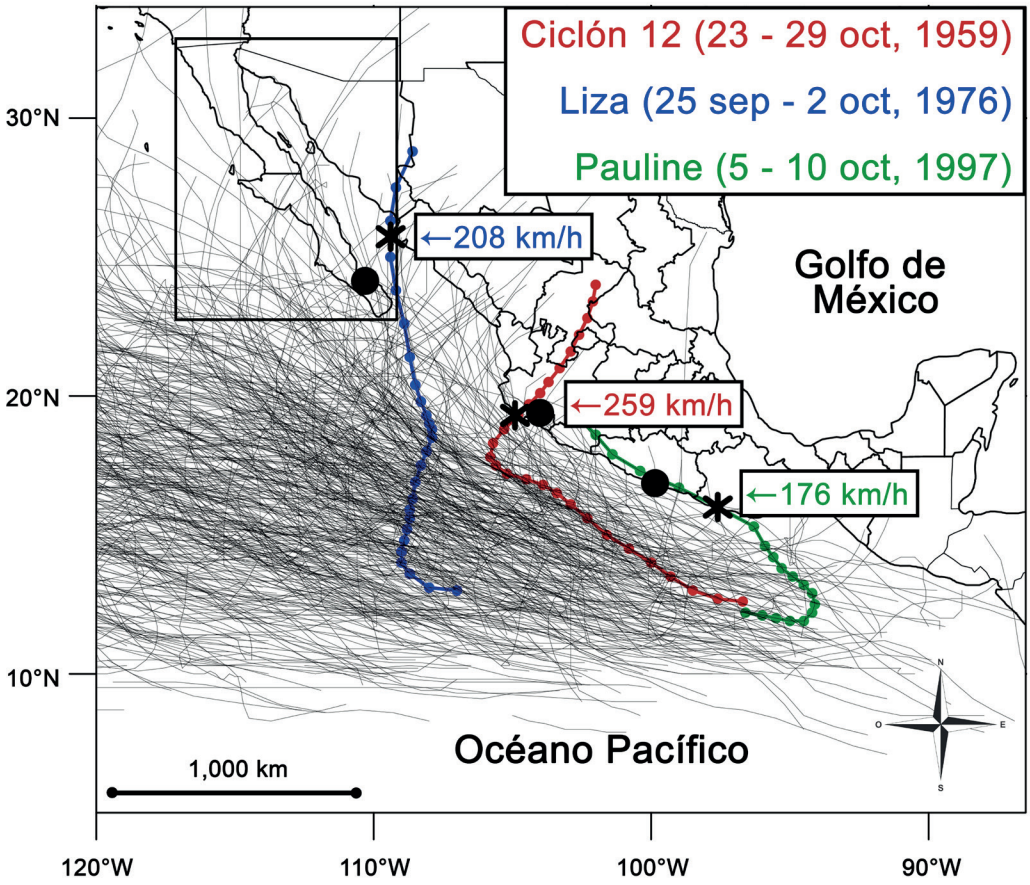
Palabras clave: Ciclones tropicales, Océano Pacífico oriental, temporadas 2011-2015, desastres en México.

3.2. Introducción

El conocimiento de las condiciones del tiempo es de importancia para la planeación y desarrollo de actividades productivas. Cambios con respecto a las condiciones normales pueden afectar al medio ambiente y a la sociedad, pero en casos extremos, causan pérdidas tanto en bienes materiales así como en la existencia humana. La mayoría de los desastres involucran condiciones adversas y la capacidad de respuesta depende, entre otros factores, de la intensidad y duración de la perturbación incidente. Los eventos que con frecuencia causan impacto negativo son los que ocurren en regiones cercanas al ecuador terrestre, incluyendo ciclones tropicales. Desde 1900 a 2017, este tipo de fenómenos han causado al menos $700 mil millones de dólares en pérdidas, 50 millones de habitantes afectados y 86 mil muertes en la población del Mar Caribe, Centro y Norte América (CRED, 2017). Las zonas costeras (e.g., González-Baheza y Arizpe, 2017), así como las áreas turísticas e industriales que los rodean (Rodríguez Esteves, 2017), tienden a padecer este tipo de desastres y requieren de atención inmediata durante la temporada activa del año.

Los ciclones tropicales en el Océano Pacífico oriental fueron analizados, inicialmente, por Serra (1971) quien utilizó información de 1921 a 1969 para determinar que hay actividad entre agosto y octubre además de haber definido que una de las regiones más afectadas es la península de Baja California. Jáuregui (2003), utilizó datos del periodo 1951-2000 para encontrar mayor frecuencia de impacto en el noroeste incluyendo Baja California Sur y Sinaloa con un segundo máximo en Guerrero, Michoacán y Jalisco. Además, estableció que el ciclón más intenso ocurrió en 1959 al cruzar la costa entre Jalisco y Colima (Gráfica 3.1). En esa temporada todavía no se utilizaban nombres y, de forma arbitraria en nuestra investigación, el ciclón es llamado 12 por su orden de aparición. Su intensidad (viento máximo) fue 259 km/h con acumulación de

lluvia mayor a 350 mm en 24 horas, lo que causó miles de afectados por inundaciones y deslizamientos (Padilla Lozoya, 2006). Se estiman más de 600 muertes en Minatitlán, Colima, donde falleció la tercera parte de los habitantes debido al movimiento de escombros.



Gráfica 3.1. Trayectorias de 619 ciclones tropicales en la cuenca del Océano Pacífico oriental desde 1970 a 2010. Las líneas en color representan el ciclón 12 de 1959 (rojo), Liza de 1976 (azul) y Pauline de 1997 (verde); los puntos son posiciones cada 6 horas, los asteriscos sitios de entrada a tierra con la intensidad correspondiente. El cuadro indica la península de Baja California y los puntos negros la posición de Acapulco (Guerrero), Minatitlán (Colima) y La Paz (Baja California Sur). Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, Farfán *et. al.* (2013) evaluaron más de 600 ciclones tropicales que se presentaron durante el periodo 1970-2010. La investigación se concentró en los eventos con entrada a tierra cerca a áreas pobladas y se aplicó una base de datos para identificar población afectada que varió desde 20,000 a más de 800,000 habitantes.

En estos datos los afectados incluyen a heridos, desplazados, evacuados o personas que quedaron sin casa después del desastre. Se encuentra que, además de viento intenso, la lluvia acumulada en varios días es un elemento importante en el proceso de desarrollo de desastres. El Cuadro 3.1 presenta un resumen de parámetros físicos y de impacto social para una selección de desastres asociados a ciclones históricos. Para los casos entre 1959 y 2015, la intensidad estuvo en el rango de 176-259 km/h, la precipitación máxima alcanzada fue mayor a 360 mm y los daños entre 20-4,200 millones de dólares.

Cuadro 3.1. Impacto físico y social para una selección de ciclones tropicales en la costa occidental de México

Año	Nombre	Intensidad[a]	Viento[b]	Lluvia[c]	Afectados	Muertos	Pérdidas[d]
1959	12	**H5**	**259**	360		**960**	20
1976	Liza	H3	204	425	276,400	600	100
1997	Pauline	H2	176	423	**803,755**	230	448
2013	Manuel	TT	111	**1,000**	105,000	169	**4,200**
2014	Odile	H3	204	548	75,135	6	2,500
2015	Patricia	H4	241	337	15,000	14	823

a = HN huracán categoría N (1, 2, 3, 4 o 5), TT tormenta tropical

b = Magnitud de viento sostenido (km/h) durante la entrada a tierra

c = Valor máximo de lluvia acumulada (mm) en periodo de 3 días

d = Daños en millones de dólares (EM-DAT)

En negro valor máximo por columna

La población en la península de Baja California ha sufrido impactos notables por acumulaciones extraordinarias de lluvia (Latorre y Penilla, 1988). En septiembre de 1976, el ciclón Liza recorrió el Golfo de California para generar cientos de muertes por fallas en una estructura hidráulica (Gunther, 1977). La estructura colapsó y estableció un flujo extraordinario en arroyos de un sector marginal de la ciudad de La Paz (Villanueva González, 2004). Reportes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) indican que la lluvia en La Paz fue de 130 mm y 298 mm en la estación más cercana, mientras que una acumulación máxima de 425 mm se registró en un sitio a 65 km al sureste de la ciudad. Un factor notable es que el centro de Liza cruzó la frontera entre Sinaloa y Sonora sin entrar por la península, aunque pasó cerca de su costa oriental, donde se concretó el desastre (Gráfica 3.1).

Otro evento que causó desastre fue el ciclón Pauline, que, en octubre de 1997 se desplazó por la costa de Oaxaca, Guerrero y Michoacán (Gráfica 3.1). Esta región tiene una topografía compleja, la Sierra Madre del Sur, con elevaciones de más de 2 mil metros. La intensidad con la que entró a tierra fue de 176 km/h y el centro de circulación pasó cerca a Acapulco, mientras que el viento máximo en el interior del ciclón era de 120 km/h. Se observaron lluvias acumuladas de 423 mm así como arroyos en el área urbana. La ciudad tiene una distribución del terreno con elevación de 900 m a tan sólo 5-10 kilómetros de la costa y pendientes de hasta 45% (H. Ayuntamiento Constitucional de Acapulco de Juárez, 2015). Con información de INEGI (2015) es posible estimar que, en 1997, el municipio de Acapulco contaba con 587 mil habitantes aproximadamente.

3.3. Objetivo

Se analizan desastres causados por el desarrollo de ciclones tropicales en la costa occidental de México, desde la cuenca del Océano Pacífico Oriental, durante las temporadas 2011-2015. El objetivo general es definir las características de los ciclones y, además, determinar los elementos físicos que favorecieron impacto relevante en la población de la costa sur (Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán), suroeste (Colima, Jalisco y Nayarit) y noroeste (Sinaloa, Sonora y península de Baja California). Se utilizan estimaciones de intensidad con respecto a viento y lluvia acumulada, estructura de nubosidad y movimiento de traslación de los ciclones durante su tránsito cerca de la línea costera, así como información meteorológica de las regiones impactadas. Este análisis complementa los resultados de Farfán *et. al.* (2013) y busca responder a las preguntas ¿durante las temporadas de interés, cuáles fueron los 3 desastres de mayor impacto? y ¿cómo se comparan con los desastres de 1959 y del periodo histórico 1970-2010?

3.4. Materiales y métodos

Se examina la cronología de ciclones tropicales en la cuenca del Océano Pacífico oriental, compilada por el Centro de Nacional de Huracanes de Estados Unidos (NHC,

por sus siglas en inglés; http://www.nhc.noaa.gov). La cuenca está delimitada por el meridiano 140°W y la costa occidental del Continente Americano. La cronología contiene, cada seis horas y durante el ciclo de vida de cada ciclón, la mejor estimación de la posición del centro de circulación y velocidad del viento máximo. En este trabajo, la intensidad se clasifica como depresión tropical (viento < 63 km/h), tormenta tropical (63-119 km/h) o huracán (> 119 km/h). Los huracanes se agrupan, según el criterio definido por Saffir (2003), en 5 categorías: 1 (119-153 km/h), 2 (154-177 km/h), 3 (178-208 km/h), 4 (209-251 km/h) y 5 (≥ 252 km/h).

La lluvia acumulada se deriva de observaciones diarias proporcionadas por la red nacional de estaciones del SMN. Para los 11 estados en la costa occidental, la red cuenta con reportes históricos de más de dos mil estaciones (Farfán *et. al.*, 2014; Martínez Robles, 2016) pero sólo se utilizaron las activas en los estados afectados por el ciclón incidente. Para evaluar la componente de daños a la sociedad y la economía, se extrajo información almacenada en EM-DAT (Emergency Events Database, http://www.emdat.be). Esta base de datos valora el impacto a nivel mundial de los desastres ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos, en particular los relacionados a ciclones tropicales y ha sido aplicada por Voigt *et. al.* (2016) y Emanuel (2017) para estimaciones del impacto social. Aunque EM-DAT cuenta con algunas limitaciones con respecto a la clasificación de ciclones, tal como lo describe Cerveny *et. al.* (2017, p. 488), este aspecto es rectificado en nuestro estudio.

Un elemento a considerar en el análisis de desastres es la distribución de la población, de manera que regiones con mayor densidad espacial están asociadas a la probabilidad más alta de recibir daños. El Cuadro 3.2 muestra la densidad de población en la costa del Pacífico y el promedio nacional correspondiente. Tanto en 1970 como en 2015, Colima, Jalisco y Michoacán contaban con la mayor densidad mientras que Baja California Sur tenía un mínimo de habitantes por kilómetro cuadrado. Otro elemento de utilidad es la asignación del grado de marginación y para ello se aplica el Índice de Desarrollo Humano (IDH; PNUD, 2014). El IDH toma en cuenta la esperanza de vida, escolaridad e ingreso per cápita, de manera que los índices más altos (menor marginación) son para la población en la península de Baja California, Colima, Sinaloa, Sonora y Jalisco mientras que índices más bajos (mayor marginación) corresponden

a Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. A nivel municipal, la marginación se relaciona a zonas con mayores elevaciones del terreno, lo que implica mayor dificultad de acceso además de relieve con pendientes inclinadas que favorecen, en condiciones de lluvia intensa, desplazamiento de agua y materiales sólidos por la superficie terrestre. Un grado de marginación mayor implica la carencia de servicios en viviendas tal como agua, drenaje y electricidad (Morales Hernández, 2015).

Cuadro 3.2. Características generales de la población en México

	Densidad[a]		
Estado	1970	2015	IDH[b]
Colima	**44**	**126**	**7.3**
Jalisco	**41**	**100**	**6.7**
Michoacán	**39**	**78**	6.4
Chiapas	21	**71**	5.9
Guerrero	25	56	6.0
Sinaloa	22	52	**7.1**
Baja California	12	46	**7.6**
Nayarit	20	42	**6.9**
Oaxaca	21	42	5.9
Sonora	6	16	**7.1**
Baja California Sur	2	10	**7.6**
Promedio nacional	25	61	6.4

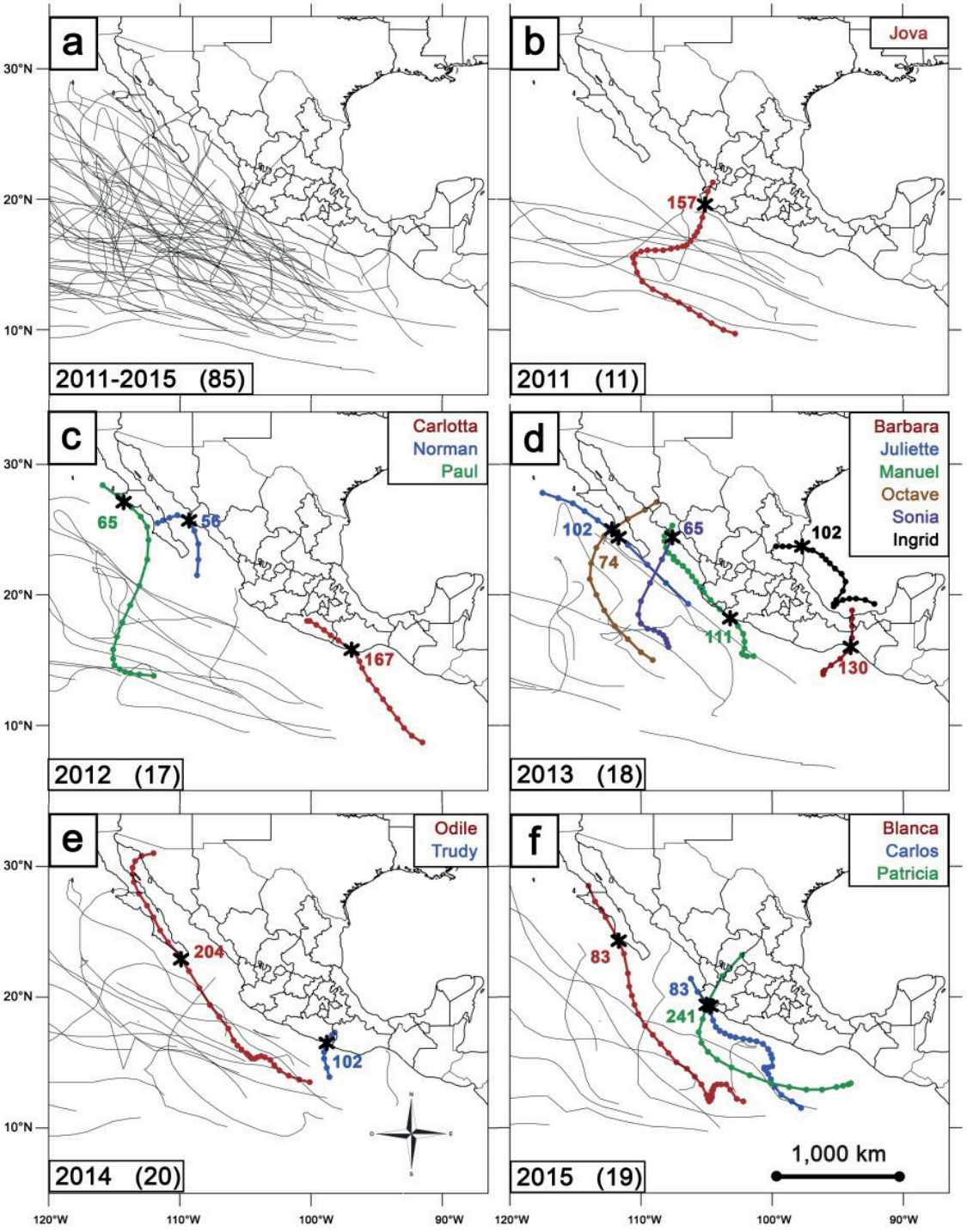
a= Densidad de población (habitantes/km^2)

b= Índice de Desarrollo Humano en 2010

En negro, valores mayores al promedio nacional

3.5. Resultados y discusión

Durante el periodo 2011-2015, se detectaron 85 ciclones tropicales en el Océano Pacífico oriental lo que implica un promedio de 17 por temporada. Catorce ciclones (16.5% del total) entraron a México y la Gráfica 3.2 muestra sus trayectorias, la mayor parte de ellas inician entre 10°N y 15°N, al oeste de 90°W, y siguen una dirección paralela a la costa del país. Siete ciclones entraron por el noroeste (5 en Baja California Sur y 2 en Sinaloa) mientras que los otros lo hicieron por el suroeste (3 en Jalisco) y sur (2 en Oaxaca, 1 en Guerrero y 1 en Michoacán). Entre octubre y noviembre, los ciclones Jova, Octave y Patricia adquirieron recurvatura que se define por una componente de movimiento al este; lo que facilita su llegada a la costa de México.



Gráfica 3.2. Trayectorias de 85 ciclones tropicales en la cuenca del Océano Pacífico oriental desde 2011 a 2015. Las líneas en color representan los ciclones que entraron a tierra por la costa de México con posiciones cada 6 horas y asteriscos el primer sitio de entrada a tierra por cada ciclón con la intensidad correspondiente (km/h). Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 3.3 muestra información general de cada temporada así como la estimación de EM-DAT por número de afectados, muertos y daños económicos. En 2013 (Gráfica 3.2d), los desastres asociados a la incidencia de 5 ciclones ocuparon 52% de los daños materiales del periodo mientras que 31% adicional fue causado en la temporada 2014 (Gráfica 3.2e). En 2013 y 2014 se emitieron 14 (de un total de 29 en 2011-2015) declaratorias de desastre natural por ciclón tropical en el Diario Oficial de la Federación; 11 declaratorias se asociaron a estados afectados por Manuel lo que es equivalente a una tercera parte del total nacional. Además, un análisis de información en EM-DAT permite determinar que Manuel y Odile causaron 82% de las pérdidas económicas en el periodo; por lo tanto, se analizarán estos 2 eventos además de compararlos con los impactos generados por el desarrollo de sus antecesores históricos correspondientes. Esto es, se van a comparar Liza (1976) con Odile como casos representativos del noroeste y Pauline (1997) con Manuel de la región sur de México.

Cuadro 3.3. Actividad de ciclones tropicales en las temporadas 2011-2015

Año	Número[a]	México[b]	Afectados	Muertos	Daños[c]	Declaratorias[d]
2011	11	1	50,450	8	27.7	2
2012	17	3	87,000	7	555	3
2013	18	**5**	**117,000**	**173**	**4,200**	**10**
2014	**20**	2	105,135	12	2,502	5
2015	19	3	15,000	14	823	3
Total	85	14	374,585	214	8,107.7	23

a = número de ciclones tropicales en el Océano Pacífico oriental

b = número de eventos por la costa occidental de México

c = daños en millones de dólares estadounidenses

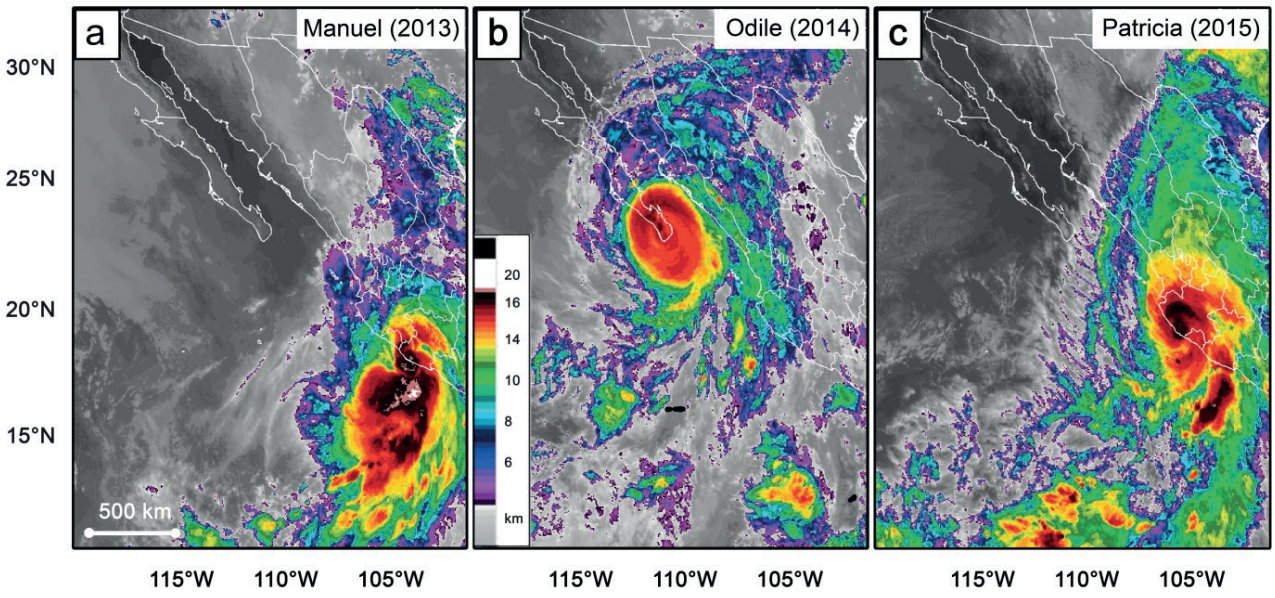
d= número de estados costeros con declaratoria de desastre natural

En negro, el valor máximo por columna

Un tercer caso incluido en este estudio es Patricia, de la temporada 2015, ya que como huracán categoría 4 afectó a Jalisco y Colima con trayectoria ("recurvatura") y mes (octubre) similar a la que siguió el ciclón 12 de 1959. Para este par de ciclones, la distancia entre sus sitios de entrada a tierra es de 70 kilómetros así que, prácticamente, entraron por el mismo lugar. Según EM-DAT, Patricia causó $823 millones de dólares en pérdidas (Cuadro 3.1). En la base de datos completa, con respecto a pérdidas en el

occidente de México, el ciclón que ha causado las pérdidas mayores es Manuel (2013) mientras que Odile (2014) y Patricia (2015) ocupan el segundo y tercer lugar, respectivamente. Los otros ciclones de referencia histórica ocupan el sexto (Pauline, 1997), noveno (Liza, 1976) y décimo sexto (12, 1959) lugar.

La Gráfica 3.3 presenta imágenes de satélite geoestacionario, al momento en que cada uno de los casos seleccionados, cruzaron la costa. Este producto es de utilidad para identificar la estructura de la nubosidad y la hora asignada a cada imagen es la del estado a la entrada a tierra. Odile cuenta con mayor simetría, en parte, por interaccionar con una cadena montañosa pequeña y de poca altura en Baja California Sur (ver Gráfica 3.5). En contraste, Manuel y Patricia se encuentran menos organizados ante la presencia de la Sierra Madre del Sur que actúa como un obstáculo elevado y ancho que, a la vez, favorece el desarrollo de regiones extensas de nubosidad intensa. Aunque no se muestra en la gráfica, para los 3 casos, la estructura de la nubosidad se va deteriorando con el tiempo (siguientes 6-12 horas) conforme cada ciclón interacciona con el terreno.



Gráfica 3.3. Imágenes infrarrojas del satélite GOES-15 durante la entrada a tierra de los ciclones tropicales Manuel (0700 horas, 15 de septiembre 2013), Odile (0000 horas, 16 de septiembre 2014) y Patricia (1900 horas, 24 de octubre 2015). La barra vertical de colores representa una escala de altura (km) asociada al desarrollo vertical de la nubosidad; nubes más altas alcanzan tonos rojos y negros. Fuente: elaboración propia.

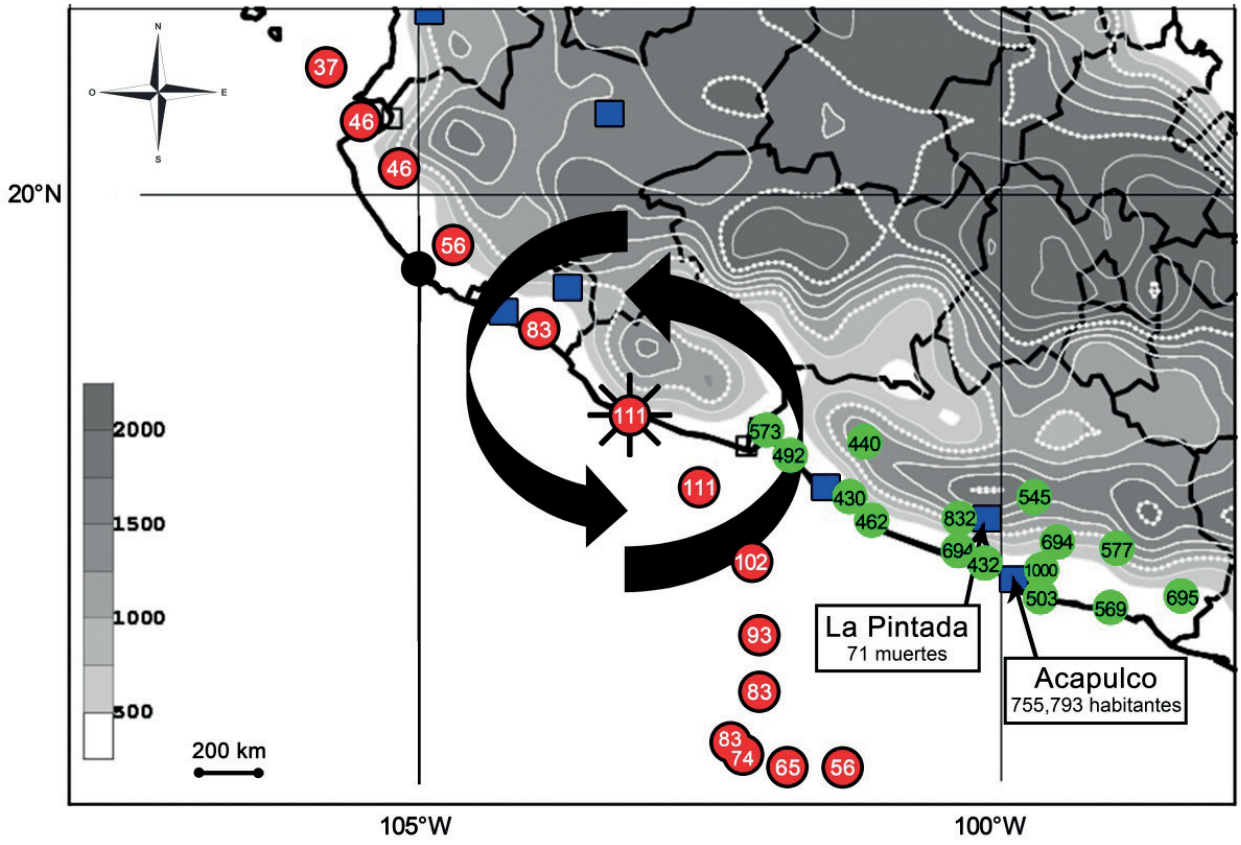
3.6. Manuel (13-19 septiembre, 2013)

Manuel fue responsable de 105 mil afectados y 169 muertes (Cuadro 3.1). Aunque entró a tierra por Michoacán como tormenta tropical, generó acumulaciones de lluvia entre 500-1000 mm sobre parte de Guerrero y causó inundaciones en Acapulco (Pedrozo-Acuña, 2014; Rosengaus-Moshinsky *et. al.*, 2016). Para 2013, con los datos de INEGI (2015) se estima que la población en el municipio de Acapulco era de más de 755 mil habitantes excediendo por 168 mil a la población de 1997, cuando ocurrió el desastre por el huracán (categoría 2) Pauline. Acapulco es el tercer municipio con IDH más alto (7.5) en Guerrero y después de Tijuana, Baja California, es la ciudad más poblada en la costa occidental de México.

La Gráfica 3.4 muestra la distribución de las 15 acumulaciones de lluvia más altas en Guerrero, mayores a 425 mm, que ocurrieron en el interior del continente a menos de 50 km de la costa y destaca 1,000 mm en una estación cerca de Acapulco. Conviene recordar que 423 mm fue la acumulación máxima, en 3 días, reportada en la zona urbana de Acapulco durante Pauline (Cuadro 3.1). Esto implica que llovió casi el doble durante el desarrollo de Manuel que por Pauline y es consistente con más daños materiales; además, septiembre de 2013 proporcionó lluvias significativas y por ello el suelo se encontraba saturado de humedad lo que facilitó el flujo por ríos y arroyos en las cuencas hidrológicas (Pedrozo-Acuña *et. al.* 2014; Rodríguez Esteves, 2017).

De acuerdo con CENAPRED (2015, p. 37), la mayoría de daños y pérdidas fueron en la infraestructura de los sectores comunicaciones y transportes (49%), hidráulico (25%) y educativo (12%). Se publicaron declaratorias de desastre natural para 140 municipios de 8 estados costeros sobresaliendo Colima y Guerrero con cobertura total (100%) de sus municipios así como Sinaloa con el 50% de cobertura municipal.

Para Guerrero, todos los municipios de la costa están incluidos en la declaratoria además de incluir municipios con los valores de IDH más bajos (marginados) en el estado y, la mayoría, cercanos a la frontera con Oaxaca.



Gráfica 3.4. Trayectoria del ciclón tropical Manuel (13-16 de septiembre 2013) antes y después de su entrada a tierra. Los puntos en color rojo representan posiciones cada 6 horas, con la intensidad (km/h) en su interior; asterisco es el sitio de entrada a tierra y cuadros azules son una selección de poblaciones. Las acumulaciones de lluvia (mm, 13-15 de septiembre) se indican con puntos verdes para estaciones meteorológicas con los 15 valores más altos en Guerrero. Elevaciones del terreno se indican mediante contornos de elevación del terreno cada 250 m. Las flechas negras indican la circulación del viento en el interior del ciclón. Fuente: elaboración propia.

Por la orientación de la topografía y la posición del centro de Manuel, al sur de Guerrero, se estableció un flujo atmosférico del Pacífico de forma perpendicular hacia la Sierra Madre del Sur. Ya que el desplazamiento del ciclón fue relativamente lento (8 km/h en promedio), el flujo estuvo presente por un periodo de al menos 3 días mientras que la entrada a tierra fue por Michoacán como tormenta tropical. Las lluvias máximas (575-1,000 mm) se concentraron, principalmente, en estaciones a lo largo de la costa. Un aspecto relevante es el desarrollo de Ingrid en el Golfo de México (Gráfica 3.2d), durante el periodo 12-17 de septiembre, que entró a Tamaulipas el día 16 como tormenta tropical. Existe la posibilidad de que esta configuración, entre Manuel al suroeste e Ingrid el noreste de México, haya resultado en mayor cantidad de humedad

y lluvia en Guerrero (Rosengaus-Moshinsky *et. al.* 2016). Como parte de una revisión adicional en nuestro estudio se utilizaron datos (North American Regional Reanalysis, http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rreanl/) para confirmar la convergencia de flujo húmedo en la costa de Guerrero. Esto concentró aire húmedo, sobre el centro y sur de México, un elemento favorable al desarrollo de sistemas de nubosidad profunda como los observados por satélite (Gráfica 3.3a) y lluvias al noreste de Manuel (Gráfica 3.4).

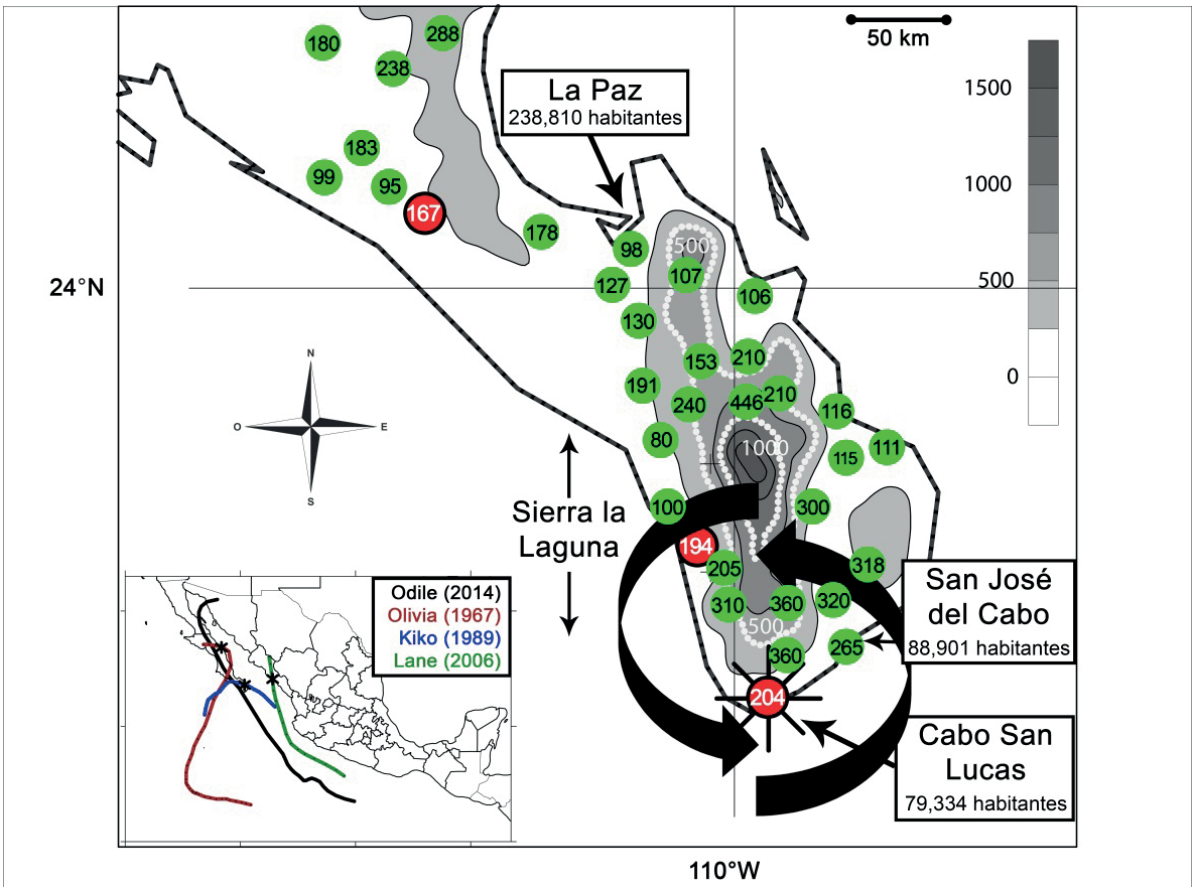
Otro efecto de la acumulación y duración de la lluvia, combinada con saturación y erosión del suelo en pendientes inclinadas, es la detección de deslizamientos de tierra (Ramírez-Herrera y Gaidzik, 2017). Esto resultó en 71 muertes (CENAPRED, 2015, p. 18) en una colina de La Pintada, Guerrero, a 60 km al noroeste de Acapulco. La estación del SMN más cercana (San Juan de las Flores, 25 km) registró 832 mm en 3 días y cada día superó 250 mm. La Pintada y San Juan de las Flores están en un municipio que, en 2010, tenía un IDH de 6.7 comparable al promedio del estado (Cuadro 3.2) y que contaba con 61 mil habitantes. En los datos de la estación, estos 3 días son los valores más altos del periodo 2011-2015 lo cual tiene un significado distintivo. Además, el estudio de Ramírez-Herrera y Gaidzik (2017) establece que, además de la lluvia en La Pintada, la disminución de vegetación por actividades de deforestación en una pendiente inclinada (históricamente) susceptible a deslizamientos fueron causas que iniciaron el deslizamiento.

Con respecto a deslizamientos, existe una analogía con el desarrollo del ciclón tropical Juliette (2001) en Baja California Sur. En un estudio sobre los factores que se presentaron durante el desarrollo de deslizamientos, Antinao y Farfán (2013) determinaron que las causas más probables fue la acumulación máxima de 677 mm en 3 días (387 en un solo día) así como la orientación, geología y vegetación del terreno. Aunque por la densidad de población relativamente baja en este estado, el impacto con respecto a la cantidad de afectados (3,800) y muertos (3) por el paso de Juliette fue limitado en EM-DAT.

3.7. Odile (10-18 septiembre, 2014)

El huracán Odile causó más de 75,000 afectados (Cuadro 3.1) además de proporcionar acumulaciones de lluvia mayores a 500 mm en el sur de la península. Viento mayor a

200 km/h (Berg and Kimberlain, 2015) provocó daños materiales en el municipio de Los Cabos que se estima contaba con 294 mil habitantes (Secretaría de Salud, 2014) concentrados en un par de ciudades costeras con economía dependiente del turismo: San José del Cabo y Cabo San Lucas (Gráfica 3.5). De acuerdo con CENAPRED (2016, p. 23), los daños fueron al turismo (42%) así como a la infraestructura hidráulica (9%) y eléctrica (9%). La energía eléctrica estuvo limitada hasta por 17 días mientras que se requirieron miles de trabajadores y vehículos especializados, así como cientos de plantas de emergencia para atender las necesidades de hospitales, albergues, comercios y hoteles (CFE, 2014).



Gráfica 3.5. Trayectoria del ciclón tropical Odile (15-16 de septiembre 2014) antes y después de su entrada a tierra. Los puntos en color rojo representan posiciones cada 6 horas, con la intensidad (km/h) en su interior y el asterisco es el sitio de entrada a tierra. Las acumulaciones de lluvia (mm, 14-16 de septiembre) se indican con puntos verdes para 33 estaciones meteorológicas. Elevaciones del terreno se indican mediante contornos de elevación del terreno cada 250 m. Las flechas indican la circulación del viento en el interior del ciclón. En el extremo inferior izquierdo se muestran la trayectoria de Odile y otros ciclones mencionados en el texto. Fuente: elaboración propia.

Aunque la intensidad máxima al pasar frente a la costa de Jalisco fue 222 km/h, se redujo a 204 km/h al llegar a la costa. Esto se encuentra en la categoría 3 para huracanes (a sólo 5 km/h del inicio de la categoría 4) y es comparable con la de otros ciclones que han afectado a la región en la cronología disponible (Cuadro 3.4). El valor máximo anterior al de Odile era 185 km/h asociado a Kiko que en 1989 cruzó la costa del Golfo de California (Gráfica 3.5). Odile llegó con la misma intensidad que Olivia en 1967 (NHC, 2014) así como la de Lane que en septiembre 2006 entró por Sinaloa para causar afectados y muertos debido a inundaciones y deslizamientos de tierra (Pasch *et. al.* 2009). Conviene recordar que Liza, en 1976, entró a tierra por Sinaloa (Gráfica 3.1) y causó 425 mm de lluvia acumulada.

Cuadro 3.4. Ciclones tropicales con impacto relevante en el noroeste de México

Año	Nombre	Estado	Intensidad[a]	Viento[b]	Lluvia[c]	Lluvia[d]
1967	Olivia	Baja California Sur	H3	204	142	125
1976	Liza	Sinaloa	H3	**208**	425	425
1989	Kiko	Baja California Sur	H3	185	302	302
2006	Lane	Sinaloa	H3	204	299	223
2014	Odile	Baja California Sur	H3	204	**548**	**480**

a = intensidad al entrar a tierra; DT depresión tropical, HN huracán categoría N
b = viento máximo al momento de entrar a tierra (km/h))
c = lluvia máxima acumulada (mm) en 3 días
d = lluvia máxima acumulada (mm) en 1 día
En negro el valor máximo por columna

La Gráfica 3.5 muestra una distribución de lluvia máxima sobre Sierra la Laguna que contrasta con acumulaciones menores (100-200 mm) en las planicies costeras. Aunque 5 de las 6 acumulaciones máximas ocurrieron al norte del estado (25-28°N), los daños a la población se concentraron entre La Paz y Los Cabos (CENAPRED, 2016, p. 22). Los patrones de acumulación en Sierra la Laguna fueron de hasta 446 mm además de una cantidad considerable de estaciones en el rango de 200-400 mm. Con respecto a la trayectoria del centro de Odile, la lluvia fue mayor sobre el centro o a la derecha de la circulación incidente lo que cubrió poblaciones pequeñas (500-1,000 habitantes) así como a La Paz, San José del Cabo y Cabo San Lucas que contaban con 239,000, 89,000 y 79,000 habitantes respectivamente (Secretaría de Salud, 2014). De esta forma, más de 400 mil habitantes estuvieron en riesgo de ser afectados directamente por el ciclón aunque los valores correspondientes de IDH son altos (7.0-8.2) en la península.

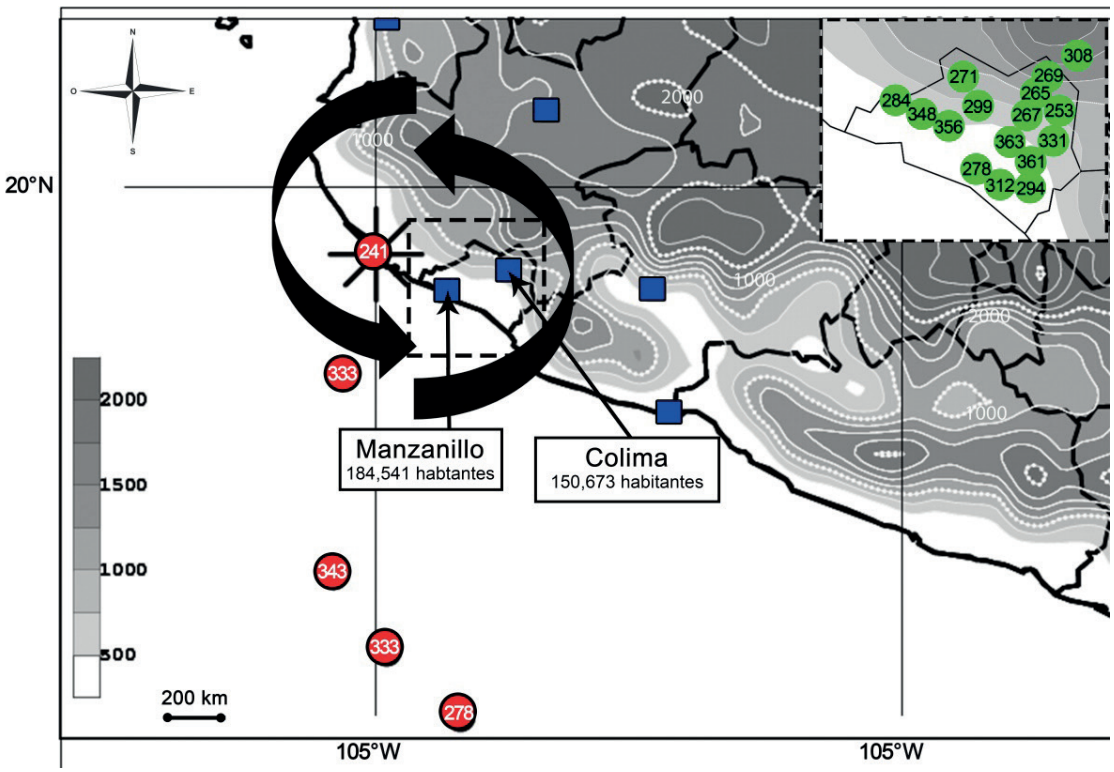
La lluvia acumulada en San José del Cabo fue 265 mm (90% de ella en 24 horas) mientras que en estaciones a su alrededor, con elevaciones de 200-400 m, se recolectaron 320-360 mm. Estos factores favorecieron el tránsito de corrientes de agua por una de las cuencas de mayor extensión y fuente principal de recursos hídricos en Baja California Sur (Martínez-Gutiérrez *et. al.*, 2010). Por otra parte, la duración del viento más intenso en Los Cabos (100-205 km/h) se extendió por al menos 6 horas para causar daños materiales considerables. Estos elementos son consistentes con la distribución de población afectada y daños materiales, por lluvia y viento, durante el paso de Odile sobre el sur del estado.

3.8. Patricia (20-24 de octubre, 2015)

Patricia llegó a Jalisco después de haber alcanzado viento máximo de 343 km/h en el Océano Pacífico (Gráfica 3.6), lo que representa 75 km/h sobre el valor en que inicia la categoría 5. La intensidad disminuyó al cruzar la costa y, aún más, mientras se desplazaba sobre Jalisco y Zacatecas. Aunque está clasificado como el huracán más fuerte de todas las cuencas oceánicas del mundo (Velden *et. al.* 2017, p. 977), su impacto resultó en daños moderados a viviendas así como a la infraestructura hidráulica y los sectores salud y educación de Colima, Jalisco y Michoacán (CENAPRED, 2017).

En Colima, las estaciones del SMN tuvieron los 15 valores más altos en el rango de 250-365 mm (Gráfica 3.6) lo cual representa una situación con cierto potencial de peligro pues, normalmente entre 1951-2010, las acumulaciones promedio en octubre fueron de 100-150 mm. En particular, en periodos de 24 horas, la estación del SMN en Comala recibió 368 mm en 1959 durante el paso del ciclón 12 (1959) así como 327 mm por Jova (2011) pero solamente 184 mm por Patricia (2015). Una posible explicación a la lluvia limitada está en el movimiento de traslación seguido por Patricia que fue tan rápido (30 km/h) durante su paso por la costa de manera que Jalisco se cruzó en solamente 6 horas. Así, las zonas de nubosidad permanecieron poco tiempo en pasar por las zonas de impacto.

En general, los municipios de la costa de Nayarit, Jalisco y Colima cuentan con valores de IDH en el rango de intermedio a alto (6.5-7.5) con respecto al promedio nacional



Gráfica 3.6. Trayectoria del ciclón tropical Patricia (23-24 de octubre 2015). Los puntos en color rojo representan posiciones cada 6 horas, con la intensidad (km/h) en su interior; el asterisco es el sitio de entrada a tierra y los cuadros azules son una selección de poblaciones. Elevaciones del terreno se indican mediante contornos de elevación del terreno cada 250 m. Las flechas indican la dirección del viento en el interior del ciclón. En el extremo superior derecho, con líneas punteadas, estaciones meteorológicas con lluvia (mm, 22-24 de octubre) para los 16 valores más altos en Colima y Jalisco. Fuente: elaboración propia.

y las poblaciones más grandes tienen menos de 250 mil habitantes. Estos datos son consistentes con que el impacto de los ciclones anteriores, incluyendo el de 1959, (Cuadro 3.5) no hayan causado desastres como los esperados de un huracán categoría 4 en regiones más pobladas. Por ejemplo, Jova (Gráfica 3.2b) llegó a la costa como huracán categoría 2 para causar 5 muertos y 50 mil afectados por deslizamientos tierra e inundaciones; mientras que en octubre de 2002, el huracán Kenna se asoció con 3 muertos y 9 mil afectados al entrar por Nayarit con categoría 4. Todos los ciclones del Cuadro 3.5 tuvieron recurvatura para llegar al continente.

Cuadro 3.5. Ciclones tropicales con impacto relevante en el suroeste de México

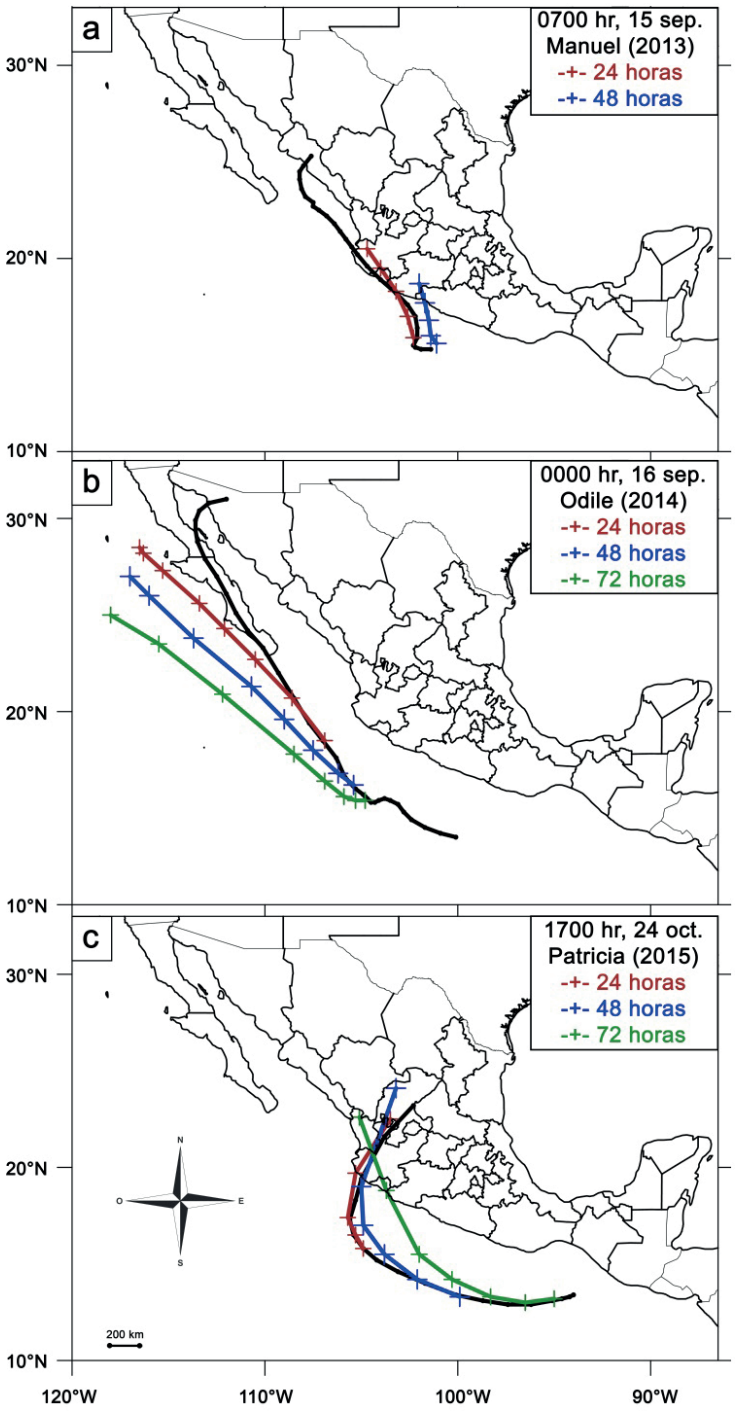
Año	Nombre	Estado	Intensidad[a]	Viento[b]	Lluvia[c]	Lluvia[d]
1959	12	Jalisco	**H5**	**259**	360	360
2002	Kenna	Nayarit	H4	222	260	232
2011	Jova	Jalisco	H2	157	**459**	**375**
2015	Patricia	Jalisco	H4	241	363	257

a = al entrar a tierra; DT depresión tropical, HN huracán categoría N
b = al momento de entrar a tierra (km/h)
c = máxima acumulada (mm) en 3 días
d = máxima acumulada (mm) en 1 día
En negro el valor máximo por columna

3.9. Pronósticos oficiales

Ante la posibilidad de que un ciclón tropical afecte a la población, y como una herramienta de uso práctico para las autoridades, las predicciones de trayectoria e intensidad son elaboradas de forma conjunta por el NHC y SMN. Se emiten cada 6 horas, contienen proyecciones de hasta 5 días (120 horas) y toman en cuenta modelos numéricos para generar un producto conocido como pronóstico oficial. La Gráfica 3.7 presenta una selección de pronósticos oficiales que se emitieron 24, 48 y 72 horas antes de la entrada a tierra de cada uno de los ciclones de interés.

Aunque Manuel no contó con un pronóstico a 72 horas antes de entrar tierra, pues se formó después; los pronósticos a 48 y 24 horas (Gráfica 3.7a) indicaban una región de impacto con intensidad 50-100 km/h al cruzar la costa. Comparados con las observaciones, estos pronósticos subestimaron la intensidad real en la costa (111 km/h) y esperaban que la zona de entrada a tierra fuera entre Michoacán y el oeste de Guerrero. Con anticipación, el NHC advirtió que, además de viento intenso la presencia de flujo de aire húmedo por la presencia de Manuel e Ingrid produciría lluvias intensas (250-375 mm, máximos de 635 mm) e inundaciones en Oaxaca y Guerrero (NHC, 2013). Entonces, de alguna forma, los deslizamientos en La Pintada eran una posibilidad en los escenarios esperados.



Gráfica 3.7. Selección de pronósticos oficiales de trayectoria durante el desarrollo de los ciclones tropicales Manuel (a), Odile (b) y Patricia (c) en el Océano Pacífico oriental. Las líneas marcan pronósticos 24, 48 y 72 horas antes de la entrada a tierra; los signos (+) indican la hora inicial así como en proyecciones a 12, 24, 36, 48, 72, 96 y 120 horas. La línea negra, gruesa es la trayectoria observada. Fuente: elaboración propia.

Odile fue un caso más difícil ya que presentó pronósticos con desplazamiento alejándose de la costa de forma que no habría punto de impacto directo en México (Gráfica 3.7b). En realidad, el centro del ciclón se internó en Baja California Sur, lo que implicó inconvenientes con respecto a la ejecución de preparativos en el municipio de Los Cabos. Además, representó una situación complicada pues el primer pronóstico con entrada a tierra se emitió a menos de 24 horas (y menos de 100 km) antes de llegar a tierra. En este pronóstico, Odile llegaría por Cabo San Lucas como huracán categoría 3 (189 km/h) por la costa occidental de la península y la cruzaría en el transcurso de 1-2 días. Se estimaban acumulaciones en el rango 150-310 mm con la posibilidad de un máximo de hasta 457 mm (NHC, 2014) y se emitieron alertas para el sur de la península, así como en parte de Sinaloa y Sonora.

El desarrollo de Patricia contó con mejores predicciones de trayectoria, como lo muestra la Gráfica 3.7c, pero no tanto con respecto a intensidad. A 72 horas antes de llegar a la costa, el pronóstico oficial correspondiente indicaba paso por Colima mientras que los siguientes pronósticos recurvaban hacia Jalisco. Durante su paso por la costa, la comparación entre pronósticos y observaciones resultó en errores de intensidad de 84, 56 y 9 km/h (menor a la intensidad real) para los pronósticos emitidos 72, 48 y 24 horas antes de la entrada a tierra, respectivamente. Por otra parte, se esperaban acumulaciones de lluvia en el rango 150-300 mm con algún máximo puntual hasta 500 mm así como inundaciones y la posibilidad de deslizamientos de tierra entre Nayarit y Guerrero (NHC, 2015).

3.10. Conclusiones

Se ha presentado un resumen del desarrollo de ciclones tropicales que afectaron a la costa occidental de México en 1959 así como durante el periodo 1970-2010. Aunque son varias las regiones afectadas se hizo énfasis en el noroeste (Baja California Sur, Sinaloa y Sonora), suroeste (Nayarit, Jalisco, Colima y Michoacán) y Sur (Michoacán, Guerrero y Oaxaca). Los ciclones 12 (1959), Liza (1976) y Pauline (1997) fueron casos históricos de referencia por su impacto respecto a la cantidad de afectados, muertos y daños económicos. Además de factores físicos (meteorológicos, geológicos e hidro-

lógicos), se encuentra la presencia de factores sociales (marginación, en particular) como elementos adicionales que ayudarían a explicar el impacto negativo en la población con alto grado de marginación social.

Se identificaron 85 ciclones entre 2011 y 2015 de los cuales 14 entraron a México causando al menos 370 mil afectados, 200 muertes y 8 millones de dólares en pérdidas. Se analizó el desarrollo del ciclón Manuel y de los huracanes (categoría 3 al entrar a tierra) Odile y (categoría 4) Patricia mediante un análisis de los aspectos físicos relacionados a la estructura de cada ciclón durante el paso por la costa. En particular, el viento máximo ocurrió al rango 111-241 km/h mientras que las lluvias acumuladas fueron de hasta 480 mm en un día (Odile) o 1,000 mm en 3 días (Manuel). La cantidad de habitantes afectados varió entre 15,000-105,000 con 14-169 muertes y aunque Patricia se convirtió en el ciclón tropical más intenso a escala global, solamente causó daños moderados en Jalisco, Colima y Michoacán.

Manuel fue el ciclón responsable del mayor número de afectados y daños en el periodo 2011-2015 pero causó menos muertes que en el caso de Pauline (1997) en Guerrero. Los afectados y daños resultaron por cantidades extraordinarias de lluvia, características del terreno así como por el desplazamiento (lento) al acercarse a la costa. Aunque no pasó directamente por zona de desastre, su centro estuvo a cientos de kilómetros de Guerrero y se pudo identificar una configuración en la que lluvia intensa se concentró sobre la costa. Por la mayor duración (horas a días) de la lluvia hubo más impacto en zonas con población con índices de marginación relativamente altos (IDH bajo), comparados con el resto de la costa occidental del país.

En general, es difícil predecir cómo, cuándo y dónde va a ocurrir un desastre pero sí es posible tener una idea del impacto (bajo, moderado o intenso, por ejemplo) al determinar la intensidad, duración del ciclón incidente así como las características geográficas (físicas y sociales) de la región de incidencia. Los pronósticos oficiales de trayectoria e intensidad, así como las estimaciones de lluvia acumulada, emitidos por el NHC y SMN son una herramienta para determinar escenarios ante situaciones en que se anticipa impacto directo en la costa pero se requiere de precaución en la interpretación de la información técnica. Existen limitaciones que, si

no son consideradas apropiadamente, pueden llegar a implicar toma de decisiones incorrectas.

Aunque no se puede evitar el paso de ciclones por zonas pobladas, los pronósticos oficiales que se emiten con varios (1-5) días de anticipación permiten contar con márgenes de error razonables para las necesidades de protección de la población. Esto ha favorecido la reducción en la cantidad de personas y bienes materiales afectados, que en el periodo 1970-2010, se reflejó con una mejor calidad de los pronósticos oficiales así como con el menor tiempo posible debido a que son publicadas en los medios de comunicación masiva.

3.11. Agradecimientos

El Servicio Meteorológico Nacional (México) proporcionó acceso al archivo históricos de observaciones de lluvia; la Universidad Católica de Lovaina (Bélgica) los reportes de afectados, muertes y daños; la Universidad de Wisconsin (Estados Unidos) las imágenes de satélite geoestacionario y NOAA/ESRL (Estados Unidos) los datos atmosféricos. Nayeli V. García (Departamento de Cómputo, CICESE) elaboró la versión final de las gráficas. Se agradece a la Unidad La Paz de CICESE por las facilidades otorgadas y a REDESClim (J.M. Rodríguez Esteves) por la invitación a presentar este trabajo.

3.12. Referencias

Antinao, J.L. and L.M. Farfán (2013), "Occurrence of landslides during the approach of tropical cyclone Juliette (2001) to Baja California Sur, Mexico". Atmósfera. 26(2): 183-208 p.

Berg, R. and T. Kimberlain (2015), "The 2014 eastern North Pacific hurricane season: A very active season brings devastation", *Weatherwise*, vol. 8, no. 3, pp. 36-45, https://doi.org/10.1080/00431672.2015.1022484

CENAPRED (2015), "Impacto socioeconómico del ciclón tropical *Manuel* en el estado de Guerrero el 15 y 16 de septiembre de 2013", *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en 2013*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, pp. 36-44.

CENAPRED (2016), "Impacto socioeconómico del ciclón tropical *Odile* en el estado de Baja California Sur, el 14 y 15 de septiembre de 2014", *Impacto Socioeconómico de los Principales*

Desastres Ocurridos en la República Mexicana en 2014, Centro Nacional de Prevención de Desastres, pp. 22-35.

CENAPRED (2017), "Impacto socioeconómico del ciclón tropical Patricia en el mes de octubre en los estados de Jalisco, Colima y Michoacán", *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en 2015,* Centro Nacional de Prevención de Desastres, pp. 42-53.

Cerveny, R.S., P. Bessemoulin, C.C. Burt, M.A. Cooper, Z. Cunjie, A. Dewan, J. Finch, R.L. Holle, L.Kalkstein, A. Kruger, T-c Lee, R. Martínez, M. Mohapatra, D. R. Pattanaik, T.C. Peterson, S. Sheridano, B. Trewin, A. Tait, and M.M. Abdel Wahab (2017), "WMO Assessment of Weather and Climate Mortality Extremes: Lightning, Tropical Cyclones, Tornadoes, and Hail", *Weather, Climate & Society,* vol. 9, no. 3, pp. 487–497, DOI: https://doi.org/10.1175/WCAS-D-16-0120.1

CFE (2014), "CFE restablece la totalidad del suministro de energía eléctrica en BCS", *Boletines de Prensa Comisión Federal de Electricidad*, [http://saladeprensa.cfe.gob.mx/boletines/show/8175/]

CRED (2017), "The constant influence of hurricanes", Centre for Research on the Epidemiology of Disasters" [http://cred.be/sites/default/files/CredCrunch49.pdf]

Emanuel, K. (2017), "Will global warming make hurricane forecasting more difficult?", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 98, pp. 495–501, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0134.1

Farfán, L.M., E.J. Alfaro and T. Cavazos (2013), "Characteristics of tropical cyclones making landfall in the Pacific coast of Mexico: 1970-2010", *Atmósfera*, vol. 26, no. 2, pp. 163-182.

Farfán, L.M., E.J. D'Sa, K-b. Liu and V.H. Rivera-Monroy (2014) , "Tropical cyclone impacts on coastal regions: the case of the Yucatán and the Baja California Peninsulas, Mexico", *Estuaries and Coasts*, Springer, vol. 37, no. 6, pp. 1388-1402, http://dx.doi.org/10.1007/s12237-014-9797-2

González-Baheza, A. and O. Arizpe (2017), "Vulnerability assessment for supporting sustainable coastal city development: a case study of La Paz, Mexico", Climate and Development, http://dx.doi.org/10.1080/17565529.2017.1291406

Gunther, E. B. (1977), "Eastern Pacific tropical cyclones of 1976", Monthly Weather Review, vol. 105, pp. 508-522.

Jáuregui, E. (2003), "Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico", Atmósfera, vol. 16, pp. 193-204.

H. Ayuntamiento Constitucional de Acapulco de Juárez (2015), "Actualización del Plan Director de Desarrollo Urbano de Acapulco de Juárez, Guerrero", S*ecretaría de Desarrollo Urbano y Obras Públicas*, http://www.acapulco.gob.mx/transparencia/descargar.php?d=/transparencia/wp-content/uploads/marcojuridico/planes/PLAN_DIRECTOR_DE_DESARROLLO_URBANO_2015.pdf

INEGI (2015), "Anuario Estadístico y Geográfico de Guerrero", [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825076900.pdf]

Latorre, C. and L. Penilla (1988), "Influencia de los ciclones en la precipitación de Baja California Sur", *Atmósfera*, vol. 1, pp. 99-112.

Martínez Robles, C.L. (2016), "Estimación de la convección y lluvia asociadas a ciclones tropicales mediante sistemas de percepción remota", Tesis de Maestría en Ciencias en Hidrometeorología, *Universidad de Guadalajara*, 73 pp.

Martínez-Gutiérrez G., J. J. Díaz-Gutiérrez y O. Cosío-González (2010), "Análisis morfométrico en la cuenca hidrológica San José del Cabo, B.C.S., México: una aproximación en la identificación de potenciales áreas de captura", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 27, pp. 581-592.

Morales Hernández, R (2015), "Análisis regional de la marginación en el estado de Guerrero, México", *Papeles de Población*, vol. 21, no. 84, pp. 251-274.

NHC (2013), *Hurricane Manuel Advisory Archive*, National Hurricane Center, [http://www.nhc.noaa.gov/archive/2013/MANUEL.shtml?]

NHC (2014), *Hurricane Odile Advisory Archive*, National Hurricane Center, [http://www.nhc.noaa.gov/archive/2014/ODILE.shtml?]

NHC (2015), *Hurricane Patricia Advisory Archive*, National Hurricane Center [http://www.nhc.noaa.gov/archive/2015/PATRICIA.shtml?]

Padilla Lozoya R. (2006). "El huracán de 1959, historia del desastre y reconstrucción de Minatitlán, Colima", *Universidad de Colima*, 180 pp.

Pasch, R. J., E.S. Blake, L.A. Avila, J.L. Beven, D.P. Brown, J.L. Franklin, R.D. Knabb, M.M. Mainelli, J.R. Rhome and S.R. Stewart (2009), "Eastern North Pacific hurricane season of 2006", *Monthly Weather Review*, vol. 137, pp. 3–20, doi:https://doi.org/10.1175/2008MWR2508.1.

Pedrozo-Acuña, A., J. A. Breña-Naranjo, and R. Domínguez-Mora (2014), "The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico", *Weather*, vol. 69, pp. 295–302, doi:https://doi.org/10.1002/wea.2355.

PNUD (2014), "Índice de Desarrollo Humano Municipal en México", Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [http://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/library/poverty/idh-municipal-en-mexico--nueva-metodologia.html]

Ramírez-Herrera, M.T. and K. Gaidzik (2017), "La Pintada landslide-A complex double-staged extreme event, Guerrero, Mexico", *Cogent Geoscience*, vol. 3, pp. 1-20. https://doi.org/10.1080/23312041.2017.1356012

Rodríguez Esteves, J. M. (2017), "Los desastres recurrentes en México: El huracán Pauline y la tormenta Manuel en Acapulco, Guerrero", *Anuario Electrónico de Estudios en Comuni-*

cación Social "Disertaciones", vol. 10, no. 2, pp. 133-152, http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/disertaciones/a.4778

Rosengaus-Moshinsky, M., Arreguín-Cortés, F. I., Korenfeld- Federman, D. y Rubio-Gutiérrez, H. (2016), "Visión panorámica de las precipitaciones pluviales combinadas por los efectos de los ciclones tropicales Ingrid-Manuel", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 7, no. 6, pp. 73-92.

Saffir, H.S. (2003), "Communicating damage potentials and minimizing hurricane damage", R. Simpson (ed.), *Hurricane! Coping with disaster*, American Geophysical Union, pp. 155-164.

Secretaría de Salud (2014), "Tarjetero Estadístico Ejecutivo 2014", Población 2014, Gobierno de Baja California Sur, pp. 4-5 [http://www.saludbcs.gob.mx/estadistica/Tarjetas Estadisticas Ejecutivas 2014.pdf]

Serra, S. (1971), "Hurricanes and tropical storms of the west coast of Mexico", *Monthly Weather Review*, vol. 99, pp. 208–302.

Voigt, S., F. Giulio-Tonolo, J. Lyons, J. Kucera, B. Jones, T. Schneiderhan, G. Platzeck, K. Kaku, M. K. Hazarika, L. Czaran, S. Li, W. Pedersen, G. K. James, C. Proy, D.M. Muthike, J. Bequignon and D. Guha-Sapir (2016), "Global trends in satellite-based emergency mapping", *Science*, vol. 353, no. 6296, pp. 247-252. DOI: 10.1126/science.aad8728.

Velden, C., T. Olander, D. Herndon and J.P. Kossin (2017), "Reprocessing the most intense historical tropical cyclones in the satellite era using the advanced Dvorak technique", *Monthly Weather Review*, vol. 145, pp. 2049-2069, https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0312.1

Villanueva González, E. (2004), "El ciclón Liza. Historia de los huracanes en BCS. La Paz, México", Universidad Autónoma de Baja California Sur, 227 pp. ISBN-968-896-141-8.

MÉTODOS PARA LA GENERACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE BASES DE DATOS, METADATOS Y VISUALIZACIONES CARTOGRÁFICAS DE CLIMA EXTREMO, BIOCLIMA Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE TABASCO Y ÁREAS ADYACENTES, MÉXICO

4

Métodos para la generación y organización de bases de datos, metadatos y visualizaciones cartográficas de clima extremo, bioclima y cambio climático en el estado de Tabasco y áreas adyacentes, México

Agustín Fernández Eguiarte[1]*; Carolina Ivonne Castelán Hernández[2]*; Ángel Valentín Bautista Durán[3]*; Rosa Irma Trejo Vázquez[4] **; Jorge Zavala Hidalgo[5]; Rosario Romero Centeno[6]*

4.1. Resumen

Se desarrollaron bases de datos, metadatos y visualizaciones cartográficas en el estado de Tabasco, México y áreas adyacentes de variables climáticas básicas y de escenarios de cambio climático que sirven de base para la generación de propuestas de investigación e interpretación de la información ambiental actual y para la simulación de escenarios futuros en diferentes escalas espacio-temporales en la región.

1 E-mail: agustin@atmosfera.unam.mx; ORCID: 0000-0001-5587-9188
2 E-mail: ccastelanh@atmosfera.unam.mx; ORCID: 0000-0001-8910-8023
3 E-mail: angelv.bautista@atmosfera.unam.mx; ORCID: 0000-0003-2033-4406
4 E-mail: itrejo@igg.unam.mx; Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México, México; (55) 5623 0222 ext. 45457; ORCID: 0000-0002-3199-6328
5 E-mail: jzavala@atmosfera.unam.mx; ORCID: 0000-0002-2737-434X
6 E-mail: rosario@atmosfera.unam.mx; ORCID: 0000-0003-3840-5655
* Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Ciudad de México, México
** Miembro de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim)

El proyecto se desarrolló con los datos observados en 178 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) localizadas en el estado de Tabasco, México y áreas adyacentes, para los períodos 1921 a 2010 y 1961 a 2000. Se aplicó un control de calidad a los datos y se generaron bases de datos geoespaciales en malla con muy alta resolución espacial (30" x 30", aproximadamente 926 m x 926 m) a las que se incorporó el efecto de la topografía.

Con las bases de datos climáticas de la región para el período 1961 a 2000, conjuntamente con datos de tres Modelos de Circulación General (MCG) del *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* propuestos en el reporte de la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se generaron escenarios de cambio climático regionalizados.

Se describe la importancia de un repositorio geoespacial que explica los procesos empleados para el desarrollo de las bases de datos mediante metadatos estructurados en un estándar geográfico internacional. El repositorio permite la descarga de las bases de datos y sus visualizaciones cartográficas.

Palabras clave: bases de datos, metadatos, variables climáticas, escenarios de cambio climático, Tabasco.

4.2. Introducción

Se describen los métodos implementados para el desarrollo de bases de datos de temperatura máxima, mínima y precipitación promedio mensual, así como de climatología extrema, parámetros bioclimáticos y escenarios de cambio climático para el estado de Tabasco y áreas adyacentes, que sirven de base para la toma de decisiones en la reducción de riesgo de desastres asociados a eventos hidrometeorológicos y climáticos, así como para la generación de propuestas de investigación en materia ambiental y para la generación de proyectos de investigación regionales bajo condiciones de cambio climático.

En este trabajo se abordan algunos aspectos del proyecto denominado "Bioclima, cambio climático y ecosistemas en el estado de Tabasco y áreas adyacentes, México. (Bases de datos, metadatos y visualizaciones cartográficas)" de Fernández *et. al.* (2017a) el cual se encuentra disponible en línea y es el fundamento y referencia central de este trabajo.

El proyecto se desarrolló con los datos observados en 178 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2018) localizadas en el estado de Tabasco, México y áreas adyacentes. Se aplicó un control de calidad a los datos y se generaron bases de datos de variables climáticas geoespaciales en una malla con muy alta resolución espacial (30" x 30", aproximadamente 926 m x 926 m) a las que se incorporó el efecto de la topografía.

Con las bases de datos climáticas de la región y conjuntamente con datos de tres Modelos de Circulación General (MCG), se generaron escenarios de cambio climático regionalizados que incluyen a las Áreas Naturales Protegidas de Pantanos de Centla y de Laguna de Términos.

Se calcularon las bases de datos de 19 parámetros bioclimáticos con base en los algoritmos correspondientes y los datos de las variables climáticas generadas.

El estudio sobre clima extremo regional se desarrolló con los datos de temperatura máxima y mínima extrema absoluta observada y con los de precipitación máxima extrema acumulada mensual. También se generaron las mallas de temperatura máxima de las máximas mensuales, de temperatura mínima de las mínimas mensuales y de precipitación máxima acumulada mensual, para con ellas establecer las regiones y los meses en que ocurren dichas temperaturas y precipitaciones, y para usarlas como referencia en el control de calidad de las extremas absolutas observadas, conforme a la metodología descrita por Fernández *et al.* (2012).

Las bases de datos climáticas de bioclima y clima extremo se desarrollaron para el período climático 1921 a 2010, a partir de los datos de la base climatológica diaria del SMN emitida en julio de 2012.

Se desarrollaron escenarios de cambio climático de tres MCG, del *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5, 2018), propuestos en el reporte de la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INECC, 2012). Los incrementos de cambio de los MCG se tomaron de la componente "Bases de datos" (Fernández *et al*., 2015b) del proyecto "Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación" (Fernández *et al*., 2015a), los cuales se procesaron a la resolución espacial de 30" x 30", aproximadamente 926 m x 926 m y se regionalizaron al referirlos a datos observados de las estaciones climáticas en la región, previamente sometidas a un proceso de control de calidad.

El período climático de referencia para los escenarios de cambio climático fue de 1961 al 2000 debido a que los MCG fueron referidos originalmente a ese mismo período. Las variables de cambio climático de los MCG procesadas son temperatura media mensual y precipitación mensual.

El horizonte considerado en los MCG es del año 2015 al 2039 para los forzamientos radiativos o Trayectorias Representativas de Concentraciones (RCP, por sus siglas en inglés) 4.5 y 8.5.

Con los datos de los escenarios de cambio climático generados se calcularon promedios mensuales e incrementos de cambio entre los promedios de escenarios de cambio climático y las climatologías mensuales regionales de referencia. Por último se calcularon porcentajes de cambio climático.

Con el objeto de documentar las bases de datos se estructuraron metadatos geoespaciales en el estándar internacional *Geographic information Metadata XML schema ISO/TS 19139-2:2012* (International Organization for Standardization [ISO], 2018).

Los metadatos se desarrollaron mediante la tecnología *GeoNetwork opensource* (GeoNetwork, 2018) y con ellos se estructuró el repositorio interoperable en Acceso Abierto (DOF, 2014) denominado "repositorio geoespacial de bioclima, cambio climático y ecosistemas en el estado de Tabasco y áreas adyacentes, México" (Fernández

et. al., 2017b) el cual utiliza el protocolo: Open Archives Initiative Protocol for Metadata Harvesting (Cornell University Library, 2018) para establecer la interoperabilidad con acervos digitales de otros repositorios.

En el Cuadro 4.1 se especifica el número de bases de datos, formatos y el número de visualizaciones cartográficas desarrolladas en el proyecto, así como el número de metadatos estructurados para cada uno de los temas desarrollados.

Cuadro 4.1. Número de bases de datos, formatos y número de visualizaciones cartográficas desarrolladas, así como el número de metadatos estructurados.

Temas	Bases de datos	Formatos	Metadatos	Visualizaciones cartográficas
Estaciones climatológicas, períodos 1921-2010 y 1961-2000	5	SHP	1	1
Bases de datos climáticas mensuales, período 1921-2010	36	GeoTIFF yTXT	3	36
Parámetros bioclimáticos, período 1921-2010	19	GeoTIFF y TXT	1	19
Climatología extrema, período 1921-2010	9	GeoTIFF y TXT	1	9
Escenarios de cambio climático regionales de temperatura media y precipitación mensual	288	GeoTIFF y TXT	2	288
Bases de datos climáticas mensuales de referencia, período 1961-2000	24	GeoTIFF y TXT	1	24
Promedios mensuales de escenarios de cambio climático	48	GeoTIFF y TXT	1	48
Incrementos de cambio entre los promedios mensuales de escenarios de cambio climáticoy las climatologías de referencia	48	SHP	1	48
Porcentajes mensuales de cambio de escenarios de cambio climático	48	GeoTIFF y TXT	1	48
Totales:	525		12	521

Fuente: modificado de Fernández *et. al.* (2017a, p. 22)

Las bases de datos y sus metadatos se encuentran disponibles para su descarga en Fernández *et. al.* (2017c) o mediante el propio repositorio geoespacial de Fernández *et. al.* (2017b).

4.3. Estaciones climatológicas y control de calidad. Períodos 1921-2010 y 1961-2000

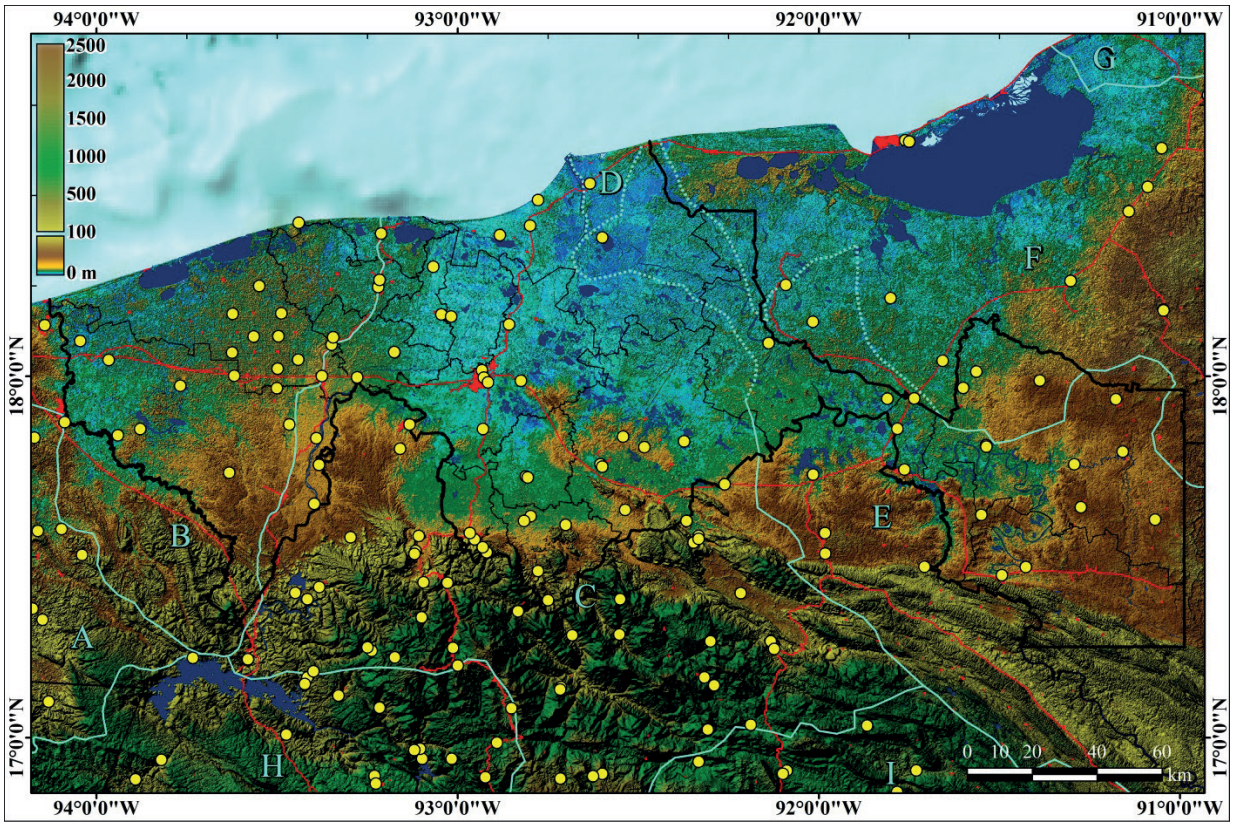
Con los datos observados en forma no continua durante el período 1921 a 2010, en 178 estaciones climatológicas localizadas en el estado de Tabasco y áreas adyacentes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2018) a los que se les aplicó un control de calidad, se desarrollaron y visualizaron bases de datos geoespaciales en malla sobre climatología, bioclima y clima extremo con muy alta resolución espacial (30" x 30", aproximadamente 926 m x 926 m) a las que se incorporó el efecto de la topografía.

Asimismo se sometieron a un proceso de control de calidad los datos observados durante el período 1961 a 2000 de dichas estaciones, con el objeto de generar las climatologías mensuales de temperatura media y precipitación que sirvieron de referencia para regionalizar los escenarios de cambio climático (Fernández *et. al.*, 2017a, p. 52).

Los períodos de registro de temperatura máxima, mínima y precipitación de la totalidad de la base climatológica diaria del SMN, entre las que se encuentran las 178 estaciones climatológicas regionales utilizadas para este estudio no cuentan con ningún registro anterior a 1921. Ver: Fernández *et. al.* (2017a, pp. 54-56). Mientras que en la Gráfica 4.1, se observa la distribución geográfica de las estaciones en el área de estudio.

Las metodologías desarrolladas en el procesamiento y control de calidad de la base climatológica diaria del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2018) emitida en julio de 2012, utilizadas en el desarrollo de las bases de datos del presente estudio, corresponden a las publicadas en el artículo "Metodologías empleadas en el Atlas Climático Digital de México para la generación de mapas de alta resolución" (Fernández *et al.*, 2014).

Se calcularon los promedios mensuales de temperatura y de precipitación acumulada mensual de cada estación, para los períodos 1921-2010 y 1961-2000 a partir de la base climatológica diaria del SMN. Para la precipitación se consideraron solo las estaciones con más del 90 % de datos diarios por mes.



Gráfica 4.1. Distribución espacial en el área de estudio de 178 estaciones climatológicas del SMN con datos para el período 1921 a 2010. Cuencas: A) Río Coatzacolacos, B) Río Tonalá y Lagunas del Carmen y Machona, C) Río Grijalva – Villahermosa, D) Isla, E) Río Usumacinta – Chixoy, F) Laguna de Términos, G) Río Champotón, H) Río Grijalva – Tuxtla Gutiérrez, I) Río Lacantum. Fuente: modificado de Fernández *et. al.*, (2017a, p. 53)

Se obtuvieron las diferencias entre los promedios mensuales de cada estación y el valor correspondiente en la superficie climática mensual promedio de la base *WorldClim* para el período 1950-2000 (WorldClim, 2018) documentada por Hijmans *et al.* (2005), la cual interpola superficies climáticas a muy alta resolución espacial (30" x 30", aproximadamente 926 m x 926 m) considerando el efecto topográfico conforme al Modelo Digital de Elevación denominado *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de 90 m de resolución espacial (CGIAR-CSI, 2018).

Del conjunto de diferencias se eliminaron las estaciones cuyos valores resultaron por encima o por debajo de la media ± 2 desviaciones estándar para cada variable en su mes correspondiente. En el Cuadro 4.2 se indica el número de estaciones después y antes del control de calidad, para cada variable en su período correspondiente.

Cuadro 4.2. Número de estaciones después y antes del control de calidad para cada variable en su período correspondiente

Mes	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Precipitación	Temperatura media	Precipitación
	(1921-2010)	(1921-2010)	(1921-2010)	(1961-2000)	(1961-2000)
Enero	144 de 153	140 de 153	164 de 178	144 de 151	159 de 174
Febrero	142 de 153	144 de 153	166 de 178	145 de 151	161 de 174
Marzo	143 de 152	140 de 152	167 de 178	139 de 149	164 de 175
Abril	147 de 153	141 de 153	166 de 178	141de 150	161 de 175
Mayo	142 de 153	142 de 153	167 de 178	142 de 150	164 de 175
Junio	147 de 154	145 de 154	167 de 178	141 de 151	164 de 175
Julio	149 de 153	141 de 153	168 de 178	140 de 150	163 de 175
Agosto	147 de 153	143 de 153	170 de 178	140 de 150	167 de 175
Septiembre	146 de 153	144 de 153	166 de 178	142 de 150	164 de 175
Octubre	143 de 153	141 de 153	166 de 178	143 de 150	164 de 175
Noviembre	142 de 153	141 de 153	164 de 178	145 de 150	163 de 175
Diciembre	145 de 154	146 de 154	165 de 178	144 de 150	162 de 175

Fuente: Fernández *et. al.* (2017a, p. 58)

4.4. Bases de datos climáticas. Períodos 1921-2010 y 1961-2000

Se realizó la interpolación espacial de las diferencias mensuales por estación obtenidas después del control de calidad y se estructuraron mallas con resolución espacial de 30" x 30" utilizando el método IDW1 conforme a las metodologías descritas en Fernández *et. al.* (2014).

Las mallas de diferencias interpoladas se sumaron a las correspondientes superficies mensuales de *WorldClim* para de esta forma generar las bases de datos climáticas regionales de temperatura máxima, mínima y precipitación promedio mensuales para el período 1921-2010 que incorporan el efecto topográfico.

En forma similar se procesaron y generaron las bases de datos climáticas regionales 1961-2000 de referencia para el desarrollo de los escenarios de cambio climático regionalizados. Las bases de datos se georreferenciaron y estructuraron en formatos txt y GeoTIFF.

Las bases de datos climáticas para los períodos 1921 a 2010 y 1961 a 2000 y sus correspondientes metadatos, se pueden acceder en Fernández *et. al.* (2017b; 2017c). Las visualizaciones cartográficas de las bases de datos climáticas del período 1921 a 2010 se pueden visualizar en Fernández *et. al.* (2017a, pp. 63-100; 2017b), mientras que las bases de datos climáticas para el período 1961 a 2000 se visualizan en Fernández *et. al.* (2017a, pp. 145-170; 2017b).

4.5. Parámetros bioclimáticos. Período 1921-2010

Los parámetros bioclimáticos son de utilidad para estudiar la relación entre el clima y la distribución de los seres vivos (Rivas, 2018). Con los promedios mensuales de temperatura y de precipitación acumulada mensual para el período 1921-2010, se calcularon 19 parámetros bioclimáticos por estación meteorológica, conforme a la metodología de la *Australian National University* (ANU, 2018) también utilizada en *WorldClim* y descrita en Fernández *et. al.* (2012, pp. 102-104). Los parámetros bioclimáticos calculados son: 1.Temperatura media anual, 2. Rango de temperatura media anual, 3. Isotermalidad, 4. Estacionalidad de la temperatura, 5. Temperatura máxima del mes más cálido, 6. Temperatura mínima del mes más frío, 7. Rango de temperatura anual, 8. Temperatura promedio del trimestre más lluvioso, 9. Temperatura promedio del trimestre más seco, 10. Temperatura promedio del trimestre más cálido, 11. Temperatura promedio del trimestre más frío, 12. Precipitación anual, 13. Precipitación del mes más lluvioso, 14. Precipitación del mes más seco, 15. Estacionalidad de la precipitación, 16. Precipitación del trimestre más lluvioso, 17. Precipitación del trimestre más seco, 18. Precipitación del trimestre más cálido, 19. Precipitación del trimestre más frío.

Los trimestres: más lluvioso (agosto, septiembre y octubre), más seco (febrero, marzo y abril), más cálido (abril, mayo y junio) y más frío (diciembre, enero y febrero) se obtuvieron de los datos mensuales de las estaciones climatológicas regionales.

Para generar la superficie del parámetro bioclimático se calculó la diferencia entre el bioclimático de la estación y el valor correspondiente sobre la superficie de *WorldClim*.

Se aplicó un control de calidad eliminando las estaciones con valores de las diferencias por encima o por debajo de la media ± 2 desviaciones estándar y se realizó la interpolación espacial de las diferencias restantes utilizando el método IDW1, con una resolución espacial de 30" x 30", aproximadamente 926 m x 926 m.

La malla obtenida se sumó a la superficie de referencia *WorldClim* y se obtuvo la base de datos de cada parámetro bioclimático georreferenciada y estructurada en formatos txt y GeoTIFF que considera el efecto de la topografía.

Las bases de datos de los parámetros bioclimáticos para el período 1921 a 2010 y sus correspondientes metadatos, se pueden acceder en Fernández *et. al.* (2017b; 2017c). Las visualizaciones cartográficas de las bases de datos se pueden visualizar en Fernández *et. al.* (2017a, pp. 106-124; 2017b).

4.6. Climatología extrema en el período 1921-2010

Las bases de datos de temperatura máxima y mínima extrema absoluta, así como la de precipitación máxima extrema acumulada mensual, se desarrollaron a partir de los datos extremos absolutos de las estaciones regionales de la base climatológica diaria del Servicio Meteorológico Nacional para el período 1921-2010, emitida en julio de 2012.

La precipitación acumulada mensual por estación se calculó considerando solo las estaciones que tienen más del 90% de datos diarios por mes.

Para su procesamiento y control de calidad se utilizó una metodología similar a la empleada en la generación de las bases climatológicas, sin embargo las diferencias se obtuvieron entre los valores máximos absolutos de cada estación y las correspondientes superficies de temperatura máxima de las máximas mensuales, de temperatura mínima de las mínimas mensuales y de precipitación máxima de las máximas mensuales, obtenidas a partir de las superficies climáticas del período 1921-2010.

Adicionalmente se generaron bases de datos de las regiones de la zona de estudio del mes en que ocurren la temperatura máxima de las máximas mensuales, la temperatura mínima de las mínimas mensuales y la precipitación máxima de las máximas mensuales.

Las bases de datos de climatología extrema en el período 1921 a 2010 y sus correspondientes metadatos, se pueden acceder en Fernández *et. al.* (2017b; 2017c), mientras que sus correspondientes visualizaciones cartográficas se pueden visualizar en Fernández *et. al.* (2017a, pp. 130-138; 2017b).

4.7. Escenarios de cambio climático regionales

Se seleccionaron tres Modelos de Circulación General del CMIP5 propuestos en el reporte de la Quinta Comunicación Nacional de México ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Los incrementos de cambio de los MCG se tomaron de la componente "Bases de datos" (Fernández *et. al.*, 2015b) del proyecto "Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación" (Fernández *et. al.*, 2015a). Los modelos son: MPI-ESM-LR (Max-Plank Institute) de Alemania, GFDLCM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) de Canadá y HADGEM2-ES (Met Office Hadley) del Reino Unido.

Los MCG se procesaron y estructuraron con resolución espacial de 30" x 30", aproximadamente 926 m x 926 m y se les incorporó el efecto de la topografía. La climatología de referencia fue la generada a partir de datos climáticos regionales observados en el período 1961-2000 en 175 estaciones de la base climática diaria del Servicio Meteorológico Nacional y las variables de cambio climático de los MCG procesadas son temperatura media mensual y precipitación mensual.

4.8. Forzamientos radiativos y horizontes a futuro

Los escenarios de cambio climático son proyecciones climáticas bajo diferentes escenarios de forzamiento radiativo. El término forzamiento radiativo ha sido utilizado por

el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2013, p. 202), con el sentido específico de un proceso que altera el balance energético del sistema climático global o parte de él. Los forzamientos radiativos o Trayectorias Representativas de Concentraciones pueden tomar valores de 4.5, 6.0 y 8.5 (RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5) y se expresan en watts/m^2.

Los escenarios de cambio climático regionalizados para del estado de Tabasco y áreas adyacentes, México, se estructuraron para los forzamientos radiativos RCP 4.5 y RCP 8.5, considerando los horizontes a futuro: 2015-2039 (25 años) y 2075-2099 (25 años) conforme a la siguiente metodología.

El período climático de referencia original de los MCG es el de 1961 a 2000 y los correspondientes incrementos de cambio se obtuvieron de (Fernández *et. al.*, 2017c), sin embargo los MCG fueron regionalizados al referirlos a la climatología generada con datos regionales observados en el período 1961 a 2000.

Los arreglos matriciales de incremento de cambio, conforme a lo descrito en Fernández *et. al.* (2017a, p. 142) no se interpolaron, se subdividieron en arreglos de 30" x 30" con el objeto de conservar los valores de los datos originales de cada MCG en las nuevas mallas de alta resolución espacial y para hacerlos simétricos en número de columnas y renglones de las bases de datos climáticas de referencia para el período 1961-2000.

Los arreglos matriciales de incremento de cambio se sumaron a las correspondientes climatologías mensuales regionales de referencia, para de esta forma generar las bases de datos de temperatura media promedio mensual y de precipitación mensual de escenarios de cambio climático, georreferenciadas en formatos GeoTIFF y txt, en muy alta resolución espacial (30" x 30") y que consideran el efecto del relieve topográfico.

La topografía del territorio es un factor muy importante que no es tomado en cuenta en los MCG pero que sí está considerado en las climatologías regionales de referencia. Al sumar los incrementos de cambio de los MCG a dichas climatologías, se incorpora el efecto topográfico y se obtiene una mejor distribución espacial de la variable considerada en un escenario de cambio climático.

Las bases de datos climáticas mensuales para el período 1961 a 2000, utilizadas como referencia de los escenarios de cambio climático regionales, así como las bases de datos de los propios escenarios de cambio climático y sus correspondientes metadatos, se pueden acceder en Fernández *et. al.* (2017b; 2017c), mientras que sus correspondientes visualizaciones cartográficas se pueden visualizar en Fernández *et. al.* (2017a, pp. 145-170; 2017b).

4.9. Promedios mensuales de escenarios de cambio climático. Horizonte 2015-2039

Se generaron bases de datos mensuales de promedios de temperatura media y precipitación de los MCG seleccionados y para los forzamientos radiativos RCP 4.5 y RCP 8.5.

Las bases de datos de promedios mensuales de escenarios de cambio climático, para el horizonte 2015-2039 y sus correspondientes metadatos, se pueden acceder en Fernández *et. al.* (2017b; 2017c), mientras que sus correspondientes visualizaciones cartográficas se pueden visualizar en Fernández *et. al.* (2017a, pp. 510-563; 2017b).

4.10. Cambios entre las climatologías mensuales regionales de referencia del período 1961-2000 y los promedios mensuales de escenarios de cambio climático, horizonte 2015-2039

Se generaron bases de datos vectoriales mensuales de cambio de la temperatura media y de precipitación, mediante la diferencia entre los promedios de escenarios de cambio climático, horizonte 2015-2039 y las correspondientes climatologías mensuales regionales de referencia del período 1961-2000. Se establecieron isotermas e

isoyetas de incrementos de cambio cada 0.1 °C para la temperatura media y cada 5 mm para la precipitación.

Las correspondientes visualizaciones cartográficas mensuales de referencia de temperatura media y de precipitación 1961-2000 se utilizaron como fondo para el trazo de las curvas.

Las bases de datos de cambios entre los promedios mensuales de escenarios de cambio climático, horizonte 2015-2039 y las climatologías mensuales regionales de referencia del período 1961-2000, así como sus correspondientes metadatos se pueden acceder en Fernández *et. al.* (2017c; 2017b), mientras que sus correspondientes visualizaciones cartográficas se pueden visualizar en Fernández *et. al.* (2017a, pp. 568-621; 2017b).

4.11. Porcentajes mensuales de cambio climático. Horizonte 2015-2039

Las bases de datos de porcentajes mensuales de incremento de cambio de temperatura media y de precipitación se calcularon mediante la siguiente relación:

(Δ cambio * 100) / (Climatología mensual regional de referencia del período 1961-2000)

En donde: Δ cambio, es el incremento de cambio entre los promedios mensuales de escenarios de cambio climático, horizonte 2015-2039 y las correspondientes climatologías mensuales regionales de referencia del período 1961-2000.

Se establecieron cinco rangos de porcentajes de cambio para la temperatura media: < 4 a 4.9%, 5 a 5.9 %, 6 a 6.9 %, 7 a 8.9 % y 9 a 12% y seis rangos para el caso de la precipitación: < 20 %, -11 a -19 %, -1 a -10 %, 0 a 10 %, 11 a 19 % y >20 %.

Las bases de datos de porcentajes mensuales de cambio climático para el horizonte 2015 a 2039, así como sus correspondientes metadatos se pueden acceder en Fernández *et. al.* (2017c; 2017b), mientras que sus correspondientes visualizaciones cartográficas se pueden visualizar en Fernández *et. al.* (2017a, pp. 626-679; 2017b).

4.12. Conclusiones

Los avances en materia de procesamiento, estructuración y difusión de datos y metadatos de información climática y de cambio climático estructurados en repositorios de datos científicos en Acceso Abierto interoperables, contribuyen a fortalecer la infraestructura científica y tecnológica del país.

El Acceso Abierto tiene como finalidad el suministro de acceso público a investigaciones, materiales educativos, académicos, científicos, tecnológicos, de innovación y culturales, a través de plataformas digitales. Las políticas de Acceso Abierto son el resultado de un amplio movimiento internacional cuyos principios fueron formalizados en las declaraciones de Budapest en 2002, Bethesda 2003 y Berlín 2003 (citado en San José Montano, 2009). En sus orígenes estas políticas estuvieron centradas en garantizar la disponibilidad de artículos publicados en revistas académicas arbitradas. En la actualidad se ha extendido a todo tipo de investigaciones, materiales educativos, académicos, científicos, tecnológicos, de innovación y culturales, entre otros, a los datos climáticos y de cambio climático.

La información climatológica y de cambio climático del país integrada en Acceso Abierto interoperable permitirá mejorar la planeación y la captura de datos meteorológicos y climáticos en el territorio nacional. De igual forma y en función de la disponibilidad de datos de mejor calidad y con mejores coberturas espaciales, se deberá avanzar hacia su estructuración en bases de datos con mayor resolución temporal y espacial que permitan apoyar los estudios regionales en forma más precisa y confiable.

4.13. Agradecimientos

Se agradece la colaboración en la realización de este trabajo de: Mónica Anayetzin Mata Cruz, Oscar Calderón Bustamante, Dulce Rosario Herrera Moro, Miguel Ángel Flores Espinosa y de Luis Alexis Avalos Urbina, todos del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

4.14. Referencias

Australian National University. (2018). *ANUCLIM Vrsn 6.1*. Recuperado de http://fennerschool.anu.edu.au/research/products/anuclim-vrsn-61

CGIAR-CSI. (2018). *Shuttle Radar Topography Mission. SRTM 90m Digital Elevation Data.* [Base de datos]. CGIAR Consortium for Spatial Information. Recuperado en 2014 de http://srtm.csi.cgiar.org/

CMIP5. (2018). *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - Overview*. Recuperado de https://cmip.llnl.gov/cmip5/

Cornell University Library. (2018). *Open Archives Initiative. Protocol for Metadata Harvesting (OAI-PMH)*. Recuperado de https://www.openarchives.org/pmh/

DOF. (20 de Mayo de 2014). Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley de Ciencia y Tecnología, de la Ley General de Educación y de la Ley Orgánica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Diario Oficial de la Federación. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5345503&fecha=20/05/2014

Fernández Eguiarte, A., Romero Centeno, R., y Zavala Hidalgo, J. (2012). *Atlas Climático de México y Áreas Adyacentes. Volumen 1*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional. Recuperado de http://atlasclimatico.unam.mx/ACM

Fernández Eguiarte, A., Romero Centeno, R. y Zavala Hidalgo, J. (2014). Metodologías empleadas en el Atlas Climático Digital de México para la generación de mapas de Alta Resolución. *Geoacta*, *39*(1), 165-173. Recuperado de http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/geoacta/XII_Eguiarte_et_al_SI_GES.pdf

Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A.C. y Trejo Vázquez, R.I. (2015a). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica.* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://atlasclimatico.unam.mx/inecc/Atlas_2_190215_documentacion.pdf

Fernández Eguiarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A.C. y Trejo Vázquez, R.I. (2015b). *Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. Bases de datos.* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Recuperado de http://atlasclimatico.unam.mx/AECC_descargas/

Fernández Eguiarte, A., Castelán Hernández, C.I., Bautista Durán. A.V., Trejo Vázquez, R.I., Zavala Hidalgo, J. y Romero Centeno, R. (2017a). *Bioclima, cambio climático y ecosistemas en el estado de Tabasco y áreas adyacentes, México (Bases de datos, metadatos y visualizaciones cartográficas).* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Recuperado de http://uniatmos.unam.mx/tabasco/

Fernández Eguiarte, A., Castelán Hernández, C.I., Bautista Durán. A.V., Trejo Vázquez, R.I., Zavala Hidalgo, J. y Romero Centeno, R. (2017b). *Bioclima, cambio climático y ecosistemas en el estado de Tabasco y áreas adyacentes, México (Repositorio geoespacial).* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Recuperado de http://uniatmos.unam.mx:8085/tabasco_repositorio/srv/spa/main.home

Fernández Eguiarte, A., Castelán Hernández, C.I., Bautista Durán. A.V., Trejo Vázquez, R.I., Zavala Hidalgo, J. y Romero Centeno, R. (2017c). *Bioclima, cambio climático y ecosistemas en el estado de Tabasco y áreas adyacentes, México Descarga de bases de datos y metadatos.* Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. Recuperado de http://uniatmos.unam.mx/tabasco_descargas/

Geonetwork. (2018). *Geonetwork opensource*. Recuperado de https://geonetwork-opensource.org/

Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P. & Jarvis, A. (2005). Very High Resolution interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. *International Journal of Climatology, 25*(15), 1965-1978. doi: 10.1002/joc.1276

INECC. (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de https://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf

ISO. (2018). *Geographic information -- Metadata -- XML schema implementation (ISO/TS 19139-2:2012)*. International Organization for Standardization. Recuperado de https://www.iso.org/standard/57104.html

IPCC. (2013). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.) *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Recuperado de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_ES.pdf

Rivas Martínez, S. (2018). *Worldwide Bioclimatic Classification System*. Recuperado de http://www.globalbioclimatics.org/book/bioc/global_bioclimatics_2.htm

San José Montano, B. (2009). Acceso abierto (open access), un modelo necesario de comunicación científica. *Pediatría Atención Primaria*, *11*(42), 299-311. Recuperado de http://scielo.isciii.es/pdf/pap/v11n42/11_colaboraciones.pdf

SMN. (2018). Información Climatológica. Servicio Meteorológico Nacional. [Base de datos]. Recuperado en junio de 2014 http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica

WorldClim. (2018). *WorldClim-Global Climate Data*. [Base de datos]. Recuperado en junio de 2014 http://www.worldclim.org/bioclim.

EL BALANCEO DE LAS LLUVIAS ¿MECANISMO OSCILATORIO NATURAL QUE EXPLICA LAS SEQUÍAS EN EL ALTIPLANO MEXICANO Y LAS LLUVIAS ABUNDANTES EN LA COSTA DE NAYARIT?

5

El balanceo de las lluvias ¿mecanismo oscilatorio natural que explica las sequías en el altiplano mexicano y las lluvias abundantes en la costa de Nayarit?

Luis Brito-Castillo[1]*; José Pablo Vega-Camarena[2]*; Luis M. Farfán[3]; Luis Felipe Pineda-Martínez[4]

Resumen

El Altiplano Mexicano (AM) y la costa occidental del Pacífico mexicano (COPM), son regiones conectadas mediante un mecanismo de balanceo donde intervienen las lluvias. Lluvias abundantes en el AM corresponden a lluvias deficientes en la COPM y viceversa. Una circulación anti-ciclónica posicionada sobre el continente en la troposfera media, con centro en el sur de Estados Unidos y norte de México, se asocia a condiciones secas sobre el AM, al mismo tiempo que se asocia a entrada de humedad a nivel del mar y formación de tormentas en la COPM donde se observan lluvias por arriba de lo normal. Por el contrario, una circulación ciclónica en la troposfera media sobre el norte de México se asocia a lluvias abundantes en el AM y a lluvias deficientes en la COPM. El patrón de flujo atmosférico a su vez está relacionado a la convergencia y divergencia de humedad. Por ejemplo, la convergencia de humedad en la troposfera media sobre el AM, se asocia a divergencia a nivel de la superficie que favorece días soleados y secos. Este arreglo de convergencia en altura-divergencia en superficie de humedad en el AM (indicador de sequía) se acompaña de un arreglo opuesto en la COPM, es decir de divergencia en altura-convergencia en superficie (indicador de con-

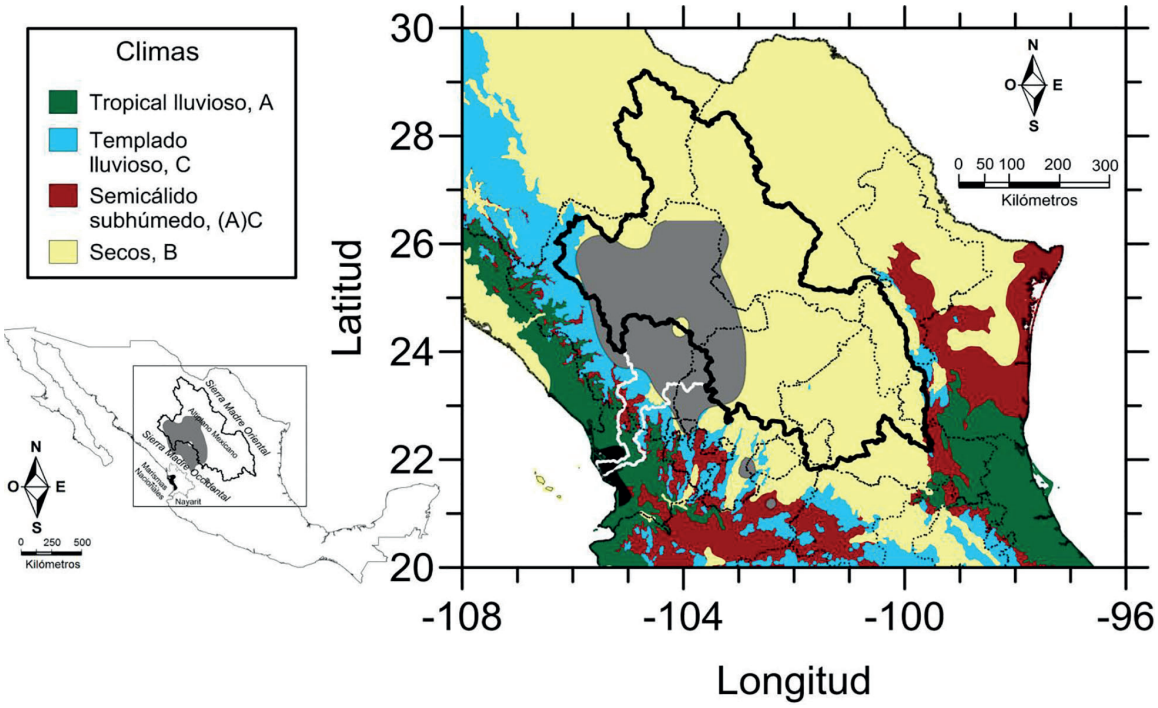
1 E-mail: lbrito04@cibnor.mx
2 E-mail: jcamarena@pg.cibnor.mx
3 Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, La Paz, B.C.S., México, E-mail: farfan@cicese.edu
4 Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México, E-mail: luisfpm23@gmail.com
* Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Guaymas, Sonora, México.

diciones favorables para la convección en superficie y lluvias en exceso). En este trabajo describimos con mayor detalle estas configuraciones para explicar si las sequías en el AM tienen relación con las lluvias abundantes en la COPM y viceversa.

Palabras clave: Altiplano, sequía, anomalía climática, convergencia, divergencia

5.1. Introducción

El Altiplano Mexicano (AM) es una región flanqueada por dos macizos montañosos orientados en dirección NO-SE, la Sierra Madre Oriental hacia el este y la Sierra Madre Occidental hacia el oeste en un recorrido perimetral que alcanza cerca de 4,670 km de extensión (Gráfica 5.1).



Gráfica 5.1. Localización del Altiplano Mexicano (AM) y la Costa Occidental del Pacífico Mexicano (COPM), frente a las costas de Nayarit (mapa pequeño), y tipos de climas presentes en toda el área (mapa grande). En el mapa grande, las líneas cortadas indican los límites estatales y en línea blanca se muestra el contorno de la cuenca del río San Pedro Mezquital. Las áreas sombreadas en ambos mapas son representativas del AM (gris) y la COPM (negro) resultado de un análisis de Funciones Empíricas Ortogonales aplicado a 174 series de precipitación. Fuente: Elaboración propia.

La presencia de ambos macizos montañosos actúan como barreras físicas que bloquean gran parte de la humedad que proviene del Pacífico y del Golfo de México por lo que los climas predominantes en esta región son del tipo B, secos y semisecos, con una precipitación media anual de unos 500 mm. En el norte y en el extremo suroriental de la región las condiciones son semicálidas con temperaturas medias entre 18 y 22 °C, mientras que en el resto del AM son templadas con temperaturas medias entre 12 y 18 °C con excepción del extremo occidental, en lo alto de la SMOc, donde las condiciones son semifrías, con temperaturas medias entre 5 y 12 °C. La elevación media del terreno en esta llanura es de unos 1600 m.s.n.m. La mayoría de los escurrimientos en esta región son intermitentes y drenan hacia el interior del continente en una superficie que abarca los 243,500 Km^2. En toda su extensión el AM comprende porciones de los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Jalisco.

En los estados de Durango y Zacatecas, existen extensas áreas de cultivo de granos como el frijol (INEGI, 2013) y el maíz (SAGARPA, 2003, 2014), por lo que forman parte de la principal región de producción de frijol en México, que incluye además a los estados de Aguascalientes y Chihuahua en el Centro-Norte del País cuya producción en su conjunto representa el 47% de la producción nacional. En esta región, casi toda la cosecha se cultiva durante la primavera y el verano, que dura de abril a septiembre (Rincón *et. al.*, 2004). Ledesma-Mares y Ramírez-Miranda (1994) consideran que esta región tiene importancia internacional en términos de provisión de alimentos nacionales e internacionales. Por lo tanto, un evento de sequía intenso o muy prolongado sobre esta región se traduce en altos costos a la economía nacional (Acosta-Díaz *et. al.,* 2009; Pineda-Martínez *et. al.*, 2007).

La costa occidental del Pacífico Mexicano (COPM), situada en la boca del Golfo y que cubre gran parte del norte de Nayarit y sur de Sinaloa, es una región húmeda y calurosa que presenta un clima del tipo A, tropical lluvioso, donde la precipitación media anual supera los 1000 mm y las temperaturas medias anuales se encuentran en un rango de 22 a 26 °C con una pequeña porción frente a las Islas Marías donde las temperaturas medias anuales superan los 26 °C. Esta región es particularmente interesante debido a la ocurrencia de tormentas entre los meses de junio y septiembre

favorecida por un mar cálido y somero frente a las costas de Nayarit, y viento superficial del oeste suroeste que arrastra la humedad hacia el interior. El máximo de lluvia en esta región se presenta en el mes de agosto y se observa en una amplia región hacia el interior del continente (Brito-Castillo *et. al.*, 2010), lo que hace suponer que las fuerzas que propician el desarrollo de las tormentas en la costa también favorecen las lluvias hacia el interior transportando la humedad incluso hasta la región del AM. Se ha sugerido que la posible ruta para este transporte, por donde la humedad debe atravesar cañones de gran profundidad, llegar hasta la cima del macizo montañoso y cruzarlo hacia el AM aún en forma de lluvia, se encuentra dentro de la cuenca del río San Pedro-Mezquital (Brito-Castillo *et. al.*, 2010) que domina y conecta la costa con el AM (Gráfica 5.1). Los estados de Durango, Zacatecas y Nayarit comparten la cuenca del río San Pedro-Mezquital, el séptimo río más caudaloso de México cuyas aguas fluyen de manera natural ya que no existen presas que regulen su tránsito. Este río nace en la Sierra del Mezquital, donde debe su nombre inicial, en el sur de Durango; desciende hacia el sureste atravesando una gran porción del AM para después cruzar las montañas de la SMOc hacia el suroeste irrigando los valles tropicales de Nayarit y desembocando en el Océano Pacifico tras 540 km de recorrido. El cauce principal con sus numerosos afluentes, las laderas y todo el territorio cuyas aguas escurren hacia el cauce principal forman una inmensa cuenca que cubre una extensión de 25,800 km^2. Las elevaciones de la cuenca van desde el nivel del mar en la desembocadura hasta picos de cerca de 3 km de altura en la zona montañosa y cañones que superan los 2 km de profundidad en la parte media. Lo interesante de este río, como ya se dijo, es que se origina en la región del AM y en su curso atraviesa la SMOc. En su desembocadura aporta el mayor volumen de agua dulce a la Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, compuesta de lagunas costeras salobres, bosques de mangle, pantanos, deltas y marismas que en su conjunto representan entre 15 y 20 % del total de ecosistemas de manglares existente en México (CONANP, 2013).

En la región del AM hay frecuentes periodos de sequía, gran variabilidad estacional de la precipitación (Seager *et. al.*, 2009), y tendencia hacia una menor oscilación diurna de la temperatura (Brito-Castillo *et. al.*, 2009). Aquí subsiste una agricultura de temporal en la que Durango y Zacatecas contribuyen con el mayor valor comercial de frijol en México (INEGI, 2013). Como en otras regiones semiáridas del mundo la variabilidad

de las lluvias en el AM es alta pero su falta prolongada puede llegar a causar efectos negativos en la economía nacional. Uno de los rasgos de esa variabilidad se refleja en una respuesta opuesta en la costa, donde períodos de lluvias cuantiosas se corresponden con períodos intensos o prolongados de sequía en el AM y viceversa. En este trabajo describimos el mecanismo que produce el balanceo en las lluvias entre el AM y la COPM. Este conocimiento puede resultar muy útil para mejorar el pronóstico estacional de las lluvias en el AM, lo que a su vez puede ayudar a reducir el riesgo de pérdidas económicas en esta región, asociadas principalmente a las sequías.

5.2. Ocurrencia de sequías

La sequía es un evento que se caracteriza por un déficit muy marcado en las condiciones de humedad, donde la oferta de agua es menor a la demanda (procesos biológicos, actividades productivas, abastecimiento a la población). Es considerado el desastre natural más costoso en la historia causando pérdidas anuales a nivel global de unos 6-8 mil millones de dólares americanos (Wilhite, 2000). Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred, 2012) en el período 2000-2012, los registros de declaratoria por desastres relacionadas con sequía en México ocuparon el tercer puesto después de las declaratorias relacionadas con lluvias intensas y ciclones tropicales causando cientos de millones de pesos en pérdidas. En la literatura se reconocen 4 tipos de sequía: (1) la meteorológica, relacionada con la falta prolongada de precipitación; (2) la hidrológica, que describe una deficiencia en el volumen de abastecimiento de agua (de ríos, presas, acuíferos); (3) la agrícola, que relaciona las deficiencias de humedad disponible en el suelo para el crecimiento de las plantas y (4) la socioeconómica, que se define en términos monetarios como consecuencia de uno o más de los 3 tipos de sequía mencionados. Recientemente, se ha propuesto el término 'sequía repentina', que se refiere al rápido deterioro de los cultivos provocados por los efectos adversos de una onda de calor severa y una falta de humedad de corta duración (Mo y Lettenmaier, 2016).

La sequía meteorológica, en particular, es un fenómeno recurrente e irregular causado por movimientos descendentes de aire seco en la atmósfera que a su vez es resultado

de la ocurrencia de movimientos anticiclónicos (vórtices atmosféricos colosales que giran en sentido de las manecillas del reloj). Es particularmente desastrosa cuando estos movimientos permanecen durante días, semanas, meses e incluso años en un sitio y cubren una amplia región del continente. En los últimos casos las pérdidas a la economía nacional son cuantiosas y están vinculadas a impactos negativos en el suministro de agua y la producción de alimentos (Liverman, 1999). Sus impactos en la sociedad han sido fuertemente implicados en algunos de los casos más difíciles de la historia política de nuestra nación (Stahle, *et. al.*, 2016; Wolfe, 2017) y se sugiere, por ejemplo que las causas de la desaparición de la cultura maya se debió a una sequía muy prolongada (Haug, *et. al.*, 2003; Medina-Elizalde y Rohling, 2012). Existen diversos índices para cuantificar las sequías (Keyantash y Dracup, 2002) pero la investigación de su ocurrencia continúa (Núñez *et. al.*, 2016; Stahle *et. al.*, 2016). En un esfuerzo trinacional entre Canadá, Estados Unidos y México se creó el programa Monitor de Sequía de América del Norte (MSAN, Lawrimore *et. al.*, 2002) para mejorar el monitoreo de la sequía en el continente. El cual tuvo su motivación debido al caso de éxito del Programa Monitor de Sequía de los Estados Unidos creado en 1999, y como tal, se está desarrollando para proporcionar una evaluación continua e integral de la sequía en Canadá, Estados Unidos y México. Recientemente, el Instituto de Geofísica de la UNAM propuso el nuevo Monitor de Sequía Multivariado en México (Mosemm), para monitorear la intensidad y magnitud de una sequía que contribuye a los esfuerzos del MSAN (Mosemm, 2017)

5.3. Índices climáticos asociados a sequías

Muchos estudios han examinado el papel que desempeña la atmósfera y su interacción con los océanos en las variaciones de la temperatura superficial del mar (TSM) (i.e Kushnir *et. al.*, 2002; Namias *et. al.*, 1988; Seager *et. al.*, 2000), y como estas variaciones afectan el clima regional (Hu *et. al.*, 2011; Palmer y Sun, 1985; Ting y Peng, 1995; Trenberth *et. al.*, 1998; Venzke *et. al.*, 1999). Nuestro conocimiento sobre el entendimiento de los mecanismos que afectan el clima en México a diferentes escalas, desde la variabilidad interanual hasta la decenal ha progresado recientemente. Por ejemplo, en lo que respecta a la variabilidad interanual se ha establecido que El Niño/Oscilación

del Sur (ENOS), modifica los patrones de precipitación en México (Ropelewski y Halpert, 1996; Seager *et. al.*, 2005) y ocasiona sequías en el sur del país en la mitad cálida del año. Este fenómeno tiene que ver con los cambios en la temperatura superficial del mar al norte del Ecuador y los patrones de flujo atmosférico a lo largo del Pacífico Ecuatorial. Durante la fase de El Niño, aguas inusualmente cálidas coinciden con un debilitamiento de los vientos alisios y una profundización de la termoclina que se traduce en un empobrecimiento de los nutrientes en el agua. Es notable el hecho de que pesquerías comerciales como la sardina manifiestan una disminución importante durante el Niño, mientras que en superficie las lluvias se intensifican en zonas inusualmente áridas. Por el contrario, en la fase de La Niña, las aguas frente a las costas de Perú son inusualmente frías acentuando las condiciones de aridez en la zona. En México, situado a una distancia considerable del Ecuador, el efecto de este fenómeno se transporta a través de la atmósfera y del océano. Las TSM juegan un papel importante en la producción de sequías. Se ha descubierto, por ejemplo, que cuando las aguas del Atlántico norte son inusualmente cálidas, fenómeno conocido como fase positiva de la Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO), aparecen sequías de gran magnitud en América del Norte (Hu y Feng, 2012; Méndez y Magaña, 2010). Por su lado, si las aguas del Pacífico Norte son inusualmente cálidas a lo largo de las costas de América, fenómeno conocido como fase positiva de la Oscilación Decenal del Pacifico (PDO), se favorece la ocurrencia de sequías al sur de México (Méndez-González *et. al.*, 2010). Los efectos de las TSM en los patrones de distribución de precipitación en México varían dependiendo de la estación del año aunque cabe mencionar que si bien más de la mitad de la agricultura mexicana se basa en la lluvia de la estación cálida (Conde *et. al.*, 2006), las sequías de invierno pueden ser igualmente preocupantes porque de ellas depende la vegetación natural que las aprovecha mejor por ser estas más extendidas, menos intensas y de mayor duración que las de verano, además de que contribuyen al llenado de las presas. Por su complejidad y falta de entendimiento, el fenómeno de la sequía es un problema muy difícil de resolver en la ciencia, pero se han logrado algunos avances importantes en su monitoreo con la creación de programas como el MSAN, la propuesta de la UNAM y esfuerzos aislados de investigadores interesados en el tema, por ejemplo Tereshchenko *et. al.* (2012). Los registros hidroclimáticos instrumentales, han permitido examinar con mucho detalle los últimos 150 años de historial de sequias en el suroeste de los Estados Unidos

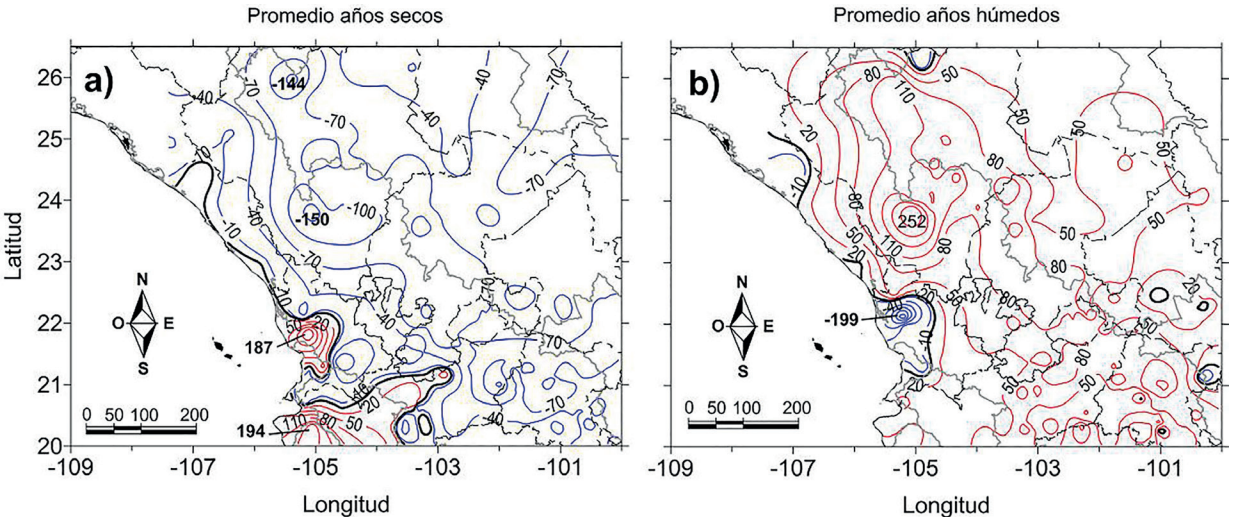
(Seager *et. al.*, 2007) mientras que los estudios de anillos de árboles han permitido reconstruir las sequías de los últimos 600 años en México (Stahle *et. al.*, 2016). En años recientes la modelación numérica del clima se ha convertido en una forma de avanzar en el entendimiento de las causas de las sequías (Seager *et. al.*, 2007, 2009).

5.4. Metodología

En un estudio previo, Vega-Camarena *et. al.* (2018), a partir de un análisis estadístico multivariado de Funciones Empíricas Ortogonales, aplicado a 174 series históricas de precipitación para el período 1970-2000, identificó dos modos de variación que por su cobertura y extensión son representativos de las regiones AM y COPM (Gráfica 5.1). Este análisis permitió hacer comparaciones entre el AM y la COPM (Gráfica 5.2) sobre la variabilidad de las precipitaciones. Por ejemplo, para el período 1970-2012, al calcular la diferencia entre la media de los 10 años más secos (estos fueron: 1979; 1980; 1982; 1989; 1992; 1995; 1997; 1998; 1999 y 2011, Gráfica 5.2a) y de los 10 años más húmedos (1973; 1984; 1986; 1987; 1988; 1990; 1991; 1993; 1994 y 2010, Gráfica 5.2b), menos la media de precipitación de todo el período, para cada estación individual localizada en el área de estudio, fue notable el contraste observado en la variabilidad de las precipitaciones entre el AM y la COPM. Este contraste indica que cuando hay sequía en el AM (anomalías negativas, Gráfica 5.2a), se observan lluvias abundantes en la COPM (anomalías positivas, Gráfica 5.2a) y viceversa (Gráfica 5.2b). Los diez años más húmedos y secos se identificaron a partir de la serie regional del AM (ver Vega-Camarena *et. al.*, 2018). En la Gráfica 5.3, se muestran las series que resultan de sumar los valores estandarizados de manera consecutiva, que fueron estimados a partir de las series originales del AM y de la COPM, es decir:

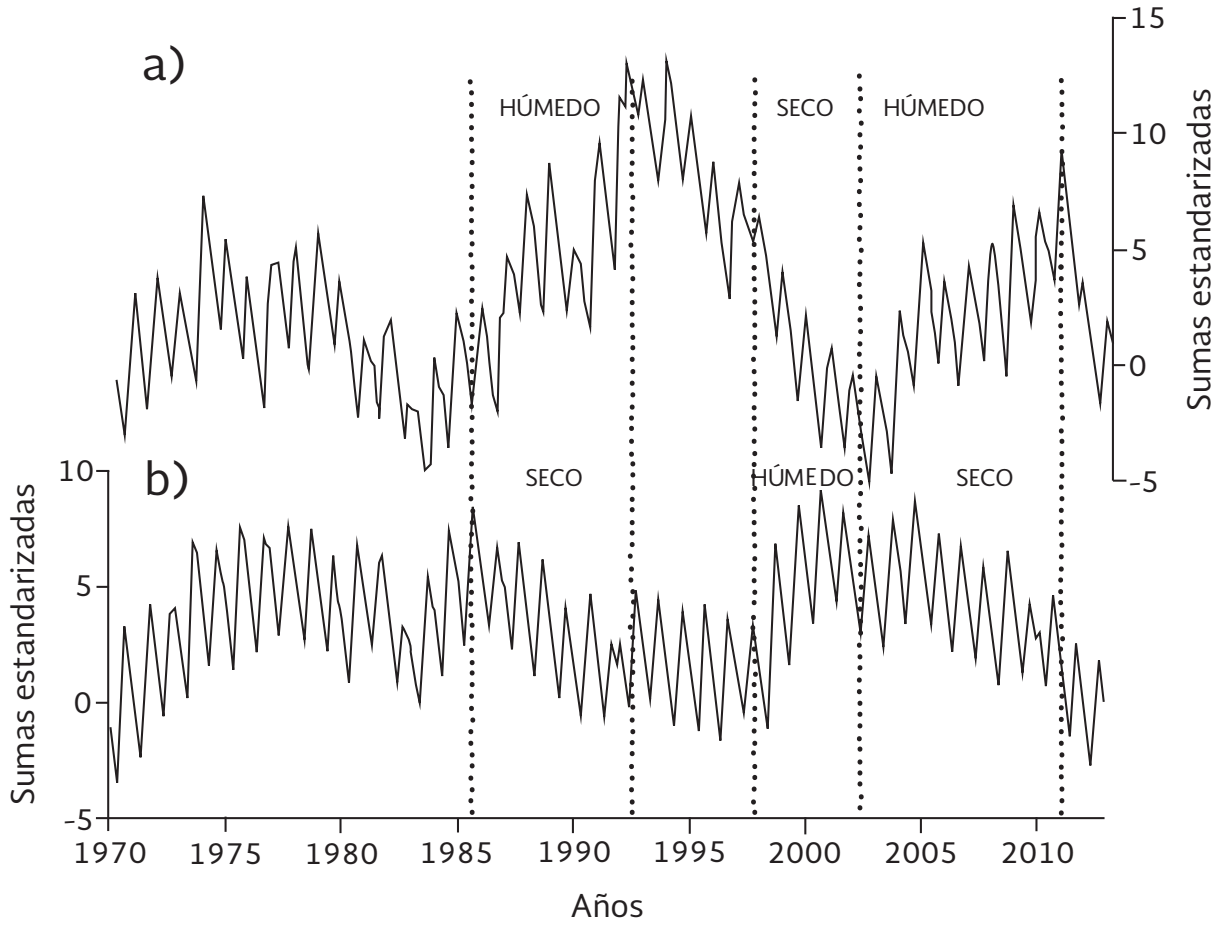
$$\sum_{i=1}^{n} Z_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i - \overline{x}}{\sigma},$$

donde Z_i y , x_i son el valor estandarizado y la precipitación del *i*-ésimo mes, respectivamente; $\overline{x}$ y σ son la media y la desviación estándar de la serie;



Gráfica 5.2. Contornos de anomalías de precipitación en base a la diferencia entre la media de precipitación de los 10 años secos (a) y de los 10 años húmedos (b), y la media de todo el período 1970-2012. Para cada serie individual se calculó la anomalía para construir los contornos. Los contornos azules muestran las anomalías negativas (déficit de lluvia) mientras que los contornos rojos muestran las anomalías positivas (exceso de lluvia). El contorno igual a cero se muestra con línea negra gruesa.
Fuente: modificado de Vega-Camarena *et. al.*, 2018.

La técnica de sumar de manera consecutiva los valores estandarizados de la serie permite identificar los déficits de precipitación, cuando la tendencia es hacia el descenso, y los excesos, cuando la tendencia es hacia el ascenso. De este modo, las series muestran que el balanceo en las lluvias (húmedo en el AM y seco en la COPM y viceversa) es muy irregular y no siempre coincide en amplitud y duración (Gráfica 5.3). Sin embargo, cuando las sequías en el AM son muy intensas o prolongadas, las condiciones en la COPM son opuestas.



Gráfica 5.3. Series de sumas estandarizadas de precipitación mensual entre 1970 y 2012 estimadas a partir de las series regionales del Altiplano Mexicano (a) y la costa occidental del Pacífico Mexicano (b). En cada caso, cuando la tendencia de la serie va en aumento es indicación de un período húmedo. Por el contrario, si va en descenso es indicación de un período seco. Obsérvese como hay períodos húmedos y secos en el Altiplano que coinciden con períodos opuestos en la costa, aunque su duración no necesariamente coincide.
Fuente: Elaboración propia.

5.5. Divergencia y convergencia

Se entiende por divergencia la expansión o dispersión de un campo vectorial mientras que la convergencia es la contracción o confluencia del campo vectorial. La divergencia horizontal en las capas cercanas a la superficie resulta en subsidencia de aire (flujo descendente) desde capas más elevadas. Por el contrario, la convergencia horizontal en capas superiores resulta en movimientos ascendentes de aire desde capas inferiores. La subsidencia, se asocia a tiempo seco mientras que, por el contrario, el movi-

miento ascendente de aire, cuando hay suficiente humedad en la atmósfera se asocia con formación de nubes, y lluvia.

En cálculos matemáticos, la convergencia es divergencia negativa. En meteorología, debido a la dominancia de los movimientos horizontales, la divergencia usualmente se refiere a divergencia horizontal del campo de velocidades en dos dimensiones:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

donde *u* y *v* son los componentes de velocidad del viento en los ejes *x* y *y*, respectivamente. Las unidades de divergencia son s^{-1}.

5.6. Mapas compuestos de anomalías de viento, humedad específica y divergencia

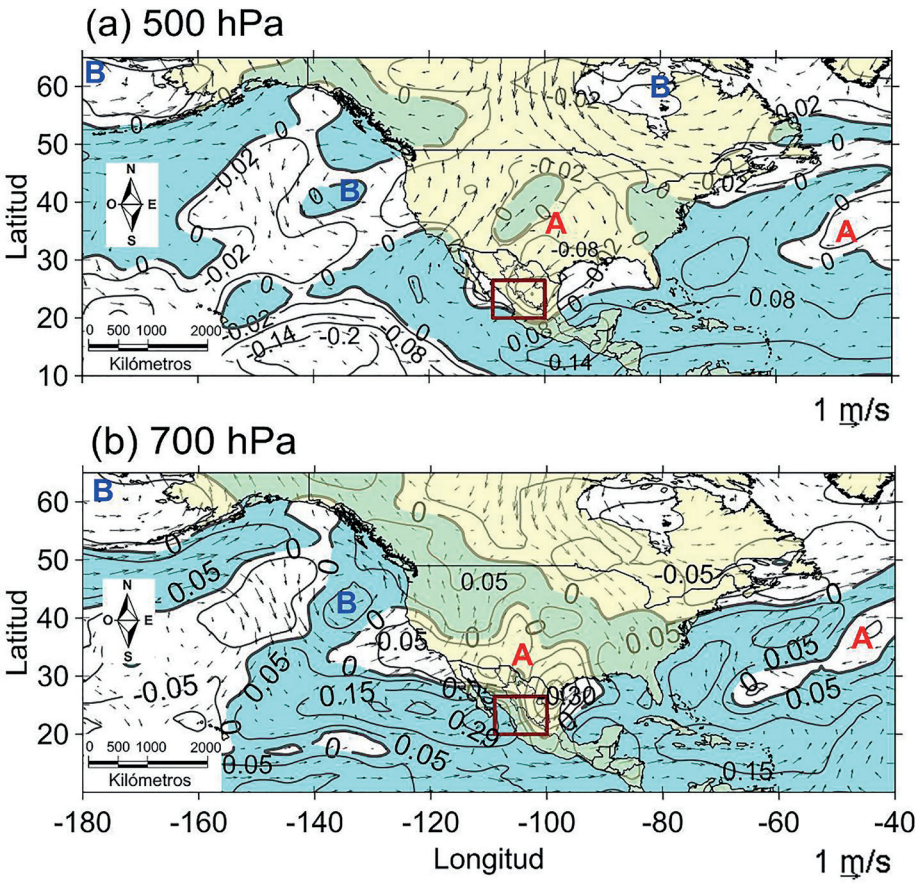
Con base en datos provenientes de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) de Estados Unidos (http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl), se construyeron mapas compuestos del viento promedio y anomalías de humedad específica a 500 hPa (aproximadamente 5 km de altura) y 700 hPa (3 km), así como de anomalías de divergencia a dos niveles sigma (a) 0.2101 (aproximadamente a 11 km de altura) y (b) 0.995 (en superficie) para los 10 años más húmedos y los 10 años más secos.

5.7. Resultados

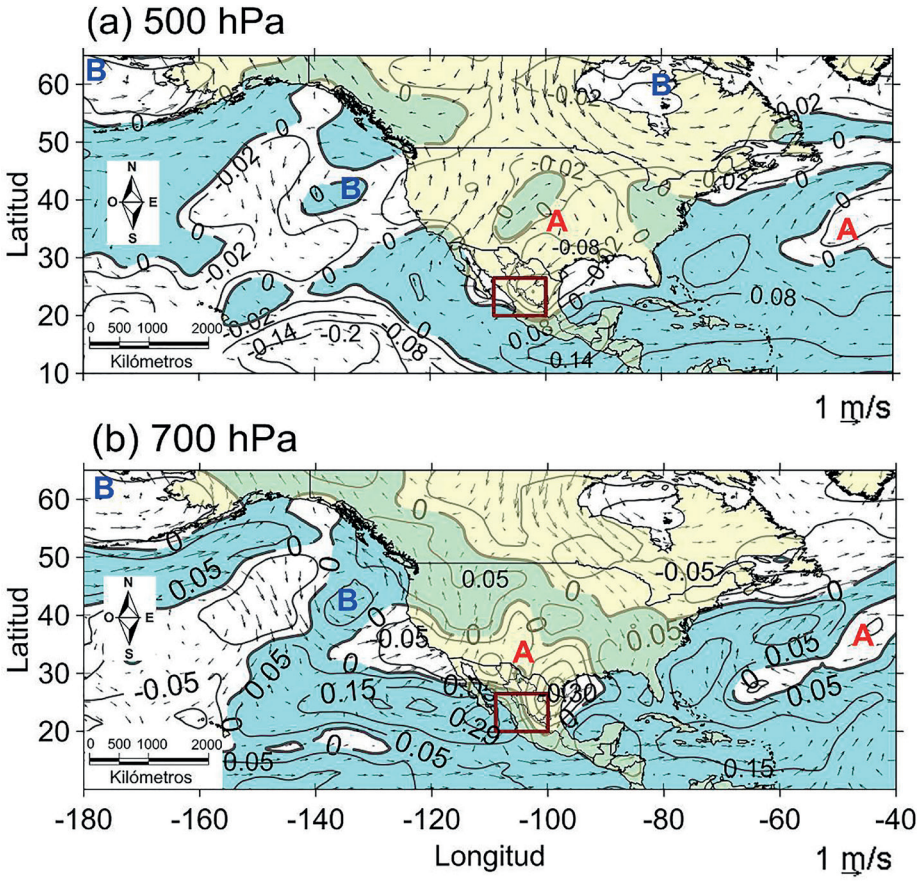
En las Gráfica 5.4 y Gráfica 5.5 se muestran los mapas compuestos de viento promedio y anomalías de humedad específica para los diez años secos y diez años húmedos identificados en la región del AM. Como se observa en la Gráfica 5.4 el patrón de flujo de viento y la humedad específica promedios durante los 10 años secos indican que el mecanismo oscilatorio natural que por un lado propició sequía en el AM y por el otro, condiciones húmedas en la COPM está relacionado con una circulación anti-ci-

clónica posicionada sobre el continente en la troposfera media (entre 3000 y 5000 m de altura), con centro en el sur de Estados Unidos y norte de México. A estos niveles los déficits de humedad son dominantes sobre el AM, el norte de México y el sur de los Estados Unidos mientras que los excesos de humedad (mucho más concentrados a 3000 m de altura) tienen su núcleo en la boca del Golfo de California pero se observan en el sureste de México y a lo largo de las costas del Pacífico Mexicano, con excepción del extremo noroccidental de la Península de Baja California. Debido a la posición de la circulación anticiclónica y a su gran cobertura, vientos del norte, fríos y secos invaden al AM produciendo los déficits de humedad mientras que vientos del este, del lado del Pacífico, arrastran la humedad que se genera en las costas, principalmente en la boca del Golfo de California.

Por su parte, los diez años más húmedos identificados en el AM corresponden con condiciones secas en la COPM y están asociados a un patrón de flujo atmosférico en la troposfera media que es opuesto a las condiciones anteriores (Gráfica 5.5). En este caso, el flujo atmosférico está dominado por una circulación ciclónica con centro en el noroeste de México, que favorece la concentración de humedad en el AM debido al flujo proveniente del sur-suroeste en su sector sur-oriental que arrastra la humedad desde el Pacífico tropical, mientras que el déficit de humedad que se observa en la costa está dominado por un flujo seco proveniente del norte-noroeste del sector sur-occidental de la circulación ciclónica.

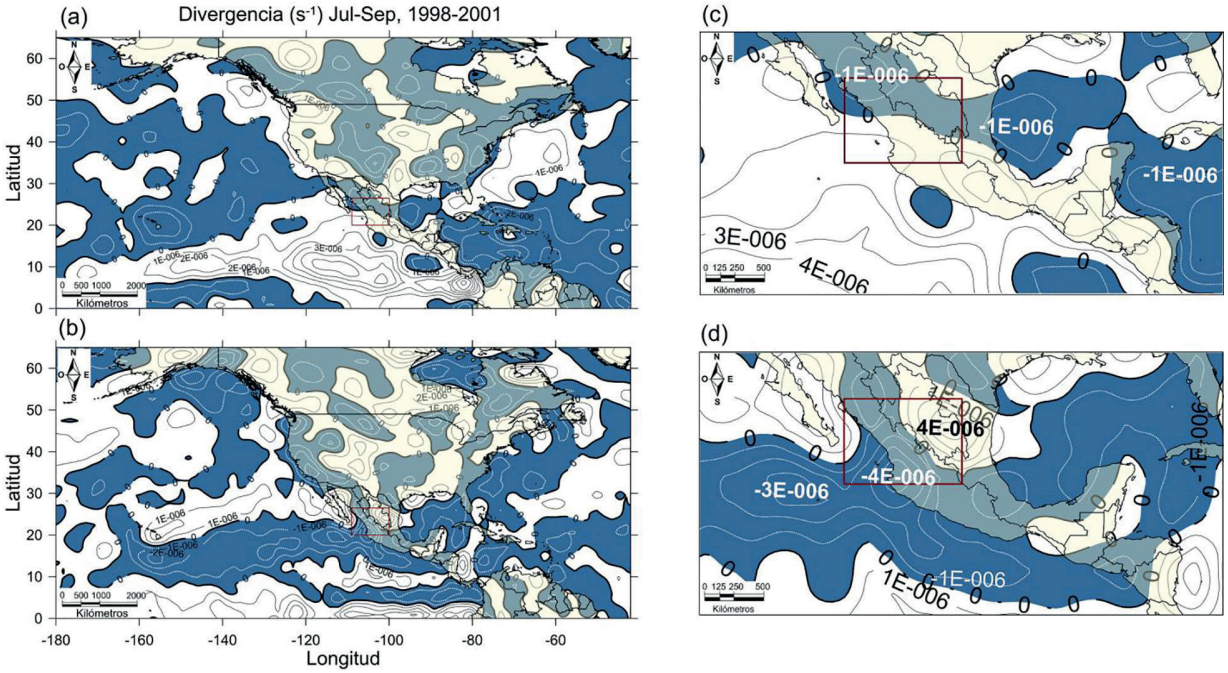


Gráfica 5.4. Mapas compuestos de vectores de viento promedio (m s^{-1}) y anomalías de contornos de humedad específica (g kg^{-1}) a 500 hPa (≈5000 m) (a) y 700 hPa (≈3000 m) durante 10 años secos en el Altiplano Mexicano. El contorno = 0 g kg^{-1} se muestra en línea gruesa y los valores positivos están sombreados en color celeste. Los vórtices de movimientos ciclónicos y anti-ciclónicos se muestran con la letra 'B' y 'A', respectivamente. El cuadro de color rojo muestra el área de interés.
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 5.5. Mapas compuestos de vectores de viento promedio (m s^{-1}) y anomalías de contornos de humedad específica (g kg^{-1}) a 500 hPa (≈5000 m) (a) y 700 hPa (≈3000 m) durante 10 años húmedos en el Altiplano Mexicano. El contorno = 0 g kg^{-1} se muestra en línea gruesa y los valores positivos están sombreados en color celeste. Los vórtices de movimientos ciclónicos y anti-ciclónicos se muestran con la letra 'B' y 'A', respectivamente. El cuadro de color rojo muestra el área de interés. Fuente: Elaboración propia.

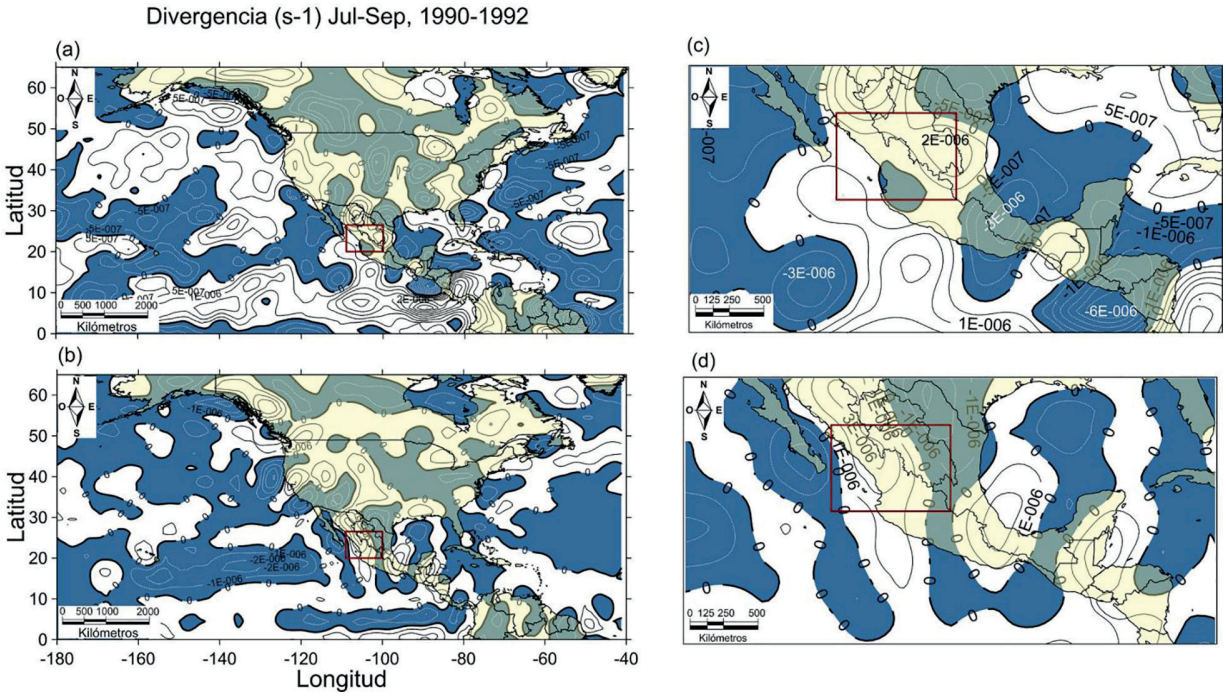
El cálculo de la divergencia horizontal a 11 km de altura y al nivel del mar, entre 1998-2001 que correspondió a condiciones secas en el AM (Gráfica 5.3a), se muestra en la Gráfica 5.6, mientras que para el período 1990-1992, que correspondió a condiciones húmedas en el AM (Gráfica 5.3a), se muestra en la Gráfica 5.7. En las Gráfica 5.6 y Gráfica 5.7, los valores negativos de la divergencia horizontal equivalen a convergencia horizontal.



Gráfica 5.6. Mapas de anomalías de divergencia promedio a 11 km de altura (a y c) y a nivel del mar (b y d) durante el período seco registrado en el Altiplano Mexicano entre 1998 y 2001. Los mapas de la derecha son ampliaciones de la zona de estudio delimitada por el cuadro rojo. Los contornos positivos, que indican divergencia de humedad se muestran en negro, mientras que los contornos negativos, que indica convergencia de humedad se muestran en blanco. Las áreas de convergencia están sombreadas en color azul.
Fuente: Elaboración propia.

Durante el período seco, en la región del AM, domina la convergencia en altura (Gráfica 5.6a) y la divergencia en superficie (Gráfica 5.6b). La divergencia horizontal en superficie del lado del AM resulta en subsidencia de aire desde capas más elevadas, lo que a su vez se fortalece por la convergencia en altura. Este proceso hace que el aire pierda humedad mientras desciende puesto que se va comprimiendo y calentando por compresión, lo que resulta en déficit de humedad sobre el AM (Gráfica 5.4a).

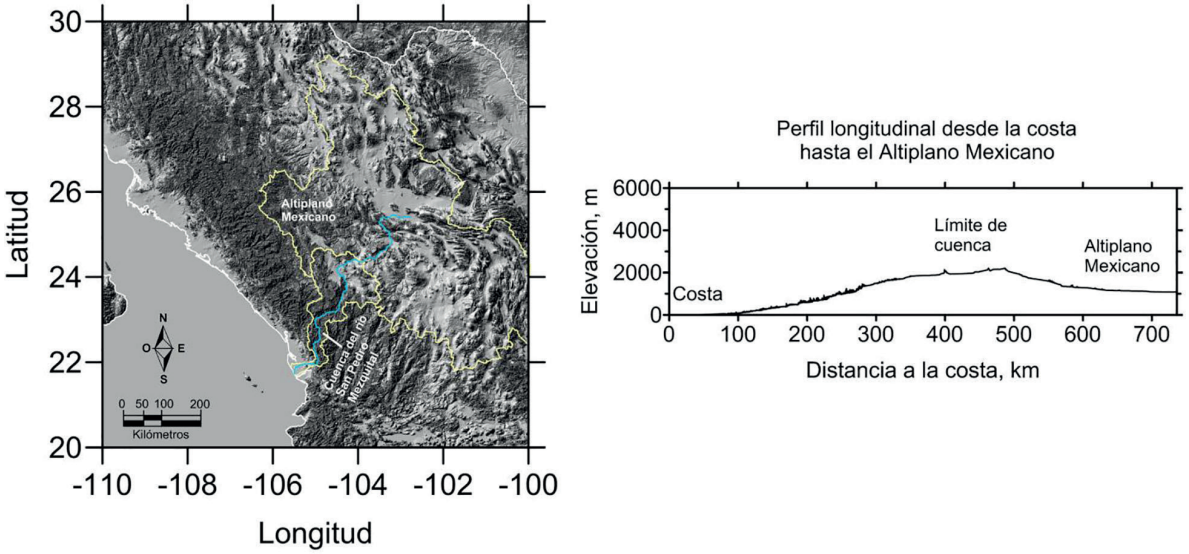
Por el contrario, durante este mismo período en la COPM, domina la divergencia en altura (Gráfica 5.6a) y la convergencia en superficie (Gráfica 5.6b). Este patrón promedio resulta en ascenso de aire desde la superficie hacia capas más elevadas que arrastra la humedad generada en el Pacífico por convección, incrementando su contenido sobre la COPM, dando como resultado que el período 1998-2001 de lado de la costa haya sido húmedo.



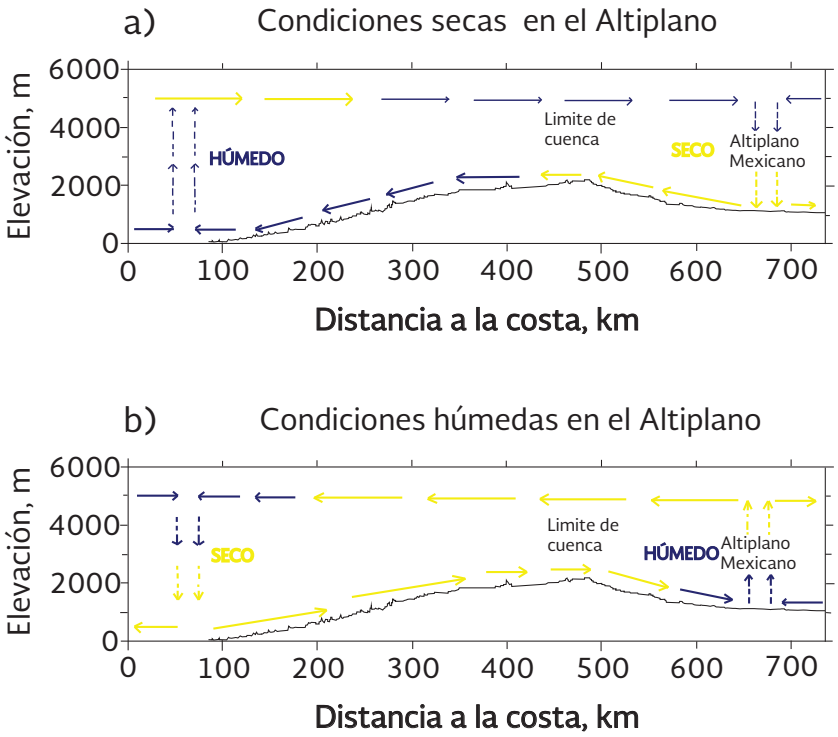
Gráfica 5.7. Mapas de anomalías de divergencia promedio a 11 km de altura (a y c) y a nivel del mar (b y d) durante el período húmedo registrado en el Altiplano Mexicano entre 1990 y 1992. Los mapas de la derecha son ampliaciones de la zona de estudio delimitada por el cuadro rojo. Los contornos positivos, que indican divergencia de humedad se muestran en negro, mientras que los contornos negativos, que indica convergencia de humedad se muestran en blanco. Las áreas de convergencia están sombreadas en color azul.
Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones húmedas observadas en el AM durante 1990-1992, resultaron en condiciones secas en la COPM (Gráfica 5.3b). En este caso, el patrón promedio de divergencia-convergencia en el AM y la COPM es opuesto al descrito anteriormente. Del lado del AM, por ejemplo, se observa divergencia en altura (Gráfica 5.7a) y convergencia en superficie (Gráfica 5.7b), aunque más concentrada del lado de la vertiente del Golfo de México, lo que coincide con la presencia de humedad sobre el AM (Gráfica 5.5)

Por el contrario, del lado de la COPM, se observa convergencia en altura (Gráfica 5.7a), si bien en una región muy reducida y con valores bajos, y divergencia en superficie (Gráfica 5.7b), aunque mucho más concentrada hacia el norte, del lado de la vertiente del Pacífico. Estas condiciones coinciden con el déficit de humedad observado sobre la COPM en condiciones secas (Gráfica 5.5).



Gráfica 5.8. Mapa donde se muestran en color amarillo los polígonos de las cuencas del río San Pedro Mezquital, que desemboca en el Pacífico, y del Altiplano Mexicano cuyo drenaje es hacia el interior del continente (Izquierda). En línea azul se muestra la trayectoria del río San Pedro Mezquital y del río Aguanaval unidos arbitrariamente en los límites de sus cuencas adyacentes para hacer continua la línea que sirve de base para construir el perfil longitudinal desde la costa hasta el interior del Altiplano (Derecha). Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 5.9. Modelo conceptual de flujos de viento en condiciones secas (a) y húmedas (b) identificadas en el Altiplano Mexicano con base en los resultados del análisis de divergencia y contenido de humedad en la atmósfera el perfil longitudinal a lo largo de los cauces de los ríos San Pedro-Mezquital y Aguanaval. Fuente: Elaboración propia.

5.8. Modelo conceptual

En la Gráfica 5.8 se muestra la zona de estudio y los polígonos de las cuencas del río San Pedro-Mezquital y el AM. Se muestra también un perfil longitudinal desde la costa hacia interior del Altiplano el cual sigue el curso de los ríos San Pedro-Mezquital y Aguanaval que se unieron en los límites de sus cuencas adyacentes para hacer continua la línea. Este perfil sirve de base para proponer un modelo conceptual del flujo de viento que explica las corrientes asociadas a condiciones húmedas y secas entre el AM y la COPM y el balanceo en las lluvias entre ambas regiones (Gráfica 5.9). Como se puede apreciar, las condiciones secas en el AM que coinciden con condiciones húmedas en la COPM (Gráfica 5.9a), están caracterizadas por divergencia en superficie y convergencia en altura del lado del AM mientras que, por el contrario, por convergencia en superficie y divergencia en altura del lado de la COPM, tal como sugiere

el análisis de la Gráfica 5.6. La humedad bajo estas condiciones se concentra en la COPM como sugiere la Gráfica 5.4. Por el contrario, las condiciones húmedas en el AM que coinciden con condiciones secas en la COPM (Gráfica 5.9b), se caracterizan por convergencia en superficie y divergencia en altura del lado del AM mientras que por divergencia en superficie y convergencia en altura de lado de la COPM, tal como sugiere el análisis de la Gráfica 5.7. La humedad bajo estas condiciones se concentra en el AM (Gráfica 5.5).

5.9. Conclusiones

Las sequías pueden afectar cualquier territorio. En la historia reciente de nuestro país la sequía meteorológica del 2011-2012 afectó al centro y norte de México, fue la más prolongada en los últimos 70 años, y fue catalogada como excepcional afectando los sectores agrícola y pecuario de la región del AM. Estas condiciones de sequía estuvieron asociadas con un período relativamente normal en la COPM. Otro evento de sequía en el AM fue el ocurrido entre 1998 y 2001 que coincidió con un período húmedo en la COPM. Los diez años con condiciones secas identificados en el AM coinciden con condiciones húmedas en la COPM. En todos estos casos, se observa un balanceo en las lluvias entre el AM y la COPM que indica que condiciones secas en el AM por lo general coinciden con condiciones húmedas en la COPM y viceversa. Al parecer este balanceo no se observa siempre. Los resultados indican que solo aparece cuando las condiciones secas o húmedas son muy intensas o muy persistentes en el AM como sugiere la Gráfica 5.3. Sabemos que la propagación de las lluvias de verano desde el sur hacia el noroeste de México se ve afectada por la entrada de humedad que de manera local fomenta la producción de tormentas recurrentes en Nayarit entre los meses de julio y septiembre, época en que el sistema del monzón de Norteamérica modula la variabilidad de las lluvias en esta región del país. Ahora se sabe que su afectación se extiende muy profundo en el continente llegando incluso a afectar al Altiplano Mexicano (Brito-Castillo *et. al.*, 2010). El Altiplano y la costa se conectan a través de la cuenca del río San Pedro-Mezquital. Por lo tanto la existencia del balanceo en las lluvias entre ambas regiones resulta relevante para entender la ocurrencia de sequías sobre estas zonas. Este conocimiento puede ser muy útil para mejorar los pronósticos estacionales o

de largo plazo, que a su vez ayuden a los tomadores de decisión a proponer acciones preventivas para evitar pérdidas económicas considerables, principalmente durante períodos de sequía muy intensos o prolongados.

5.10. Agradecimientos

Se agradece al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. y a la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos de CONACYT el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

5.11. Referencias

Acosta-Díaz, E. J., A. Acosta-Gallegos, M. D. Amador-Ramírez, J. S. Padilla-Ramírez (2009), 'Efecto del riego suplementario en la producción de biomasa y grano de frijol de temporal en Zacatecas, México', Agricultura Técnica en México, vol. 35, núm. 2, pp. 157–167. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_issueto-c&pid=0568-251720090002&lng=es&nrm=iso

Brito-Castillo, L., E. R. Vivoni, D. J. Gochis, A. Filonov, I. Tereshchenko, C. Monzon (2010), 'An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwest Mexico', *Journal of Arid Environments*, vol. 74, núm. 5, pp. 531-539. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2009.10.014. Disponible en: https://ac.els-cdn.com/S0140196309003449/1-s2.0-S0140196309003449-main.pdf?_tid=5671fa8e-29ba-43e7-bb55-61366e574f0e&acdnat=1529524833_fe7b16681cc546216c5cd8330916479e

CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) (2013), 'Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, Nayarit', 204 pp. Disponible en: (http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/2013/MARISMAS.pdf) (consultado el 20 de octubre de 2017)

Conde, C., R., Ferrer, S. Orozco (2006), 'Climate change and climate variability impacts on rain-fed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study', *Atmósfera*, vol. 19, núm. 3, pp. 181-194. Disponible en: http://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8559/8029

Haug, G. H., D. Gunther, L. C. Peterson, D. M. Sigman, K. A. Hughen, B. Aeschilmann (2003), 'Climate and the collapse of Maya civilization', *Science*, vol. 299, núm. 5613, pp. 1731-1735. DOI: 10.1126/science.1080444. Disponible en: http://science.sciencemag.org/content/299/5613/1731/tab-pdf

Hu, Q., S. Feng, R. J. Oglesby (2011), 'Variations in North American summer precipitation driven by the Atlantic multidecenal oscillation', *Journal of Climate*, vol. 24, núm. 21, pp. 5555–5570. DOI.org/10.1175/2011JCLI4060.1. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2011JCLI4060.1

Hu, Q., S. Feng (2012), 'AMO- and ENSO-driven summertime circulation and precipitation variations in North America', *Journal of Climate*, vol. 25, núm. 19, pp. 6477–6495. DOI.org/10.1175(JCLI-D-11-00520.1. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JCLI-D-11-00520.1

INEGI (Instituto Nacional de Estadistica, Geográfia e Informatica) (2013), 'Censo agropecuario 2007', El cultivo del frijol en Zacatecas. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/Agro/ca2007/Resultados_Agricola/

Keyantash, J., J. Dracup (2002), 'The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 83, núm. 8, pp. 1167-1180. DOI.org/10.1175/1520-0477(2002)083<1191:TQODAE>2.3.CO;2. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0477-83.8.1167

Kushnir, Y., W.A. Robinson, I. Blade, N.M.J. Hall, S. Peng, R. Sutton (2002), 'Atmospheric GCM responses to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation', *Journal of Climate*, vol. 15, núm. 16, pp. 2233–2256. DOI.org/10.1175/1520-0442(2002)015<233:AGRTES>2.0CO;2. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282002%29015%3C2233%3AAGRTES%3E2.0.CO%3B2

Lawrimore, J., R.R. Heim Jr., M. Svoboda, V. Swail, P.J. Englehart Beginning a new era of drought monitoring across North America Bull. Am. Meteor. Soc., 83 (2002), pp. 1191-1192

Ledesma-Mares, J. C., C. Ramírez-Miranda (1994), 'La producción de frijol en México y sus perspectivas ante el Tratado de Libre Comercio. In: *El TLC y sus repercusiones en el sector agropecuario del centro-norte de México*, Schwentesius R, M. G. Gómez, J. C. Ledesma, C. Gallegos, pp. 39-61. Universidad Autónoma Chapingo: Texcoco, Mexico.

Liverman, D. M. (1999), 'Vulnerability and adaptation to drought in Mexico', *Natural Resources Journal*, vol. 39, núm. 1, pp. 99-115. Disponible en: https://www.jstor.org/stable/24888469?seq=1#page_scan_tab_contents

Medina-Elizalde, M., E. J. Rohling (2012), 'Collapse of classic maya civilization related to modest reduction in precipitation', *Science*, vol. 335, núm. 6071, pp. 956-959. DOI: 10.1126/science.1216629. Disponible en: http://science.sciencemag.org/content/sci/335/6071/956.full.pdf

Méndez, M., V. Magaña (2010), 'Regional aspects of prolonged meteorological droughts over Mexico and Central America', *Journal of Climate*, vol. 23, núm. 5, pp. 1175–1188. DOI.org/10.1175/2009JCL3080.1. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2009JCLI3080.1

Méndez-González, J., A. Ramírez-Leyva, E. Cornejo-Oviedo, A. Zárate-Lupercio, T. Cavazos-Pérez (2010), 'Teleconexiones de la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México', *Investigaciones Geográficas*, núm. 73, pp. 57–70. Disponible en: http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/59450/52673

Mo, K. y D. P. Lettenamier (2016), 'Precipitation Defict Flash Droughts over the United States', *Journal of Hydrometeorology*, vol. 17, núm. 4, pp. 1169-1184. DOI.org/10.1175/JHM-D-15-0158.1. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JHM-D-15-0158.1

Mosemm (2017), 'Monitor de Sequía Multivariado en México', disponible en <(http://www.conacytprensa.mx/index.php/ciencia/ambiente/16402-crean-nuevo-monitor-sequia-multivariado-mexico)> (consultado el 12 de septiembre de 2017).

Namias, J., X. Yuan, D. R. Cayan (1988), 'Persistence of North Pacific sea surface temperature and atmospheric flow patterns', *Journal of Climate*, vol.. 1, núm. 7, pp. 682–703. DOI.org/10.1175/1520-0442(1998)001<0682:PONPSS>2.0.CO;2. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281988%29001%3C0682%3APONPSS%3E2.0.CO%3B2

Núñez, J., M. Hallack-Alegría, M. Cadena (2016), 'Resolving regional frequency analysis of precipitation at large and complex scales using a bottom-up approach: the Latin America and the Caribbean drought atlas', *Journal of Hydrology*, vol. 538, pp. 515–538. Dx. DOI.org/10.1016/j.hydrol.2016.04.025. Disponible en: https://ac.els-cdn.com/S0022169416302062/1-s2.0-S0022169416302062-main.pdf?_tid=509a6c68-7c8f-4b29-adf2-b86f9b179ed0&acdnat=1529529360_bc0f28504f08a4f49ef367f476e407a7

Ropelewski, C. F., M. S. Halper (1996), 'Quantifying southern oscillation-precipitation relationships', *Journal of Climate*, vol. 9, núm. 5, pp.1043-1049. DOI.or-

g/10.1175/1520-0442(1996)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281996%29009%3C1043%3AQSOPR%3E2.0.CO%3B2

SAGARPA (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación) (2003), 'Base de datos de PROCAMPO', Delegación Zacatecas: Zacatecas, Mexico. Disponible en: (http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Programas/proagro/procampo/Paginas/procampo.aspx)

(consultado el 20 de octubre de 2017)

SAGARPA (2014), 'Balanza-disponibilidad-consumo', Mexico City. Disponible en: (http://www.siap.gob.mx/)

(consultado el 20 de octubre de 2017).

Palmer, T. N., Z. Sun (1985), 'A modeling and observational study of the relationship between sea surface temperature in the northwest Atlantic and the atmospheric general circulation', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 111, núm. 470, pp. 947–975. DOI.10.1002/qj.49711147003. Disponible en: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.49711147003

Pineda-Martínez, L. F., N. Carbajal, E. Medina-Roldán (2007), 'Regionalization and classification of bioclimatic zones applying principal components analysis (PCA) in the central-northeastern region of México', *Atmósfera*, vol. 20, núm. 2, pp. 133–146. Disponible en: http://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8576/8046

Rincón-Valdez, F., F. G. Echavarría-Cháirez, F. A. Rumayor-Rodríguez, J. M. Covarrubias, A. G. Bravo-Lozano, E. Acosta-Díaz, J. L. Gallo-Dávila, H. Salinas-González (2004), 'Cadenas de sistemas agroalimentarios de chile seco, durazno y frijol en el estado de Zacatecas: una aplicación de la metodología ISNAR', INIFAP-Zacatecas, publicación especial núm. 14, Mexico City. 158 p. Disponible en: (http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2038/Cadenas%20de%20sistemas%20agroalimentarios%20de%20chile%20seco,%20durazno%20y%20frijol%20en%20el%20estado%20de%20zacatecas.%20Una%20aplicacion%20a%20la%20metodologia%20ISNAR.pdf?sequence=1) (consultado el 20 de octubre de 2017)

Seager, R., Y. Kushnir, M. Visbeck, N. Naik, J. Miller, G. Krahmann, H. Cullen (2000), 'Causes of Atlantic Ocean climate variability between 1958 and 1998', *Journal of Climate*, vol. 13, núm. 16, pp. 2845–2862. DOI.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2845:COACV>2.0.CO;2. Disponi-

ble en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%282000%29013%3C2845%3ACOAOCV%3E2.0.CO%3B2

Seager, R., N. Harnik, W. A. Robinson, Y. Kushnir, M. Ting, H. P. Huang, J. Vélez (2005), 'Mechanisms of ENSO-forcing of hemispherically symmetric precipitation variability', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 131, núm. 608, pp. 1501-1527. DOI.10.1256/qj.04.96. Disponible en: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1256/qj.04.96

Seager, R., M. Ting, I. Held, Y. Kushnir, J. Lu, G. Vecchi, H. P. Huang, N. Hamik, A. Leetmaa, N. C. Lau, C. Li, J. Velez, N. Naik (2007), 'Model Projections of an Imminent Transition to a More Arid Climate in Southwestern North America', *Science*, vol. 316, núm. 5828, pp.1181-1184. DOI: 10.1126/science.1139601. Disponible en: http://science.sciencemag.org/content/sci/316/5828/1181.full.pdf

Seager, R., M. Ting, M. Davis, M. Came, N. Naik, J. Nakamura, C. Li, E. Cook, D. W. Stahle (2009), 'Mexican drought: an observational modelling and tree ring study of variability and climate change', *Atmosfera*, vol. 22, núm. 1, pp. 1-31. Disponible en: http://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8616/8086

Stahle, D. W., E. R. Cook, D. J. Burnette, J. Villanueva, J. Cerano, J. N. Burns, D. Griffin, B. I. Cook, R. Acuña, M. C. A. Torbenson, P. Szejner, I. M. Howard (2016), 'The Mexican Drought Atlas: Tree ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras', *Quaternary Science Reviews*, vol. 149, pp. 34-60. http://dx. DOI.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018. Disponible en: https://ac.els-cdn.com/S0277379116302244/1-s2.0-S0277379116302244-main.pdf?_tid=a1154240-b3d9-4afd-8f75-cd5f2e7b-07b8&acdnat=1529531459_cb6c26e1e7d2ad62aab824d11b903ee5

Tereshchenko, I., A. Zolotokrylin, E. Titkova, L. Brito-Castillo, C. Monzón (2012), 'Seasonal Variation of surface temperature-modulating factors in the Sonoran Desert in Northwestern Mexico', *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 51, núm. 8, pp. 1519-1530. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0160.1. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAMC-D-11-0160.1

Ting, M., S. Peng (1995), 'Dynamics of early and middle winter atmospheric responses to northwest Atlantic SST anomalies', *Journal of Climate*, vol. 8, núm. 9, pp. 2239–2254. DOI.org/10.1175/1520-0442(1995)008<2239:DOTEAM>2.0.CO;2. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281995%29008%3C2239%3ADOTEAM%3E2.0.CO%3B2

Trenberth, K. E., G. W. Branstator, D. Karoly, A. Kumar, N. C. Lau, Ch. Ropelewski (1998), 'Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures', *Journal of Geophysical Research Oceans*, vol. 103, núm. C7, pp. 14291–14324. Doi.10.1029/97JC01444. Disponible en: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/97JC01444

Venzke, S., M. R. Allen, R. T. Sutton, D. P. Rowell (1999), 'The atmospheric response over the North Atlantic to decenal changes in sea surface temperature', *Journal of Climate*, vol. 12, núm. 8, pp. 2562–2584. DOI.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2562:TAROTN>2.0.CO;2. Disponible en: https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442%281999%29012%3C2562%3ATAROTN%3E2.0.CO%3B2

Vega-Camarena, J.P., L. Brito-Castillo, L. M., L. M. Farfán, D.J. Gochis, L. F. Pineda-Martinez, S.C. Díaz (2018). Ocean-atmosphere conditions related to severe and persistent droughts in the Mexican Altiplano. Int. J. Climatol, vol. 38: pp. 853- 866. doi:10.1002/joc.5215.

Wilhite, D. A. (2000), 'Drought as a natural hazard: Concepts and definitions, Drought: A Global Assessment, D. Wilhite, Ed., vol. 1, pp. 3–18.

Wolfe, E. (2017), 'Drought and the origins of the Mexican revolution', Oxford Research Encyclopedia of Latin American History. Oxford University Press, USA, pp. 1-18.

COMPARACIÓN DEL USO DE DATOS METEOROLÓGICOS OBSERVADOS Y PROCESADOS EN MALLA EN LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE EVENTOS EXTREMOS EN UNA CUENCA EN MÉXICO

6

Comparación del uso de datos meteorológicos observados y procesados en malla en la simulación hidrológica de eventos extremos en una cuenca en México

Juan Alberto Velázquez Zapata[1]* ; Edgar Talledos Sánchez[2]*

6.1. Resumen

Los sistemas de alerta hidrológica ante inundaciones están basados generalmente en modelos hidrológicos con los cuales se predice el caudal que pueden afectar a la población. Estos modelos, requieren de datos meteorológicos observados para su implementación en un sistema operacional. En México, como en otros países, los datos meteorológicos observados presentan características (como datos faltantes o baja densidad de estaciones) que dificultan su uso en la modelación hidrológica, por lo que los datos meteorológicos procesados en malla se han visto como una alternativa a las observaciones directas. Esta investigación compara el uso de datos meteorológicos observados con dos bases de datos interpolados en malla y datos de un reanálisis (simulaciones de un modelo numérico) en la simulación hidrológica de caudales medios y extremos en una cuenca de México. Los resultados muestran que los datos en malla presentan diferencias importantes respecto a las observaciones, dado que la temperatura y la precipitación son generalmente subestimadas y el ciclo anual no es correctamente representado. En un segundo paso, las bases de datos seleccionadas se usaron

1 E-mail: javelazquezza@conacyt.mx.
2 E-mail: etalledossa@conacyt.mx.
* Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – El Colegio de San Luis. Parque de Macul 155 Fracc. Colinas del Parque. C.P. 78294. San Luis Potosí S.L.P., México. 5301.

como datos de entrada del modelo hidrológico GR4J para simular caudales diarios con los que se calcularon indicadores hidrológicos medios y extremos. Los resultados muestran que el caudal medio puede ser correctamente estimado con todas las bases de datos, mientras que los indicadores de caudal extremo tienen errores importantes cuando se usan datos meteorológicos procesados, especialmente con el reanálisis, por lo que estos deben usarse con cautela.

Palabras clave: Simulación hidrológica; Datos meteorológicos interpolados; reanálisis.

6.2. Abstract

Flood Warning Systems are often based on hydrological models fed by numerical model data for near future. The hydrological models should be calibrated and validated with observed data before their use in an operational warning system. However, the meteorological data in Mexico often presents problems such as a lack of data or even a low density of stations. Therefore, the post-processed gridded meteorological data could be an alternative source of data for the hydrological modelling. This work compares the use of observed meteorological data with two post-processed gridded data sets and one reanalysis data set in the simulation of mean and high flows over a Mexican basin. Results show that the selected post-processed gridded data sets present important differences with the observed meteorological data, so the precipitation and temperature are generally underestimated and the annual cycle is not well represented. In a next step, the selected meteorological data sets where used to feed the conceptual lumped hydrological model GR4J in order to simulate daily discharge. In addition, four hydrological indicators, the overall mean flow and the 2-yr, 5-yr and 10-yr return period high flow were computed with the hydrological simulations. Results show that the mean flow can be correctly estimated with all meteorological data bases; however, high flow indicators present important errors when the post-processed meteorological data is used, especially with the reanalysis; therefore, they should be used with caution in the calibration and validation of hydrological models.

Keywords: hydrological modelling; post-processed meteorological data; reanalysis

6.3. Introducción

Las inundaciones fluviales se generan cuando el agua de los ríos desborda hacia la superficie cercana (CENAPRED, 2004). En México, las zonas donde podrían esperarse inundaciones frecuente son la Planicie Tabasqueña, la cuenca baja del Río Bravo, la cuenca baja del Río Pánuco y la cuenca baja del Río Coatzacoalcos, entre otras, cubriendo un área en el país de 162 000 km^2 (Arreguín-Cortés *et. al.*, 2016).

En México, actualmente operan diversos sistemas de alerta hidrometeorológica ante riesgos de inundación. Estos sistemas se basan en una red telemática para monitorear la precipitación y los niveles de los ríos en la cuenca, y en algunos casos, incorporan un modelo hidrológico para estimar la cantidad de agua que escurre. En estos sistemas, si el caudal exceda determinado umbral, se activará una alarma (CENAPRED, 2004). Uno de los sistemas de alerta hidrometeorológica implementado en México se encuentra en la cuenca del Bajo Pánuco, el cual monitorea la región localizada entre los estados de Tamaulipas, San Luis Potosí y Veracruz. El sistema es operado por la Comisión Nacional del Agua y basa su funcionamiento en la medición de los niveles de los ríos de la región en 34 puntos (CONAGUA 2017 b). En caso de alerta, la información es enviada a las autoridades de protección civil. Este sistema se basa la información de los caudales medidos en un momento determinado, y, por lo tanto, no proporciona información de pronósticos de caudales con anticipación. Al medir solamente niveles de agua, el sistema no está adaptado como sistema de predicción ante inundaciones (OCDE, 2013).

Para efectuar predicciones hidrológicas, un sistema de alerta necesita datos meteorológicos e hidrométricos y de modelos hidrológicos. Un modelo hidrológico es una representación simplificada de la relación entre la lluvia y el escurrimiento en una cuenca dada. Para su uso en la simulación del escurrimiento, estos modelos hidrológicos son calibrados y validados con observaciones para verificar que son eficientes para reproducir los caudales históricos. Los modelos hidrológicos son utilizados también para estimar los caudales futuros en base en las últimas condiciones observadas en la cuenca (caudales, niveles de agua, de precipitación y temperatura) así como en predicciones de precipitación y temperatura en el futuro próximo (Velázquez *et. al.*

2009). Actualmente, los esfuerzos en el desarrollo de sistemas de predicción hidrológica están enfocados en la utilización de productos como el ensamble de predicciones meteorológicas para realizar una predicción probabilista de caudales (Schaake *et. al.* 2007). Existen sistemas operativos de predicción hidrológica implementados en la Unión Europea que busca brindar información de caudales con un avance de 3 y 10 días (Thielen *et. al.*, 2009). Por otro lado, en Bangladesh se implementó un sistema de predicción hidrológica de 10 a 15 días en avance (Webster *et. al.*, 2010).

Para la implementación de un sistema de predicción hidrológica es necesario tener datos meteorológicos de calidad. Todos los países, tanto desarrollados como en desarrollo, enfrentan retos para obtener, almacenar, manejar y distribuir los datos meteorológicos que requiere un sistema de predicción hidrológica (Pagano *et. al.*, 2014). Uno de los principales problemas es la obtención de datos históricos que alimentan los modelos hidrológicos. En México, a menudo las series temporales de observaciones meteorológicas presentan una gran cantidad de datos faltantes. Otra de las características de los sistemas de medición hidrometeorológica en México es su distribución desigual, dado que hay una gran cantidad de estaciones localizadas en el centro y sur del país, y una cantidad menor de estaciones en el norte. Ante estos problemas en las redes meteorológicas, recientes líneas de investigación en hidrología han evaluado el uso de datos meteorológicos interpolados procesados en malla como datos de entrada en los modelos hidrológicos. Estos datos meteorológicos procesados se obtienen aplicando un método de interpolación estadística a los datos observados en las estaciones meteorológicas para obtener como producto una estimación de las variables en una malla espacialmente distribuida.

Diversos estudios han comparado los datos meteorológicos en malla con datos meteorológicos observados. Por ejemplo, el trabajo de Koutsouris *et. al.*, (2016) comparó siete bases de datos en malla con las observaciones de una región de África y sus resultados muestran diferencias importantes en la precipitación en la temporada de lluvias.

El uso de estos datos meteorológicos en malla en la estimación de caudales ha sido también evaluado, por ejemplo Fekete *et. al.* (2004) usando un modelo global de balance hídrico, encontró que la incertidumbre en la estimación de la precipitación se

traslada a los caudales simulados. El estudio de Velázquez y Dávila (2017) evaluó la diferencia en caudales diarios simulados con observaciones y con una base de datos en malla en dos cuencas de México utilizando un modelo hidrológico. Sus resultados muestran que los caudales diarios medios y altos pueden ser correctamente simulados con ambos tipos de datos, sin embargo el modelo hidrológico representa el régimen hidrológico de manera distinta según el tipo de datos utilizado, por lo que los autores recomiendan evaluar los datos meteorológicos antes de ser usados en una modelación hidrológica. Por otra parte el estudio de Grusson *et. al.* (2017), usando un modelo hidrológico distribuido en una cuenca en Francia, evaluó la eficiencia del modelo en la estimación de caudales promedio mensuales usando datos meteorológicos observados y datos meteorológicos procesados en malla de diferente resolución. Sus resultados muestran que con los datos procesados en malla se obtiene una mejor eficiencia del modelo hidrológico que usando las observaciones meteorológicas. Sin embargo, los autores recomiendan evaluar y seleccionar la base de datos en malla que mejor describan las características climáticas de la cuenca de estudio.

Los estudios anteriores, usando diferentes tipos de datos meteorológicos, evaluaron la eficiencia de un modelo hidrológico para simular caudales diarios y caudales mensuales. Esta investigación se enfoca en la evaluación de cuatro tipos de bases de datos meteorológicas en la estimación de caudales altos en una cuenca de México. La estimación de caudales altos permite conocer los caudales que podrían causar afectaciones debido al desbordamiento de ríos y que son los principales caudales de interés en la predicción de los sistemas de alerta temprana hidrológicos. Así, si dichos caudales son similares, las bases de datos meteorológicos procesados podrían utilizarse con cierta confianza en la implementación de los modelos hidrológicos en un sistema operacional.

Este artículo está dividido de la siguiente forma: la sección "materiales y métodos" describe la cuenca de estudio, las bases de datos meteorológicos seleccionadas, el modelo hidrológico y los indicadores hidrológicos utilizados en esta evaluación. En la sección resultados se comparan las observaciones y las bases de datos seleccionadas en la simulación hidrológica de caudales medios y extremos en la cuenca de estudio. Finalmente la sección conclusiones cierra el manuscrito.

6.4. Materiales y métodos

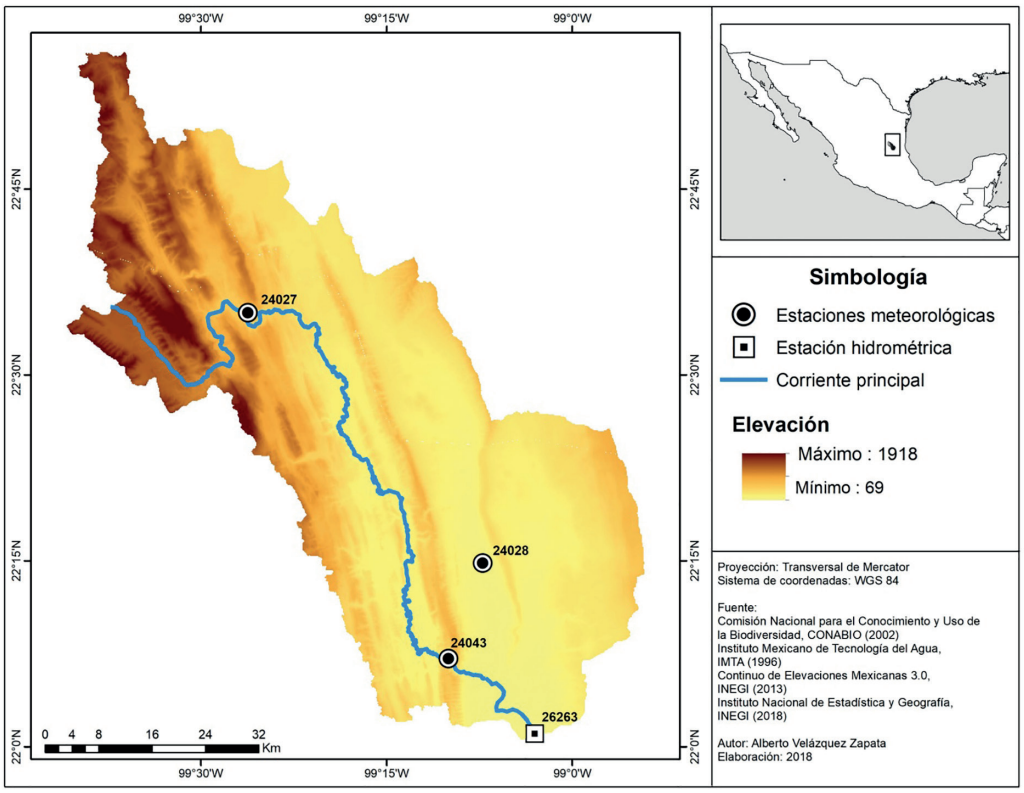
6.4.1. La cuenca de estudio

La cuenca de estudio es la cuenca del Río Valles (3521 km^2), que se localiza principalmente en el Estado de San Luis Potosí (Gráfica 6.1). El Río Valles fluye de norte a sur a través de la Sierra Madre Oriental y descarga en el Río Tampaón, siendo el principal tributario del mismo. A su vez, el Río Tampaón converge con el río Moctezuma y toma el nombre de Río Pánuco, el cual desemboca en el Golfo de México. Los datos de caudales diarios fueron obtenidos del Banco de Aguas Superficiales del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua en la estación Santa Rosa (I.D. 26263). La cuenca del Río Valles tiene una precipitación media anual de 1323 mm y una temperatura media anual de 23.6°C y presenta climas tipo Tropical Savanna (Aw) y Tropical Monsoon (Am, Peel *et. al.*, 2007). A pesar de localizarse en una región con altas precipitaciones y corrientes superficiales, la cuenca tiene problemas de escasez en la distribución del agua debido a una mala gestión (Jabardo y Padilla 2016). La cuenca del Río Valles se encuentra localizada en una región cárstica que se caracteriza por un flujo de aguas subterráneas de las regiones altas en la Sierra de Álvarez, al oeste de la cuenca, hacia el Golfo de México (Morán- Ramirez *et. al.*, 2013).

La cercanía de la cuenca del Río Valles con el Golfo de México la hace susceptible a la influencia de las precipitaciones ocasionadas por los ciclones tropicales que entran a tierra por la costa norte de Veracruz y la costa sur de Tamaulipas. Así, el área urbana de ciudad Valles, localizada en las márgenes del Río Valles, se ha visto afectada por inundaciones ocasionadas por diversos ciclones tropicales. Por ejemplo, los huracanes Janet e Hilda en 1955 (ambos categoría 5) ocasionaron daños a carreteras y cultivos, 8 000 muertos y más de 1000 casas destruidas (Blanco Loredo, 2011). Recientemente otros eventos hidrometeorológicos, como las lluvias provocadas por frentes fríos, han provocado que desborden ríos y se provoquen importantes afectaciones a viviendas e infraestructuras. Dado que la cuenca del río Valles es susceptible de afectaciones por fenómenos meteorológicos, ésta es monitoreada como parte del Sistema de Alerta en Tiempo Real para la Protección a Centros de Población con alto grado de riesgo en la Cuenca Baja del Río Pánuco.

6.4.2. Datos meteorológicos

Los datos de precipitación diaria y temperatura media diaria usados en esta investigación provienen de cuatro fuentes como se muestra en la Cuadro 6.1. Las observaciones (Do) se obtuvieron de tres estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) localizadas dentro de la cuenca de estudio (ver Gráfica 6.1) vía la web del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada). Además, se recuperaron las variables meteorológicas de dos bases de datos en malla en diferente resolución: la base de datos D1 ha sido presentada por Zhu and Lettenmaier (2007), la cual interpola las variables meteorológicas de 5000 estaciones del SMN usado el peso ponderado de todos los registros disponibles dentro de una celda dada para obtener precipitación y temperatura diaria; la bases de datos D2 fue propuesta por Livneh *et. al.* (2015) y se basa la interpolación de datos de las estaciones meteorológicas del SMN incorporando un ajuste topográfico para tomar en cuenta la precipitación orográfica. Finalmente, la base de datos D3 es un reanálisis, esto es, simulaciones de variables meteorológicas provenientes de un modelo numérico que incorpora datos de satélite, radiosonda y observaciones de estaciones meteorológicas. En este estudio, se utilizó el reanálisis CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) del NCEP (National Centers for Environmental Prediction) de los Estados Unidos (Saha *et. al.* 2010). Las variables simuladas provenientes del reanálisis han sido usadas en modelación hidrológica sustituyendo a las observaciones directas o a los datos procesados en malla. Por ejemplo, el estudio de Fuka *et. al.*, (2014) reporta que las simulaciones de caudales obtenidas con CFSR son iguales o mejores a las simulaciones de caudales obtenidas con variables observadas en cuencas localizadas en Estados Unidos y Etiopía. Para esta investigación, se usó el periodo 1979-1996 el cual es común a todas las bases de datos.



Gráfica 6.1. Localización de la cuenca del río Valles. Elaboración propia con información de la CONABIO, IMTA e INEGI. Las estaciones meteorológicas están identificadas con su número en el sistema CLICOM (CISESE 2017)

6.4.3. Modelo hidrológico

El modelo hidrológico seleccionado es GR4J (Perrin *et. al*, 2003) el cual es un modelo del tipo conceptual agregado, esto es, el modelo toma en cuenta a la cuenca como una unidad con características homogéneas en tipo de suelo y variables meteorológicas. El modelo GR4J simula el caudal a paso diario y utiliza como datos de entrada la evapotranspiración potencial (ETP) y la precipitación promedio diaria en la cuenca. Para este estudio, la ETP fue estimada con la fórmula propuesta por Oudin *et. al.*, (2005) la cual requiere datos de temperatura promedio diaria y de radiación solar. El modelo GR4J ha sido evaluado por Pagano *et. al.*, (2010) en su capacidad para predecir caudales en horizontes de 14 días en 240 cuencas en Australia.

El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS; Nash y Sutcliffe, 1970) fue utilizado para la evaluar la simulación de caudales en la cuenca de estudio utilizando

las bases de datos meteorológicas seleccionadas. La ecuación siguiente describe el coeficiente NS:

$$NS = \frac{\sum_{=1}^{n} (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^{n} (Q_{sim,i} - \overline{Q}_{obs,i})^2}$$

Ecuación 6.1

Donde $Q_{obs,i}$ y $Q_{sim,i}$ son el caudal observado y el caudal simulado respectivamente en el paso de tiempo i, y n es el número total de observaciones. El valor de NS tiene un rango de -∞ a 1, siendo el valor de NS=1 el correspondiente a un ajuste perfecto entre caudal observado y simulado.

Para esta investigación se seleccionaron cuatro indicadores hidrológicos: Qm: es el caudal promedio diario; HF2, HF5 y HF10 son los caudales con un periodo de retorno de 2, 5 y 10 años respectivamente. Para calcular estos tres indicadores de caudal extremo, las series de caudales diarios se ajustaron a la distribución de probabilidad de log Pearson III.

6.5. Resultados y Discusión

El modelo GR4J requiere de una serie de tiempo de la precipitación promedio diaria de la cuenca. Para obtenerla, en el caso de los datos D1, D2 y D3 se realizó el promedio de los puntos de la malla que se encuentran dentro de la cuenca. En el caso de las observaciones de las estaciones meteorológicas (Do), la precipitación promedio se obtuvo con el método de los Polígonos de Thiessen (OMM, 1994). En el caso de la temperatura máxima (Tmax) y mínima (Tmin) se obtuvo el promedio simple en cada base de datos.

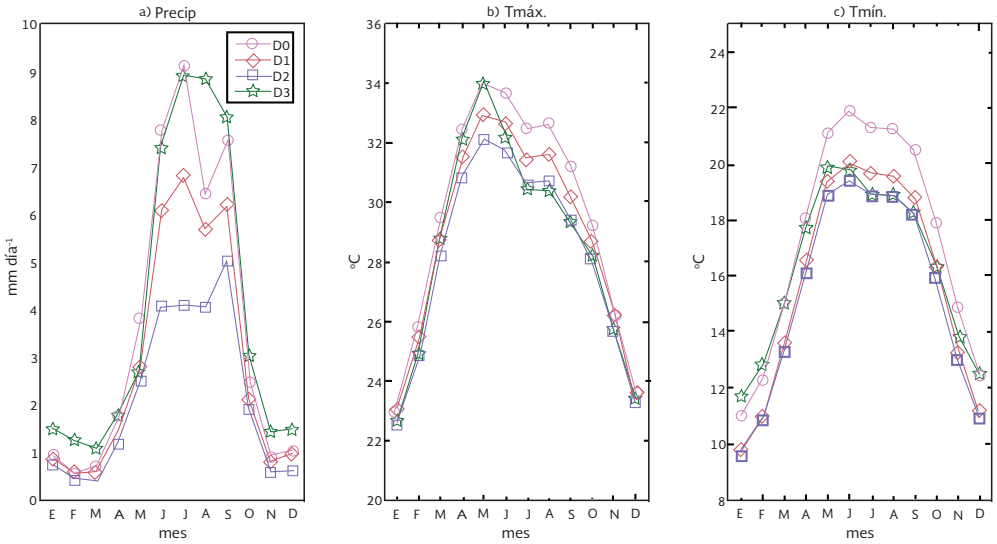
La Gráfica 6.2 muestra el promedio mensual de las variables meteorológicas en la cuenca de estudio. Los datos procesados en malla D1 y D2 subestiman la precipitación observada en temporada de lluvias (de mayo a octubre). Por ejemplo, la precipitación promedio para el mes de junio es de 9 mm día $^{-1}$ para los datos observados y 6.8 y 4 mm día $^{-1}$ para D1 y D2 respectivamente. En el caso del reanálisis (D3), la precipitación

del mes de junio es 8.9 mm dia^{-1} el cual es cercano al valor observado, sin embargo la precipitación del reanálisis en los meses de noviembre a mayo (temporada seca) es sobreestimada.

Cuadro 6.1. Bases de datos usadas en este estudio

ID	Tipo de datos	Referencia
Do	Datos meteorológicos observados en tres estaciones meteorológicas	CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional (CICESE 2017a)
D1	Datos meteorológicos interpolados en una malla de 1/8 °	CLICOM en malla (CICESE 2017b ; Zhu and Lettenmaier, 2007; Muñoz-Arreola *et. al.*, 2009)
D2	Datos meteorológicos interpolados en una malla de Malla de 1/16 °	L15 hydrometeorological data set for Mexico, the U.S., and Southern Canada (Livneh *et. al.* 2015)
D3	Datos de reanálisis en malla de 1/2 °	Climate Forecast System Reanalysis (CFSR); Saha *et. al.*, 2010.
	Caudales de la estación hidrométrica Santa Rosa.	(CONAGUA 2017 a) Banco Nacional de Aguas Superficiales

Fuente: elaboración propia



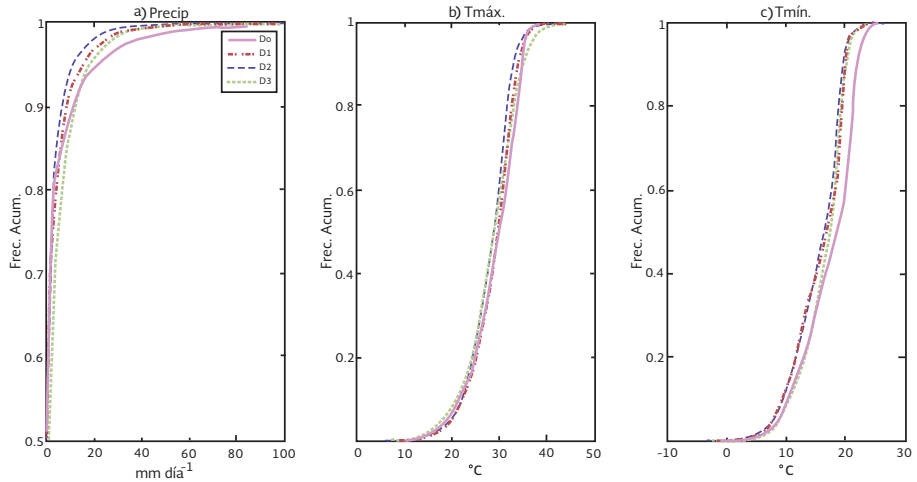
Gráfica 6.2. Promedio mensual (1979-1996) obtenido con las bases de datos meteorológicas seleccionados para a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima. Fuente: elaboración propia con las bases de datos meteorológicas seleccionadas para este estudio.

La Gráfica 6.2 muestra que la precipitación promedio mensual observada (Do) presenta dos picos en junio y septiembre, y una disminución en agosto correspondiente al periodo de canícula. En la Gráfica 6.2a se muestra que D1 estima el periodo de

canícula, mientras que D2 presenta solo un pico en septiembre y D3 no simula la disminución de precipitación en agosto.

Respecto a la temperatura, la Gráfica 6.2b y Gráfica 6.2c muestran, en general, una subestimación de los datos procesados en malla respecto a la temperatura observada (Do). Por ejemplo, la temperatura máxima observada en julio es 33.6°C mientras que el valor es 32.6°C, 31.8 C y 32.2°C para D1, D2 y D3 respectivamente.

La Gráfica 6.3 muestra la función de distribución acumulada para las variables meteorológicas obtenidas con las observaciones y con los datos procesados en malla, y el Cuadro 6.2 muestra diversos cuantiles de interés. Podemos observar que en el caso de la precipitación, el cuantil 50 de las observaciones (Do) es sobrestimado por todas las bases de datos procesados en malla dado que la mediana de la precipitación de Do es 0 mm. En el caso de los extremos de precipitación, el cuantil 95 también muestra una subestimación de 5.49, 8.93 y 1.98 mm día^{-1} para D1, D2 y D3 respectivamente. En el caso de la temperatura máxima, el cuantil 90 es subestimado en 1.4°C, 2.3°C y 0.4°C para D1, D2 y D3 respectivamente. En general las bases de datos procesados en malla muestran diferencias importantes con las observaciones de las estaciones meteorológicas en la cuenca de estudio. A continuación se evalúa estas diferencias en la simulación hidrológica.



Gráfica 6.3. Función de distribución acumulada obtenida con las bases de datos seleccionadas para a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima en el periodo 1979-1996.Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6.2. Percentiles para la precipitación, la temperatura máxima y la temperatura mínima obtenidos con las bases de datos seleccionadas en el periodo 1979-1996.

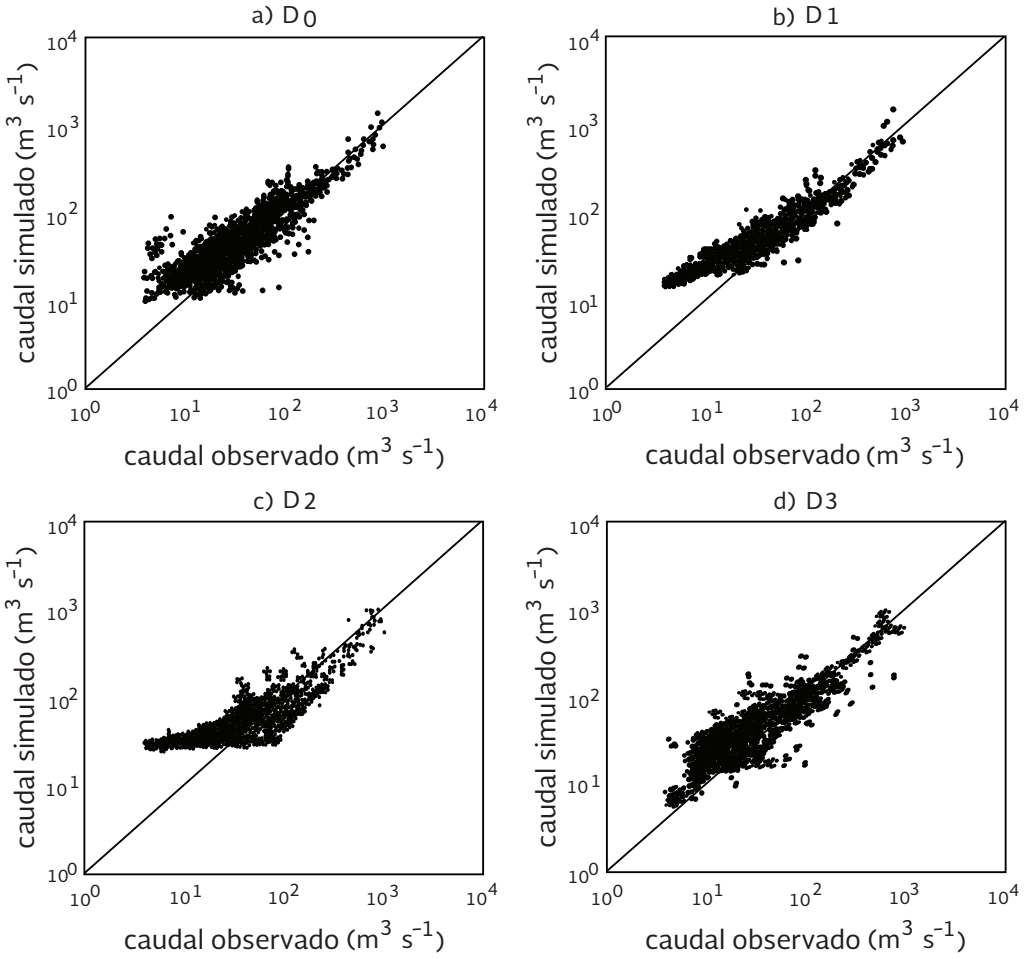
Precipitación (mm dia^{-1})				
Percentil	Do	D1	D2	D3
q50	0	0.29	0.15	0.70
q75	1.39	2.28	1.66	4.30
q95	20.61	15.12	11.68	18.63
Temperatura máxima (°C)				
Percentil	Do	D1	D2	D3
q10	22.0	22.5	22.2	20.8
q50	30.3	29.5	28.9	29.1
q90	35.5	34.1	33.2	35.1
Temperatura mínima (°C)				
Percentil	Do	D1	D2	D3
q10	10.5	9.4	9.3	10.7
q50	18.6	16.5	16.5	17.4
q90	22.1	19.6	19.7	20.2

Fuente: elaboración propia con las bases de datos meteorológicas seleccionadas.

El Cuadro 6.3 muestra el coeficiente de eficiencia NS obtenido con los caudales simulados con observaciones (Do) y con los datos en malla, en el periodo de calibración y validación de GR4J. Podemos observar que el modelo puede ser calibrado correctamente con todas las bases de datos, obteniendo valores de NS entre 0.7 (D3) y 0.86 (Do). En el periodo de validación, se obtiene un valor NS alto para Do y D1, y un valor NS bajo para D2. Por otro lado D3 (reanálisis) tiene un valor NS negativo, lo que muestra una falta de eficiencia para modelar los caudales en un periodo independiente.

La Gráfica 6.4 muestra los caudales diarios observados y simulados con las observaciones y los datos en malla en el periodo de calibración. En este diagrama de dispersión, la cercanía de los puntos a la línea 1:1 significa una buena correspondencia entre observaciones y simulaciones. En la Gráfica 6.4 se muestra que, si bien se obtiene una buena eficiencia en la simulación (en términos de NS) con D1 y D2, los caudales diarios bajos no son correctamente modelados dado que hay una fuerte sobreestimación de los caudales observados. La simulación con Do (observaciones) (Gráfica 6.4a) también sobrestima ligeramente los caudales bajos mientras que con el reanálisis (Gráfica 6.4d) se obtiene una mejor representación de éstos. Los caudales medios y altos son correc-

tamente simulados con todos los tipos de bases de datos. La cuenca de estudio es una cuenca del tipo cárstico, por lo cual el caudal de la cuenca puede tener aportaciones o pérdidas debido al intercambio de agua subterránea. El modelo GR4J toma en cuenta este intercambio, y el análisis de los parámetros calibrados del modelo muestra que usando las variables observadas, GR4J estima que la cuenca tiene aportación de agua subterránea al caudal. Por otro lado, GR4J calibrado con D1 y D2 estima aportaciones 4.1 y 5.5 más grandes respectivamente que la aportación estimada con las observaciones. En cambio, con D3 el modelo GR4J estima que el modelo tiene perdidas de caudal hacia el agua subterránea. Las diferencias entre la precipitación entre los tipos de datos meteorológicos da como resultado que el modelo simule el comportamiento hidrológico de la cuenca de manera muy diferente según el tipo de datos considerado.



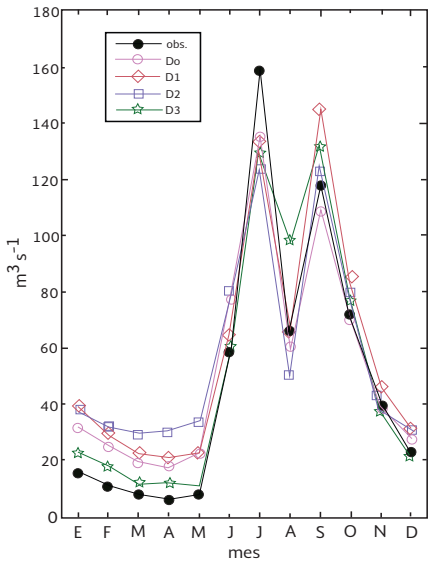
Gráfica 6.4. Caudales diarios observados y simulaciones hidrológicas para el periodo de calibración (1990-1994) obtenidos con las bases de datos seleccionadas.

Cuadro 6.3. Coeficiente de Nash Sutcliffe para las simulaciones hidrológicas diarias obtenido con los datos meteorológicos seleccionados en los periodos de calibración (Cal.) y validación (Val.).

Datos .	Coeficiente Nash-Sutcliffe	
	Cal. (1990-1994)	Val. (1986-1989)
Do	0.86	0.75
D1	0.82	0.85
D2	0.85	0.42
D3	0.70	-0.93

Fuente: elaboración propia.

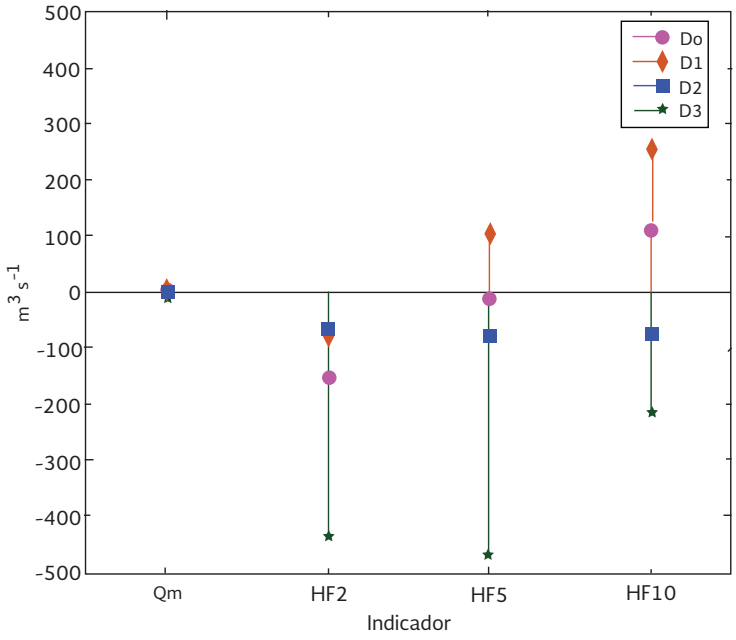
La Gráfica 6.5 muestra el caudal promedio mensual observado (i.e. medido en la estación hidrométrica) y el caudal simulado con las bases de datos seleccionadas. Al igual que con la precipitación, el caudal observado muestra dos picos en julio y septiembre, y un decremento en agosto. El pico de julio es subestimado por todas las simulaciones, mientras que el pico de septiembre es correctamente representado por la simulación con los datos meteorológicos observados (Do). El decremento en agosto no es simulado correctamente por el reanálisis (D3) dado que la precipitación de esta base de datos tampoco estima la canícula. En los meses de enero a marzo donde se presenta el caudal bajo es, en cierta medida, subestimado por todas las bases de datos.



Gráfica 6.5. Caudal mensual observado (obs) y simulados en el periodo para el periodo de calibración (1990-1994) obtenidos con las bases de datos seleccionadas.
Fuente: elaboración propia

El análisis del error entre en los indicadores hidrológicos calculados con el caudal observado y el indicador calculado con las simulaciones hidrológicas se muestra en la Gráfica 6.6. Así, el caudal medio de la cuenca tiene un error (respecto al caudal medio observado) entre1 m^3s^{-1} y 8.5 m^3s^{-1}.

Por otro lado, la Gráfica 6.6 muestra que el error es mayor con los indicadores extremos; por ejemplo, para HF2 el intervalo del error se encuentra entre -70 m^3s^{-1} con D2 y -434 m^3s^{-1} con D3. En el caso de HF5, el error se encuentra entre -11 m^3s^{-1} con Do y -466 m^3s^{-1} con D3. El error en el indicador HF10 es menor para las simulaciones con observaciones (Do) y con D2, si bien en este indicador el error es tanto positivos como negativo. Estos resultados muestran que, para la cuenca de estudio, el caudal medio de la cuenca puede ser evaluado correctamente con cualquiera de las bases de datos meteorológicos, tanto observaciones como datos meteorológicos procesados o el reanálisis. Los resultados en los indicadores extremos son mixtos: las simulaciones con las observaciones (Do) y con D2 presentan los errores menores, mientras que con el reanálisis la subestimación es importante.



Gráfica 6.6. Error calculado entre el indicador hidrológico obtenido con el caudal observado y los indicadores hidrológicos obtenidos con las bases de datos meteorológicas seleccionadas para el periodo de calibración del modelo (1990-1994). Fuente: elaboración propia

6.6. Conclusiones

En México, como en otros países del mundo, los registros hidrometeorológicos se caracterizan por tener datos incompletos que dificultan su uso para obtener conocimiento local del clima. Además, en el país existe una distribución desigual en la red de estaciones hidrometeorológicas que concentra las estaciones en las regiones húmedas del país (centro y sur) mientras que la red en la zona árida del país (norte) tiene una densidad mucho menor. Otro de los problemas que enfrenta la red de medición meteorológica es el abandono de las estaciones existentes. Un recorrido de campo en la zona de estudio de esta investigación (zona Huasteca de San Luis Potosí) identificó diversos problemas: por ejemplo, de comunicación para reportar datos diarios medidos a la central de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) o bien la falta de reposición del equipo dañado.

Ante los problemas en los registros hidrometeorológicos en diversas zonas del mundo, el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) insta a la investigación y desarrollo de bases de datos meteorológicos procesados en malla (IPCC, 2014). Así, esta investigación evalúa el uso de datos procesados en malla en la simulación hidrológica y en indicadores de caudal medio y extremo en una cuenca del centro-este de México. Esta evaluación es un indicador del posible uso de este tipo de datos en la modelación hidrológica para sistemas de alerta operacionales ante riesgos de inundación.

En un primer paso, se comparó la base de datos de observaciones con dos bases de datos meteorológicos interpolados en malla y datos obtenidos de un reanálisis (simulaciones de un modelo numérico). Nuestros resultados muestran una subestimación de la precipitación por parte de las bases de datos interpolados, mientras que los datos del reanálisis no simulan correctamente el ciclo anual observado. Respecto a la temperatura, en general se encontró una subestimación de los datos evaluados respecto a las observaciones.

En un segundo paso, las bases de datos seleccionadas se usaron para simular caudales diarios mediante un modelo hidrológico. Los resultados muestran que se el

modelo hidrológico puede ser calibrado correctamente con todas las bases de datos seleccionadas mostrando niveles de eficiencia altos. En la validación del modelo en un periodo independiente, se encontró que solamente una base de datos meteorológicos interpolados obtiene buenos resultados de eficiencia. El análisis de los parámetros calibrados del modelo muestra que, si bien se obtiene en general una buena eficiencia del modelo en el periodo de calibración, el comportamiento hidrológico simulado por el modelo en la cuenca es diferente entre sí, según la base de datos considerada.

Finalmente, se evaluaron diversos indicadores obtenidos con las distintas simulaciones hidrológicas. Los resultados muestran que, en general, hay una sobreestimación de los caudales bajos en la época seca y una subestimación en el pico del mes de julio. Además, el caudal medio puede ser correctamente representado por todas las bases de datos seleccionadas. Por el contrario, en los caudales extremos el resultado es mixto: el error es menor cuando se usan las observaciones meteorológicas y una de las dos bases de datos interpolados en malla, mientras que al usar los datos de reanálisis el error es muy grande.

El uso de datos procesados en malla en la simulación hidrológica debe usarse con cautela dado que con ellas se representa el régimen hidrológico de la cuenca de manera distinta. Si bien los productos de datos meteorológicos procesados en malla pueden ser de ayuda cuando se evalúa caudal medio, su uso en indicadores extremos es menos confiable. Los resultados de esta investigación deben ampliarse a otras cuencas de México con diferentes condiciones climáticas y usando diferentes modelos hidrológicos y bases de datos meteorológicos.

6.7. Agradecimientos

Los autores agradecen a los grupos de investigación que desarrollaron e hicieron accesibles las bases de datos hidrometeorológicos usadas en este estudio.

6.8. Referencias

Arreguín-Cortés, F., López-Pérez, M. y Marengo-Mogollón, H. (2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. *Tecnología y Ciencias del Agua, 7* (5), 5-13. Recuperado de http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1267

Blanco Loredo, H. (2011). *Vulnerabilidad de la Huasteca potosina ante el impacto de huracanes* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

CENAPRED (2004).Inundaciones. Recuperado de http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF

CICESE (2017 a). Base de datos del CLICOM. Recuperado de http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html

CICESE (2017 b). CLICOM-malla. Recuperado de http://clicom-mex.cicese.mx/malla/

CONAGUA (2017 a). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Recuperado de: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm

CONAGUA (2017 b). Sistema de alertamiento en Tiempo Real SATR. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/satr2/

Fekete, B., Vörösmarty, C., Roads, J. and Willmott, C. (2004). Uncertainties in precipitation and their impacts on runoff estimates. *Journal of Climate*, *17*(2), 294-304. DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<0294:UIPATI>2.0.CO;2

Fuka, D., Walter, M., MacAlister, C., Degaetano, A., Steenhuis, T and Easton Z. (2014). Using the climate forecast system reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes, 28*(22), 5613–5623. DOI: 10.1002/hyp.10073

Grusson, Y., Anctil, F., Sauvage, S.and Sánchez, J. (2017). Testing the SWAT Model with Gridded Weather Data of Different Spatial Resolutions. *Water*, *9* (1), 54. DOI: 10.3390/w9010054

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). Climate Change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental pa panel on climate change. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

Jabardo, V., y Padilla L. (2016). La escasez de agua en la Huasteca Potosina (México): conflictos locales. *Revista Universitaria de Geografía*, *25*(2), 133-165. Recuperado de: http://www.redalyc.org/pdf/3832/383249118006.pdf

Koutsouris, A., Chen, D. and Lyon S. (2016). Comparing global precipitation data sets in eastern Africa: a case study of Kilombero Valley, Tanzania. *International Journal of Climatology*, *36* (4), 2000-2014. DOI: 10.1002/joc.4476

Livneh B., Bohn T., Pierce D., Muñoz-Arriola F., Nijssen B., Vose R.,... and Brekke L. (2015). A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the U.S., and Southern Canada 1950-2013. *Scientific Data, 2*, 150042. DOI: 10.1038/sdata. 2015.42.

Morán-Ramírez, J., Ramos-Leal, J., López-Álvarez, B., Carranco, S., and Santacruz-De León G. (2013). Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso Huasteca Potosina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *65* (1), 71-82. Recuperado de: http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/vols/epoca04/6501/(6)Moran.pdf

Muñoz-Arriola, F., Avissar, R., Zhu, C., and Lettenmaier, D. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Water Resources Research, 45* (11). DOI: 10.1029/2007WR006783

Nash, J., and Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part 1-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, *10*(3), 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6

OCDE. (2013), Estudio de la OCDE sobre el Sistema Nacional de Protección Civil en México. Recuperado de: https://read.oecd-ilibrary.org/governance/estudio-de-la-ocde-sobre-el-sistema-nacional-de-proteccion-civil-en-mexico_9789264200210-es#page2

OMM (Organización Meteorológica Mundial) (1994) *Guía de prácticas hidrológicas, adquisición y proceso de datos, análisis, predicciones y otras aplicaciones*. Recuperado de: ftp://ftp.conagua.gob.mx/CambioClimatico/PONENCIAS/Publicaciones_DanielAllasia/WMOSPA.pdf

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andreassian, V., Anctil F. and Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2–

Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, *303*(1), 290-306. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

Pagano, T., Hapuarachchi, P. and Wang Q.J. (2010). *Continuous rainfall-runoff model comparison and short-term daily streamflow forecast skill evaluation.* Recuperado de: https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP103545&dsid=DS1

Pagano, T., Wood, A., Ramos, M.E., Cloke, H., Pappenberger, F., Clark, M.,... Verkade, J. (2014). Challenges of Operational River Forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, *15*(4), 1692-1707. DOI: 10.1175/JHM-D-13-0188.1

Peel, M., Finlayson, B. and McMahon T. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, *11*, 1633-1644. DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007

Perrin C., Michel C. and Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279 (1-4), 275-289. DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu,X., J. Wang, J., Nadiga, S.,... Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *91* (8) 1015-1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1

Schaake, J., Hamill, T., Buizza, R. and Clark, M. (2007). HEPEX: The Hydrological Ensemble Prediction Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *88*(10), 1541–1547. DOI: 10.1175/BAMS-88-10-1541

Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H and de Roo, A. (2009). The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences, 13*(2), 125-140. DOI: 10.5194/hess-13-125-2009

Velázquez, J., y Dávila, R. (2017). Uncertainty related to processed gridded meteorological data: implications for hydrological modelling. *Ingeniería, Investigación, y Tecnología*, *XVIII* (2), 199-208. Recuperado de: http://www.redalyc.org/pdf/404/40450393007.pdf

Velázquez, J., Petit, T., Lavoie, A., Boucher, M.-A., Turcotte, R., Fortin, V., and Anctil, F. (2009). An evaluation of the Canadian global meteorological ensemble prediction system for short-term hydrological forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(11),

2221-2231. Recuperado de: https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/2221/2009/hess-13-2221-2009.pdf

Webster, P., Jian, J., Hopson, T., Hoyos, C., Agudelo, P., Chang, H.R., ...Subbiah, A.R. (2010). Extended-range probabilistic forecasts of Ganges and Brahmaputra floods in Bangladesh. *Bulletin of the American Meteorological Society, 91*(11), 1493-1514. DOI: 10.1175/2010BAMS2911.1

Zhu, C. and Lettenmaier, D.(2007). Long-Term Climate and Derived Surface Hydrology and Energy Flux Data for Mexico: 1925–2004. *Journal of Climate*, *20*(9), 1936-1946. DOI: 10.1175/JCLI4086.1

MODELACIÓN NUMÉRICA PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS METEOROLÓGICOS EN EL ESTADO DE VERACRUZ

7

Modelación numérica para la prevención de riesgos meteorológicos en el estado de Veracruz

Jorge Humberto Bravo Méndez[1]; Saúl Miranda Alonso[2]

7.1. Resumen

Debido al riesgo de Veracruz ante fenómenos meteorológicos extremos como son frentes fríos, ciclones tropicales, ondas del este, fenómenos de mesoescala y locales, y/o la interacción entre estos, la Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz (SPC-Ver) instauró el Centro de Estudios y Pronósticos Meteorológicos (CEPM), cuyo objetivo principal es "vigilar las condiciones meteorológicas, climáticas y marítimas a corto, mediano y largo plazo con la finalidad de alertar a las autoridades estatales y municipales, así como al público en general". Para mejorar las alertas y pronósticos del tiempo se ha implementado en forma operacional el modelo numérico de computadora Weather Research and Forecasting (WRF). El modelo cubre una área que abarca la Región Golfo Centro como definida por CONAGUA y otra parte adicional en el norte para cubrir completamente el estado de Veracruz. Dado que el CEPM cuenta con meteorólogos de carrera laborando durante los 365 días del año, se tiene la posibilidad de comparar día a día los datos medidos proporcionados principalmente por la CONAGUA, así como el pronóstico clásico, contra los resultados que arroja el modelo.

Palabras clave: Pronóstico numérico operativo, protección civil.

1 jh.herk@gmail.com
2 saul.malo@gmail.com
* Centro de Estudios y Pronósticos Meteorológicos de la Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz

7.2. Introducción

Los seres humanos siempre se han preocupado por el tiempo: marineros y molineros necesitaban conocimientos sobre los vientos; los agricultores preocupados por lo poca o demasiada precipitación, el momento en que se presentará la precipitación o inundación. (Mölders and Kramm, 2014).

Los riesgos hidrometeorológicos son responsables del 90% de las pérdidas totales causadas por los desastres en todo el mundo. Entre 1970 y 2012, eso significó pérdidas económicas por USD 2,4 billones y 2 millones de muertos (Banco Mundial, 2017).

El principal riesgo para la salud y los bienes materiales de la población y de la infraestructura en el Estado de Veracruz es por causas hidrometeorológicas. Con el 33-35 por ciento de toda el agua superficial de México, escurriendo por 12 cuencas principales y más de 5000 ríos y arroyos, con una precipitación mensual de más de 1400 mm, Veracruz es un estado privilegiado en cantidad de agua superficial.

Veracruz también está expuesto a fenómenos meteorológicos extremos como los provenientes de frentes fríos potentes y ciclones tropicales principalmente y la interacción entre estos fenómenos con otros de menor tamaño como sistemas convectivos de mesoescala y vaguadas entre otros.

Un gran acierto ha sido el conjuntar en la misma institución a los previsores del tiempo con los operadores de las emergencias, permitiendo una interacción rápida y sustanciosa. Adicionalmente, un grupo de investigación aplicada, totalmente dirigido a resolver problemas reales de las comunidades está innovando soluciones. Este acompañamiento de habilidades está aumentando la eficiencia en acciones de prevención y reacción, e incrementa la rapidez en la toma de las decisiones adecuadas de nuestras autoridades. Se marca así una opción que se puede manejar a nivel nacional.

La principal actividad en el CEPM es el pronóstico operativo del tiempo, cubriendo los 365 días del año. Se emiten reportes, boletines avisos especiales y alertas preventivas. Los meteorólogos operativos dependen de las imágenes de satélite para inter-

pretar las condiciones atmosféricas en ese momento y de los resultados de modelos numéricos para elaborar los pronósticos hasta a cinco días. Con la finalidad de mejorar las alertas y pronósticos del tiempo atmosférico que actualmente se realizan se ha implementado el modelo numérico "Weather Research and Forecasting (WRF)" en forma operativa y automática.

7.3. Antecedentes

En el Centro de Estudios y Pronósticos Meteorológicos (CEPM) de la Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz (SPC-Ver) se requería del soporte de un pronóstico numérico del tiempo que proporcionara más detalle en tiempo y espacio para las distintas zonas del estado.

A inicios de 2014, con la finalidad de trabajar en acciones oportunas de prevención de riesgos ante fenómenos meteorológicos y buscando mejorar las alertas y pronósticos del tiempo atmosférico, se comenzó a trabajar en la implementación operativa para Veracruz del modelo de pronóstico del tiempo "*Weather Research and Forecasting* (WRF)".

El principal cuello de botella ha sido la falta de poder de cómputo. Con las computadoras con las que el CEPM disponía en el 2014, un pronóstico a 24 horas de las condiciones del tiempo requería aproximadamente 12 horas, por lo cual, no era práctica la implementación operativa del modelo. Se empezó con simulaciones a muy corto plazo con los recursos disponibles.

Para principio del 2016 ya se contaba con experiencia en la compilación y ejecución del modelo WRF y se comenzó con la automatización de todo el proceso. Por las mismas fechas y con apoyo de personal del Centro Estatal de Telecomunicaciones del Estado de Veracruz, se instaló vía remota y a modo de prueba el modelo WRF de forma exitosa, sin embargo en esta ocasión la baja calidad en el servicio de conexión vía Internet fue la limitante para continuar con el proyecto.

Ya a mediados de 2016, se logra adquirir una máquina con mayor capacidad que permitió la implementación del modelo WRF en forma operativa, además se generaron procesos de automatización en lenguajes de programación python y ncl, para el pre y post proceso del modelo.

En la actualidad se ha implementado el modelo WRF de forma automática operativa, sin la necesidad de un operador que vigile su ejecución. El proceso se inicia con la descarga de los datos de entrada disponibles vía Internet, producidos como resultados de modelos de escala global o hemisférica. Se culmina con el despliegue de mapas en una página web, elaborada también en el CEPM y alojada en GitHub.

7.4. Objetivo

Demostrar la utilidad operativa de la implementación regional para Veracruz del modelo WRF. Se comparan los resultados del pronóstico del modelo WRF contra datos medidos por CONAGUA para dos eventos de fenómenos meteorológicos extremos.

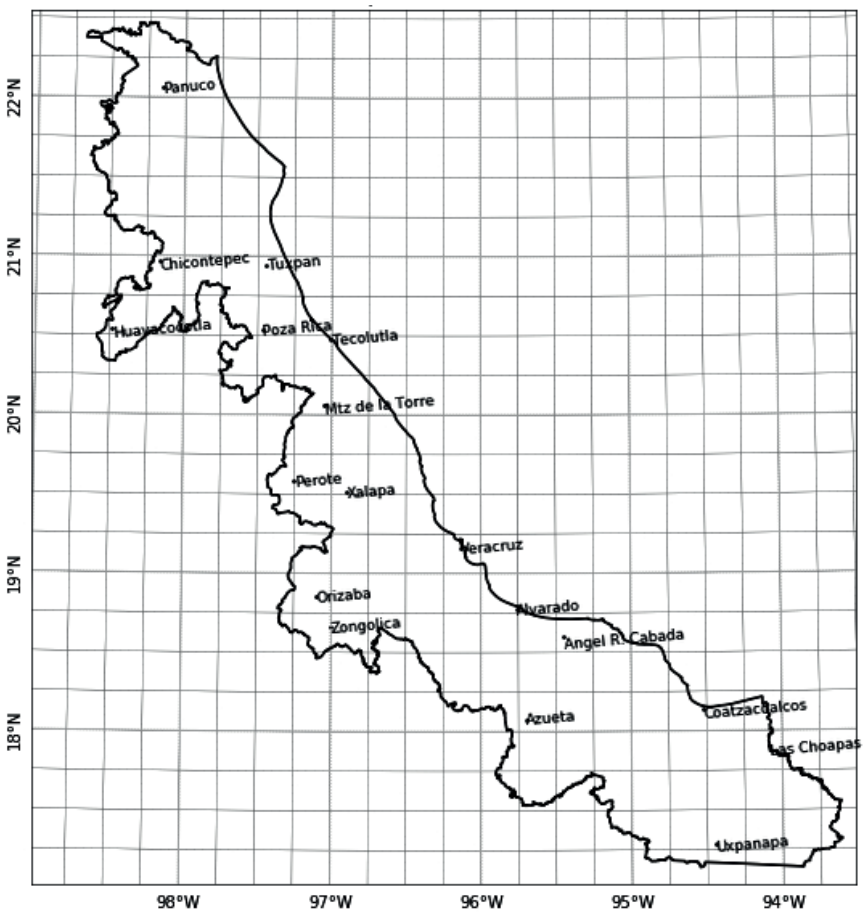
7.5. Metodología

La predicción numérica del tiempo (PNT) es un método de pronóstico que emplea el conjunto de ecuaciones que describen el flujo de fluidos en la atmósfera. Estas ecuaciones son traducidas en código de ordenador y utilizan ecuaciones de gobierno, métodos numéricos, parametrizaciones de procesos físicos y se combinan con condiciones iniciales y de frontera sobre un dominio (área geográfica). Casi cada paso en PNT incluye omisiones, estimaciones, aproximaciones y compromisos (NOAA y NWS, 2017). Algunos de los modelos de acceso libre que se utilizan en el CEPM se mencionan en el Anexo 1.

Debido a que la resolución espacial de los modelos de pronóstico del tiempo atmosférico de escala global es de aproximadamente 27 km, no es suficiente para el pronóstico en zonas específicas, en este caso el estado de Veracruz, ya que su variado

mosaico topográfico provoca una gran incertidumbre en el pronóstico de las condiciones atmosféricas a nivel local. En la Gráfica 7.1, se muestra el tamaño de la celda de malla de mayor resolución del modelo GFS, para una área que abarca al estado de Veracruz.

Con la finalidad de disminuir la incertidumbre utilizando mallas de resolución más fina, se recurrió a la implementación de modelos de escala regional o local. El modelo más usado actualmente es el WRF. La ventaja que tiene es la flexibilidad que proporciona al ser configurado, ya que se puede montar en un conjunto de computadoras conectadas en paralelo (clusters), o también puede ser configurado en una máquina de escritorio de un solo procesador, desde luego con grandes limitaciones en velocidad de procesamiento y en tamaño de la región a modelar.

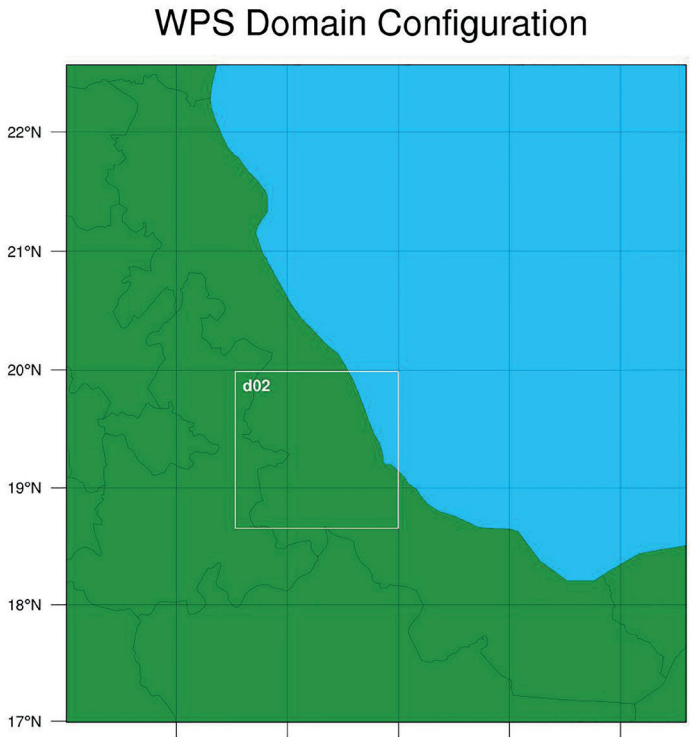


Gráfica 7.1. Celdas de malla GFS en Veracruz. Fuente: elaboración propia

7.6. Visión general del sistema de pronóstico operativo

El "sistema de pronóstico" implementado, además de la adaptación del modelo de pronóstico WRF, es la adaptación de varias herramientas en un entorno Linux, entre las que se encuentran, lenguajes de programación y de interacción con plataformas externas como canales de notificación y almacenamiento.

Para inicializar el modelo y establecer las condiciones regionales de frontera se usan como datos de entrada resultados de un pronóstico global obtenido del National Center for Environmental Prediction (NCEP). A solicitud de los meteorólogos operativos en el CEPM, el pronóstico numérico del WRF se ejecuta a 72 horas, dos veces al dia, con datos de entrada de 00z y 12z (z es el tiempo del meridiano de Greenwich). Actualmente la ejecución del modelo es con los parámetros atmosféricos que trae pre-establecidos el modelo y no se utiliza la opción de asimilación de datos previo a la simulación.

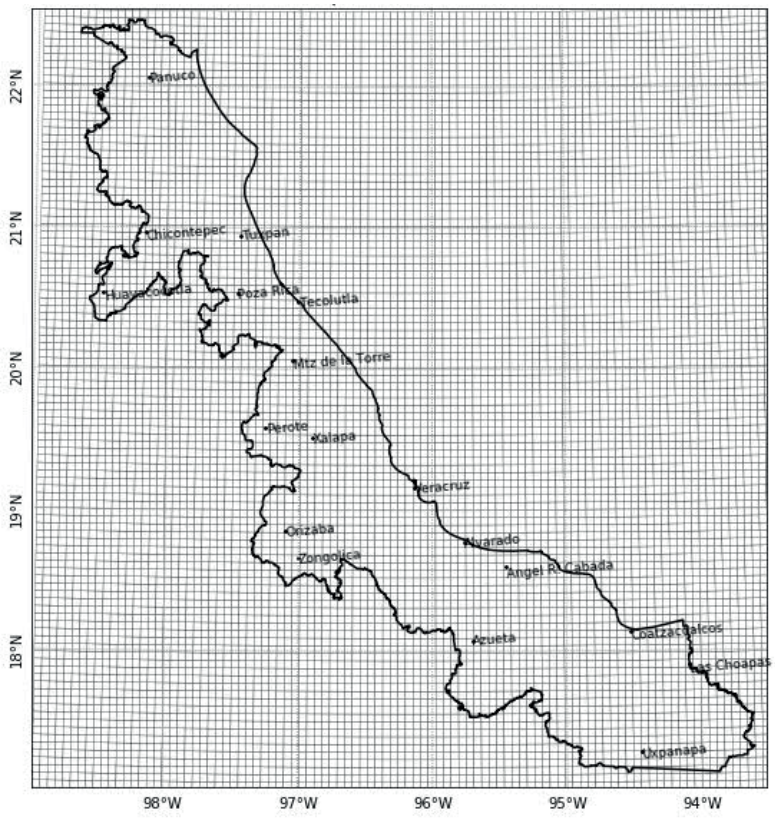


Gráfica 7.2. Dominios del WRF. Fuente: elaboración propia

7.7. Dominios del Modelo

EL modelo WRF fue implementado en un dominio como muestran las Gráfica 7.2 *y* Gráfica 7.3. El dominio fue configurado para representar las condiciones atmosféricas regionales del estado de Veracruz, asociadas a las estaciones del años, entre las que se encuentran los frentes fríos y nortes en temporada invernal y los ciclones tropicales en la temporada de lluvias y verano con espaciamiento de unos 4 km e intervalo de tiempo de una hora. En la Gráfica 7.2 adicionalmente se muestra un dominio anidado (d02) para la zona central de montaña, de un km y media hora de intervalo de tiempo que se deshabilitó por falta de poder de cómputo.

La Gráfica 7.3 muestra la resolución usada operativamente con malla de 4 km e intervalo de tiempo de 1 hora. Se puede comparar contra la malla más gruesa del modelo GFS en la Gráfica 7.1.



Gráfica 7.3. Celdas de malla WRF en Veracruz. Fuente: elaboración propia

7.8. Arquitectura del sistema

A partir de mediados de 2016, el sistema automatizado de pronóstico numérico del tiempo funciona para el estado de Veracruz en forma operativa y su configuración atiende a las necesidades de los previsores. El "sistema de pronóstico" se ha ido modificando para mejorar y optimizar los recursos de cómputo y tiempo de ejecución.

7.8.1. Primera Implementación

El modelo WRF se implementó en el 2014 en una computadora modesta (Cuadro 7.1).

Cuadro 7.1. Características de computo básico

Procesador	Intel Pentium 4 (3.20 GHz)
Memoria Ram	3GB
HDD de Sistema / Almacenamiento	250 GB
Sistema Operativo	Debian 7

Fuente: elaboración propia

Esta fue una fase de entrenamiento, sin fines operativos, ya que para ejecutar un pronóstico a 24 horas se requería aproximadamente 12 horas de tiempo de cómputo.

7.8.2. Segunda implementación

Para principios de 2016 ya se comenzaba a buscar la automatización de todo el proceso.

Con apoyo de personal del Centro Estatal de Telecomunicaciones del Estado de Veracruz, se nos habilitó una máquina virtual en los servidores de esta dependencia con mejores características (*Tabla 2*).

Cuadro 7.2. Características de cómputo remoto

Procesador	Intel Xeon (3.20GHz) (4 núcleos)
Memoria Ram	8GB
HDD de Sistema / Almacenamiento	250 GB
Sistema Operativo	Debian 8

Fuente: elaboración propia

La ventaja de esta implementación fue el aprendizaje adquirido para uso de equipos remotos a través de Secure Shell (SSH). La implementación del modelo WRF fue exitosa, sin embargo, la baja calidad en el servicio de conexión vía Internet fue la limitante para continuar con el proyecto.

7.8.3. Tercera implementación

A mediados de 2016, se adquirió una máquina originalmente diseñada para videojuegos (Cuadro 7.3)

Cuadro 7.3. Características de computo actual

Procesador	Intel Core i7 (3.40GHz) (8 núcleos)
Memoria Ram	32GB
SSD del Sistema	250 GB
HDD Almacenamiento	2 TB (x 2)
Tarjeta Gráfica Dedicada	NVIDIA GeForce GT 730
Sistema Operativo	Elementary OS

Fuente: elaboración propia

Estas características mejoraron sustancialmente la implementación del modelo WRF, además durante la implementación del modelo en esta máquina se generaron procesos de automatización en lenguajes de programación python y ncl, para procesos autónomos.

A continuación (Cuadro 7.4) se hace una descripción de cómo ha evolucionado el tiempo en ejecución del modelo, con distintas características al inicializarlo.

Cuadro 7.4. Tiempo de ejecución con distintas características

Pronóstico a	Dominios	Paralelo	Tiempo
48 hrs	2	No	~2 hrs
72 hrs	2	No	~3 hrs
72 hrs	1	No	~1 hrs
72 hrs	1	Si (8 núcleos)	~1/2 hrs

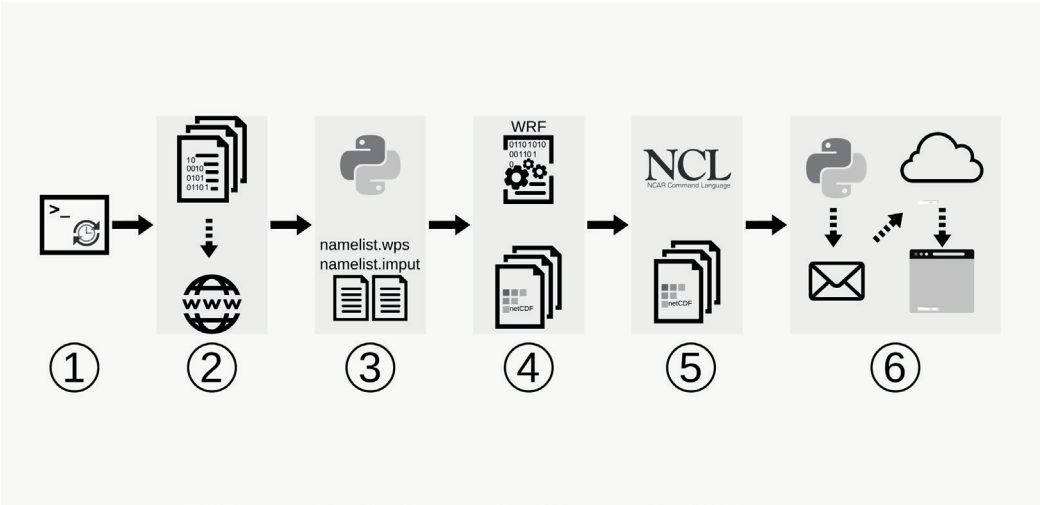
Fuente: elaboración propia

7.9. Implementación operativa

En los primeros meses de 2017, ya con códigos escritos para el *pre* y *post* proceso del modelo, se logró exitosamente implementar el modelo WRF de forma operativa totalmente autónoma, con limitantes como la falla tanto de energía eléctrica como de Internet, las cuales se padecen hasta la fecha. Por cuestiones de tiempo de cómputo, se decidió que para la ejecución operativa del sistema, sólo se usaría el dominio principal, ya que el dominio anidado por tener una mayor resolución espacial y temporal, demandaba un mayor tiempo en los resultados.

7.10. Ejecución de la implementación

A continuación se muestra de forma gráfica, cómo es el proceso global:



Gráfica 7.4. Esquema de ejecución automatizada del WRF. Fuente: elaboración propia

[1] El sistema inicia su ejecución a las 10:40 y 22:40 hora local, [2] la descarga de datos del modelo global es la primera tarea a ejecutarse, [3] usando código escrito en python se modifican los archivos *namelist.wps* y *namelist.input* para que coincidan con los datos descargados, [4] inicia la ejecución del modelo WRF, el modelo arroja de forma predeterminada los resultados en coordenadas sigma (siguiendo el terreno) en formato netCDF, [5] utilizando Ncar Command Language (NCL) se hace el cambio de

conversión de coordenadas sigma a niveles de presión, además de generar una mayor cantidad de variables, [6] finalmente utilizando python, una vez más, se grafican las variables de mayor relevancia para los meteorólogos operativos, se notifica vía email a determinados usuarios la conclusión del "sistema de pronóstico", al mismo tiempo que las imágenes son generadas de manera local y se almacenan en un servicio en la "nube" para finalmente visualizar en una página web.

7.11. Mantenimiento y soporte del sistema

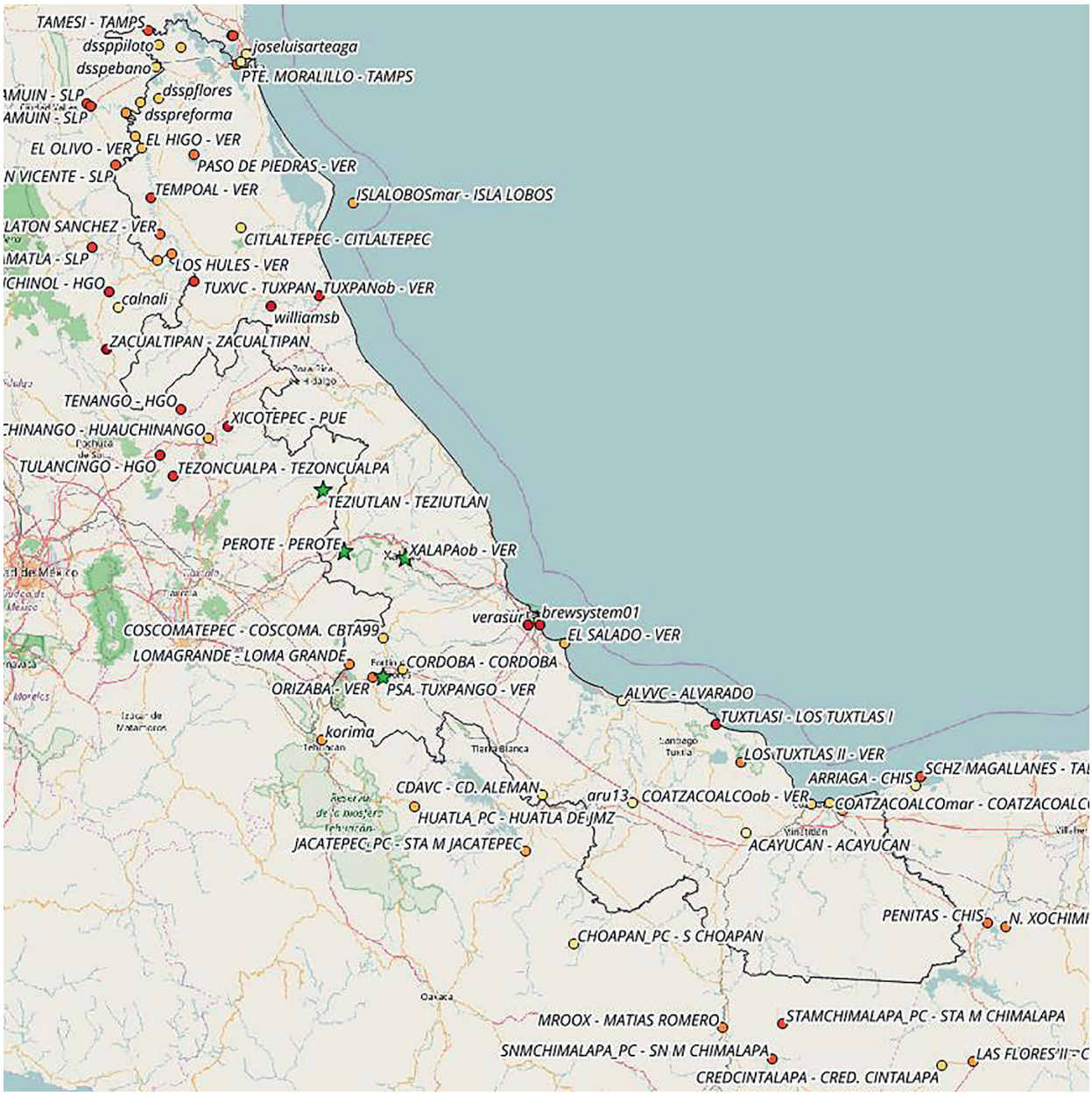
Para mantener funcionando apropiadamente al sistema, se van desechando los datos de entrada, del modelo GFS, pues se puede sobresaturar la capacidad de almacenamiento que se tiene (4 TB), no se puede almacenar toda la información de datos de entrada y salida.

Dos vece al mes, se actualiza el sistema operativo y otros componentes y se reinicia la máquina, en los periodos de tiempo en que no se ejecuta el modelo.

7.12. Resultados

Se comparan los mapas que emite la CONAGUA a través del Organismo de Cuenca Golfo Centro (OCGC) contra datos del pronóstico del WRF. Los datos de CONAGUA son datos de precipitación acumulada de 24 horas y registrados a las 08:00 am de cada día. Los datos de pronósticos a 72 horas del modelo WRF son similares. Para una mejor apreciación en la comparación de los mapas, se optó por utilizar la misma escala de colores con la que la OCGC muestra sus mapas.

También se muestran comparaciones de series de tiempo de los pronóstico del modelo WRF contra los registros de algunas Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) de la CONAGUA, mostradas en la figura 5 con una estrella. Para la comparación se ubicó la celda de malla del WRF más cercana a la EMA contra la que se iba a comparar. La obtención de los datos medidos se descargan desde la página web oficial de la dependencia de forma continua y automática y se almacenan de manera local.



Gráfica 7.5. Ubicación de estaciones meteorológicas en el estado de Veracruz y alrededores.
Fuente: elaboración propia

Estas comparaciones entre datos medidos y de pronóstico, se hacen para dos casos de eventos extremos de la temporada de Lluvias y Ciclones Tropicales 2017. Estos eventos afectaron directamente al estado de Veracruz.

7.13. Huracán Categoría 1 Franklin 2017

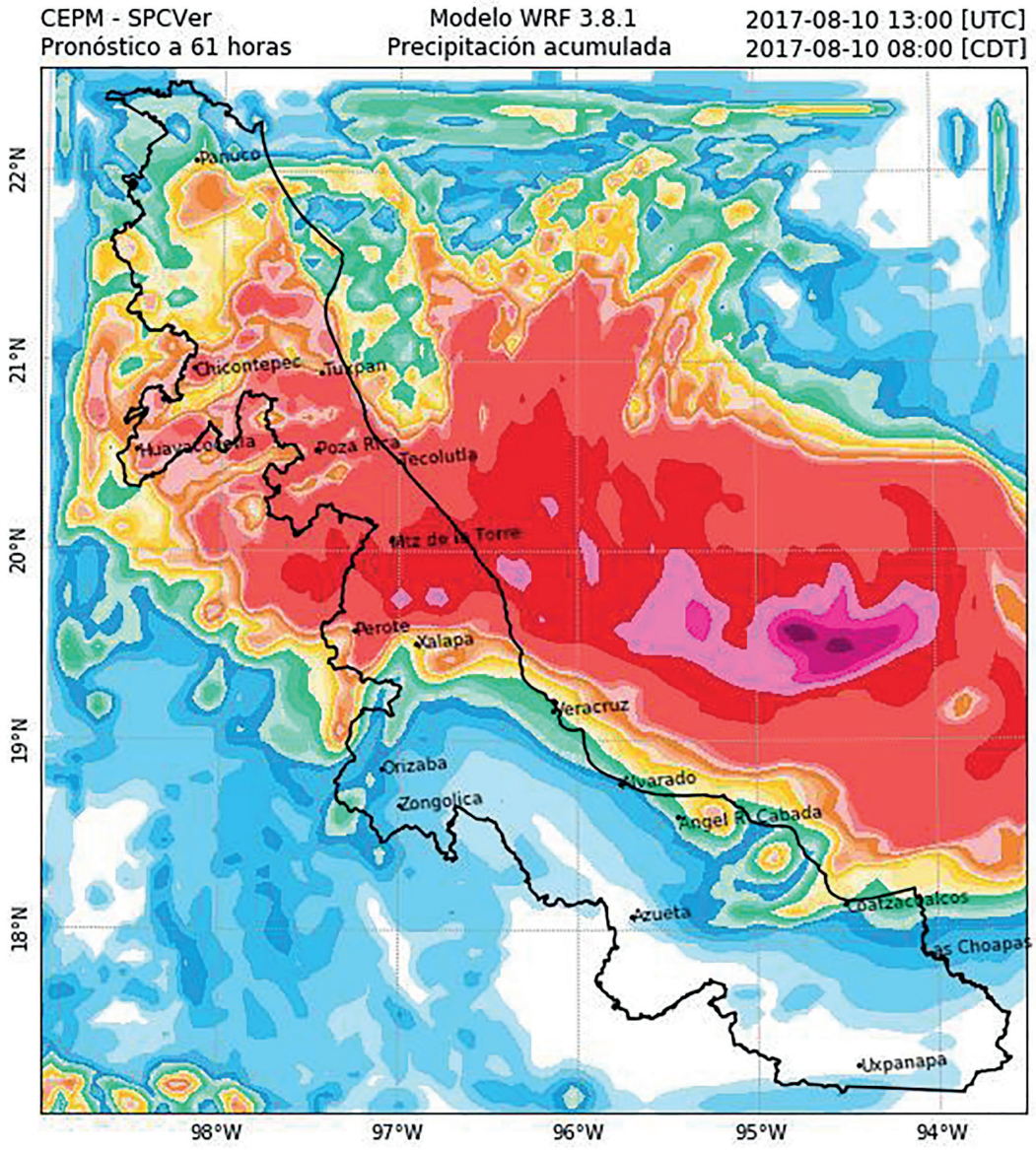
Desde el día 5 de agosto de 2017 se inició la vigilancia del disturbio tropical 90L en el Caribe Oriental, el cual evolucionó a la Tormenta Tropical "Franklin" sobre el Noroeste del mismo mar el domingo 6 de agosto, cuando su centro fue ubicado aproximadamente a 610 km al Este-Sureste de Coatzacoalcos con vientos máximos sostenidos de 65 km/h y rachas de 85 km/h, desplazándose hacia el Oeste-noroeste a razón de 20 km/h.

"Franklin" tuvo su primer impacto en territorio mexicano sobre el estado de Quintana Roo la noche del lunes 7 de agosto con vientos máximos sostenidos de 95 km/h. Cruzó por el centro de la Península de Yucatán la mañana del martes 8, emergiendo a la sonda de Campeche la tarde del mismo martes.

Sobre aguas del Golfo de México se intensificó a la categoría de Huracán Uno la tarde del miércoles 9 de agosto, cuando su centro fue ubicado aproximadamente a 170 km al Noreste del puerto de Coatzacoalcos y a 280 km al Este-sureste de Tuxpan, presentando vientos máximos de 120 km/h y rachas de 150 km/h, y con rumbo hacia un punto entre Tecolutla y Nautla.

Finalmente el ojo de "Franklin" tuvo su segundo impacto en suelo mexicano alrededor de las 0:30 horas del día jueves 10 de agosto en las costa del municipio de Vega de Alatorre (en las inmediaciones de la localidad de Lechuguillas) con viento máximos sostenidos de 140 km/h y rachas de 155 km/h, saliendo de la entidad veracruzana alrededor de las cuatro de la mañana. (Texto obtenido de reporte interno del CEPM).

La Gráfica 7.6 muestra el pronóstico de precipitaciones del WRF a 48 horas para comparar la similitud con los datos medidos por CONAGUA en la Gráfica 7.7. De la Gráfica 7.8 a la Gráfica 7.11 se muestran la similitud de las series de tiempo pronosticadas por el WRF comparadas contra datos medidos por CONAGUA.

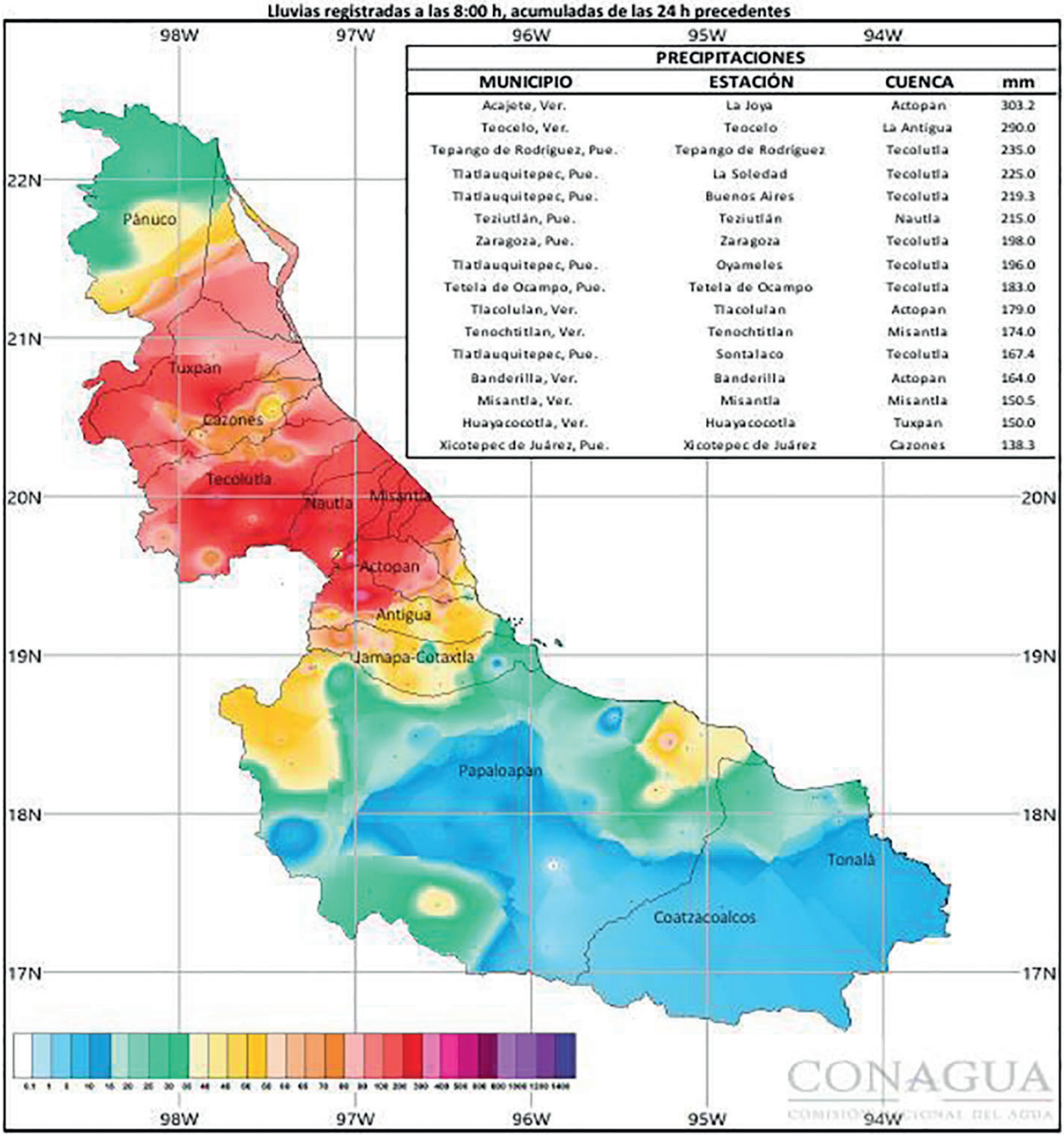


Gráfica 7.6. Pronóstico de precipitación acumulada 48 horas antes del 10/08/17.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
ORGANISMO DE CUENCA GOLFO CENTRO
DIRECCIÓN TÉCNICA
JEFATURA DE PROYECTO DE HIDROMETEOROLOGÍA
jueves, 10 de agosto de 2017

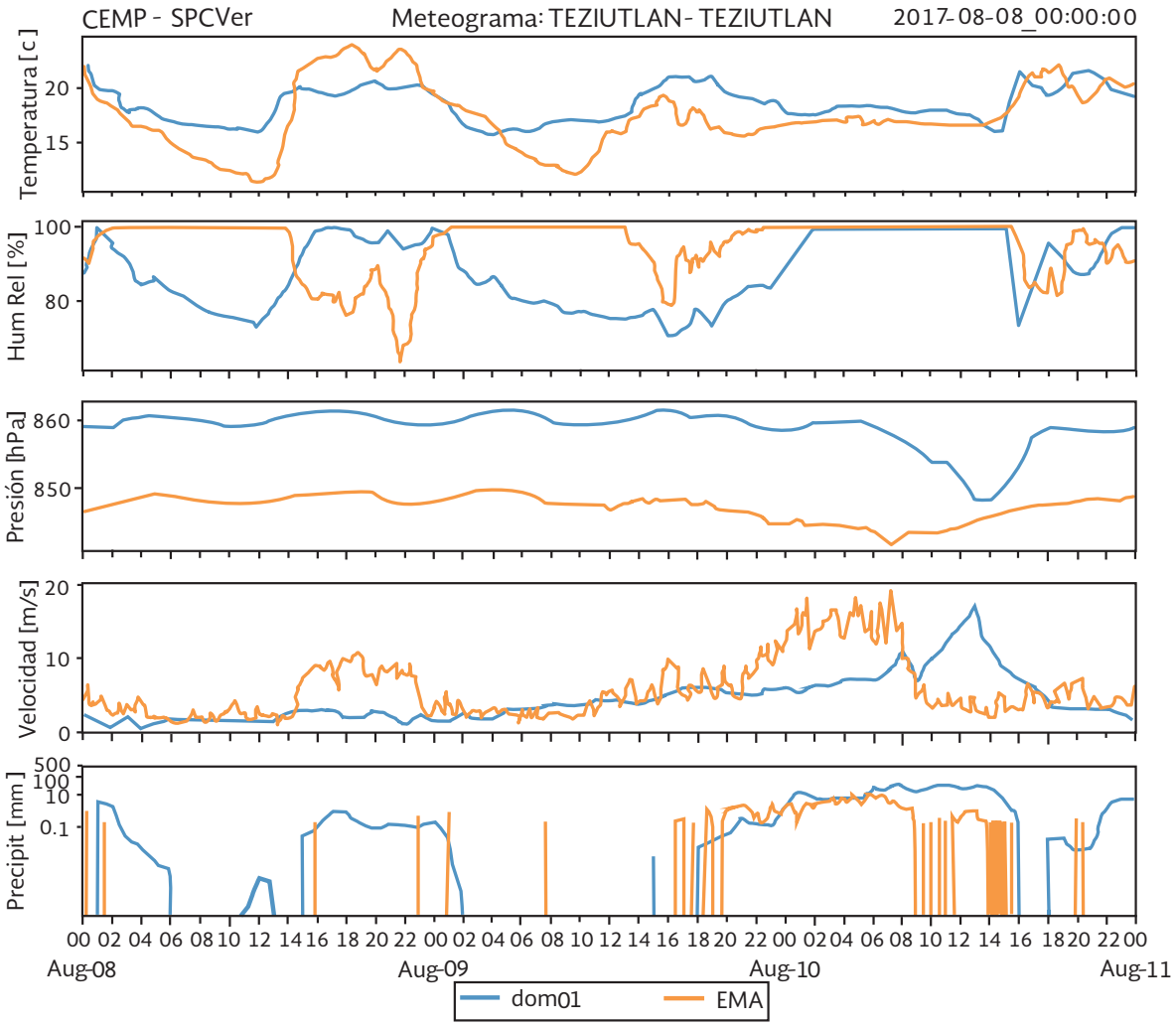
Lluvias registradas a las 8:00 h, acumuladas de las 24 h precedentes



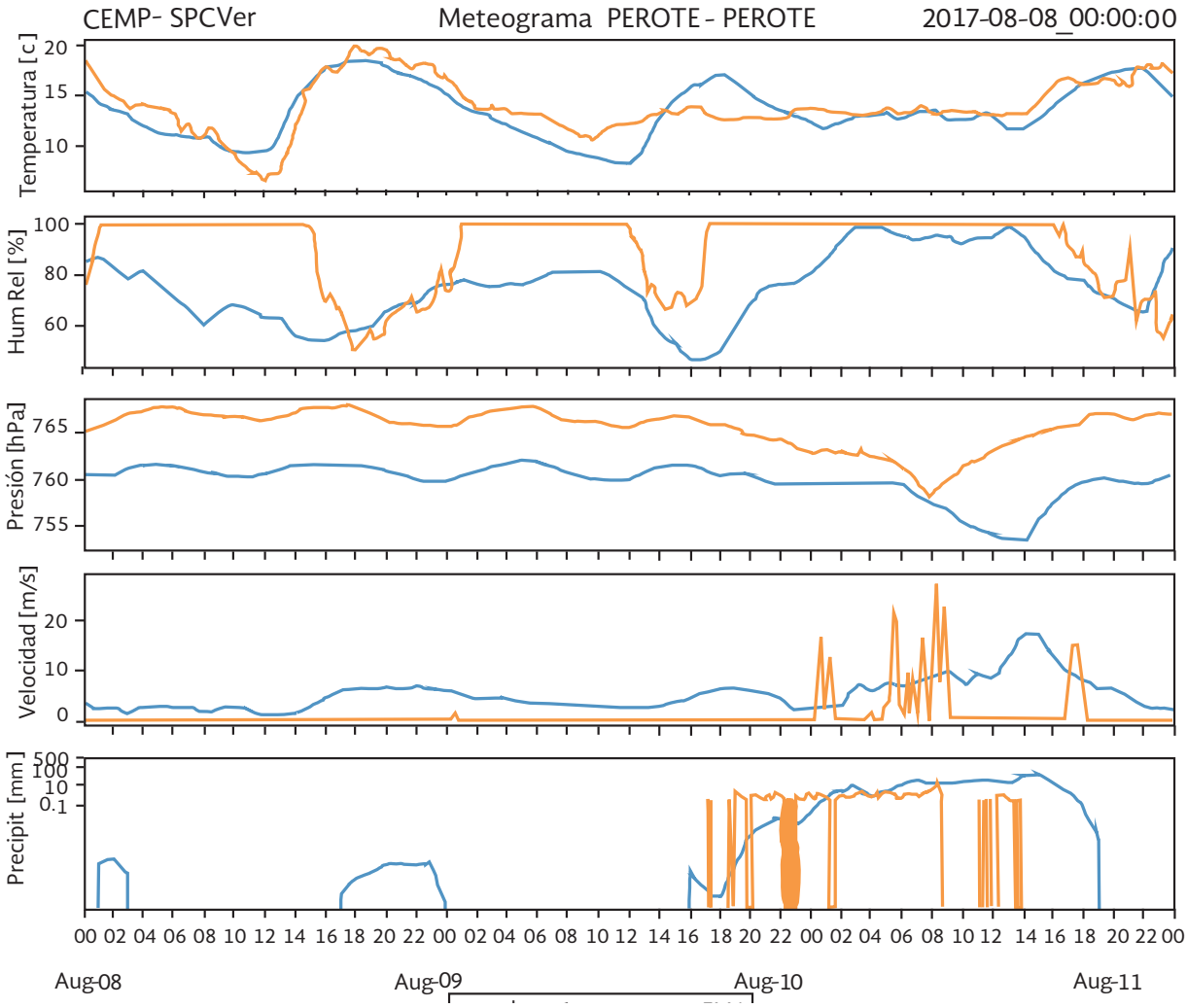
PRECIPITACIONES

MUNICIPIO	ESTACIÓN	CUENCA	mm
Acajete, Ver.	La Joya	Actopan	303.2
Teocelo, Ver.	Teocelo	La Antigua	290.0
Tepango de Rodríguez, Pue.	Tepango de Rodríguez	Tecolutla	235.0
Tlatlauquitepec, Pue.	La Soledad	Tecolutla	225.0
Tlatlauquitepec, Pue.	Buenos Aires	Tecolutla	219.3
Teziutlán, Pue.	Teziutlán	Nautla	215.0
Zaragoza, Pue.	Zaragoza	Tecolutla	198.0
Tlatlauquitepec, Pue.	Oyameles	Tecolutla	196.0
Tetela de Ocampo, Pue.	Tetela de Ocampo	Tecolutla	183.0
Tlacolulan, Ver.	Tlacolulan	Actopan	179.0
Tenochtitlan, Ver.	Tenochtitlan	Misantla	174.0
Tlatlauquitepec, Pue.	Sontalaco	Tecolutla	167.4
Banderilla, Ver.	Banderilla	Actopan	164.0
Misantla, Ver.	Misantla	Misantla	150.5
Huayacocotla, Ver.	Huayacocotla	Tuxpan	150.0
Xicotepec de Juárez, Pue.	Xicotepec de Juárez	Cazones	138.3

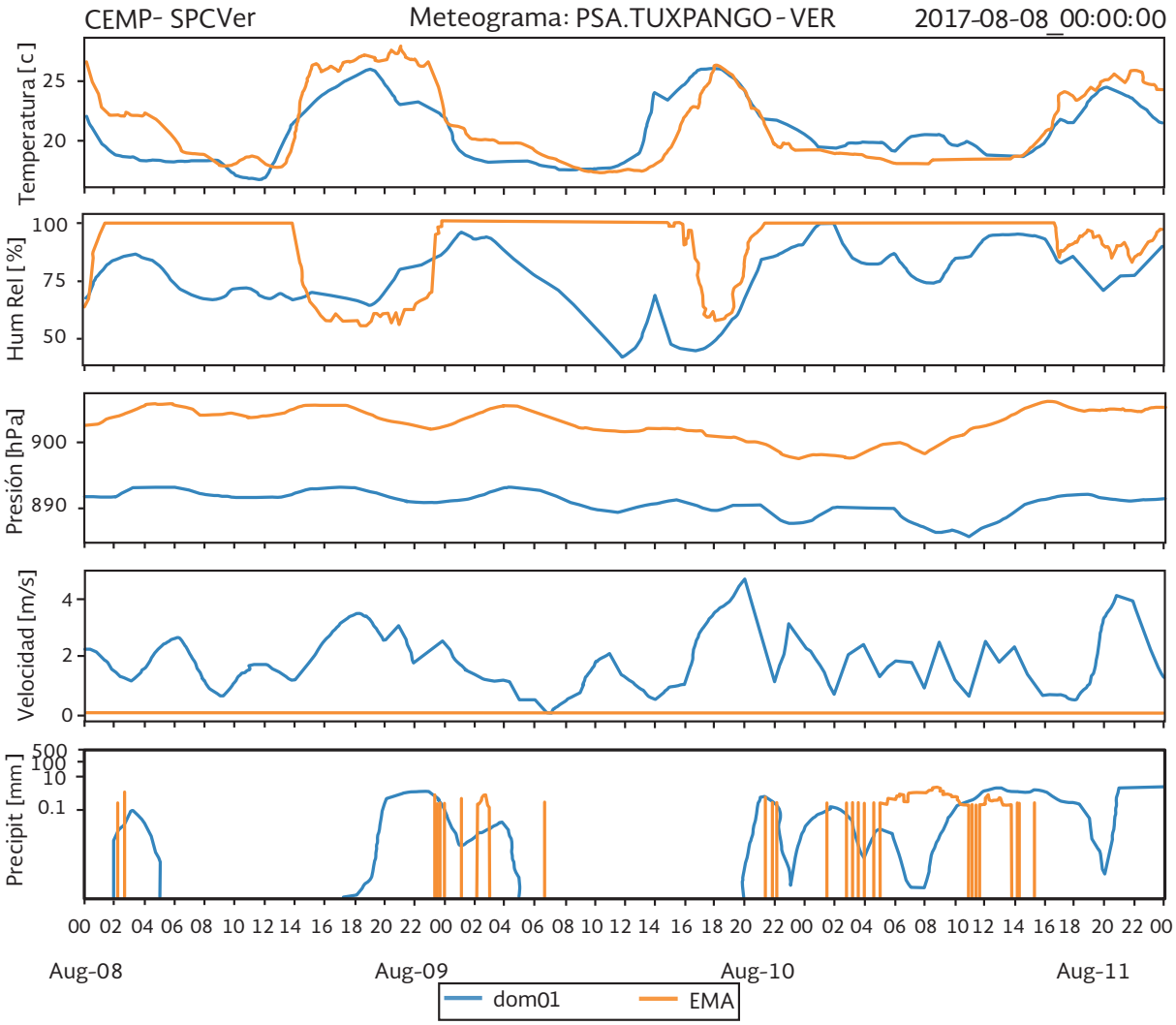
Gráfica 7.7. Precipitación acumulada con datos de la CONAGUA del 10/08/17.
Fuente: Organismo Cuenca Golfo Centro (CONAGUA, 2017)



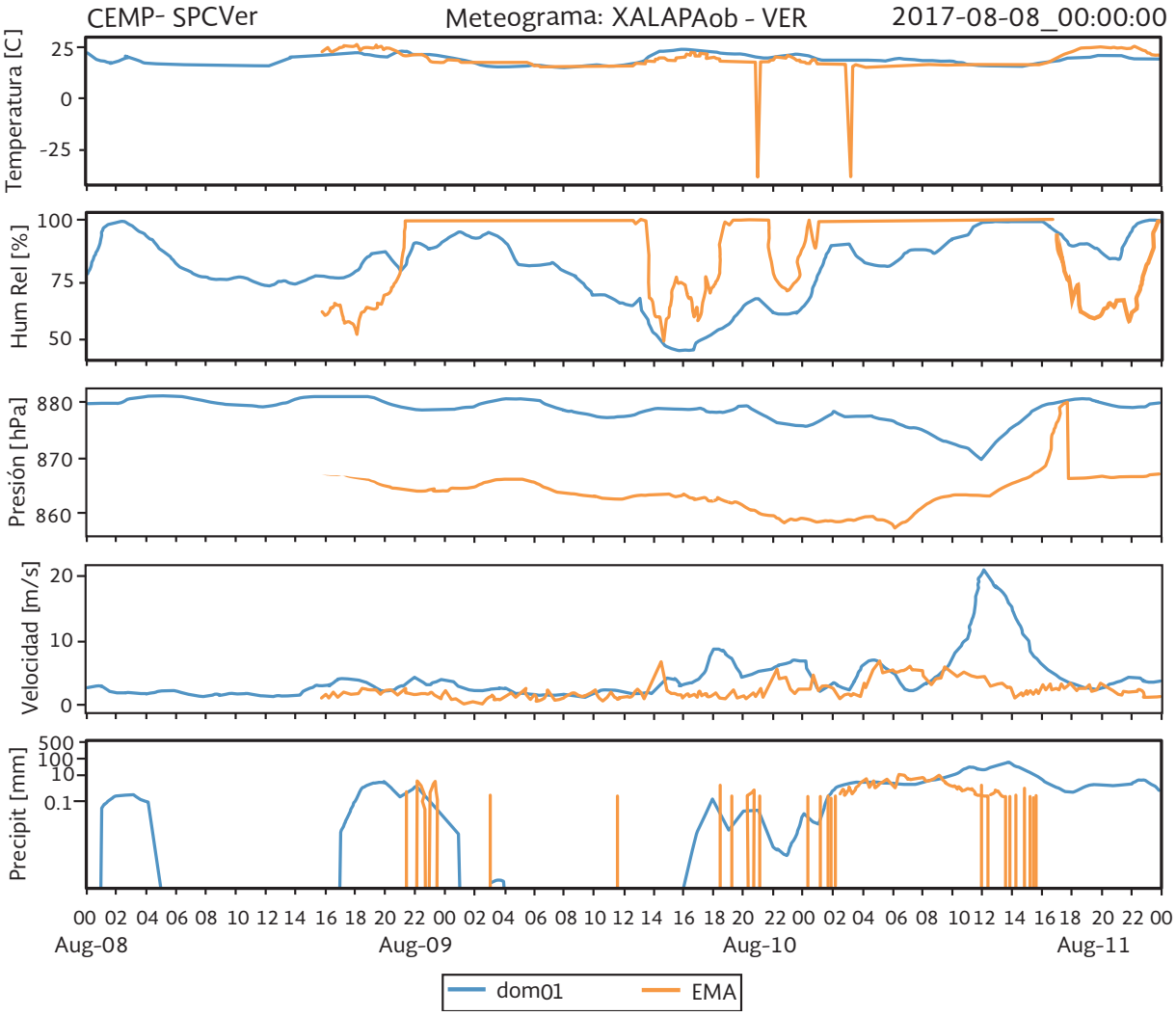
Gráfica 7.8. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Teziutlan datos medidos.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17



Gráfica 7.9. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Perote.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17



Gráfica 7.10. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Tuxpango.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17



Gráfica 7.11. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Xalapa.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17

7.14. Huracán Categoría 1 Katia 2017

El día lunes 4 de septiembre se observó la presencia de un disturbio tropical centrado al norte de Tabasco y que presentaba una probabilidad del 20% y 40% de evolucionar a ciclón tropical en dos y cinco días respectivamente. Por lo cual el Centro de Estudios y Pronósticos Meteorológicos activó la Alerta Gris por "Disturbio Tropical" para la zona norte y centro del estado.

Para el martes 5 a las 8 h el disturbio tropical fue nombrado como 95L, presentaba una probabilidad del 60% para evolucionar a ciclón tropical a 48 horas, e impactar como depresión tropical en el norte o centro del estado. Para la tarde del mismo día había evolucionado a la Depresión Tropical TRECE, su centro fue ubicado a las 16:00 horas del mismo martes aproximadamente a 125 km al Este de Tampico, Tamaulipas, presentando vientos máximos sostenidos de 55 km/h y un movimiento al Este a razón de 4 km/h. por lo que se activó Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales en fase de acercamiento, siendo Alerta Amarilla para el Centro de Veracruz y Verde para el Norte y Sur de Veracruz.

La Depresión tropical TRECE se intensificó la madrugada del miércoles 6 a la Tormenta Tropical "Katia", cuando su centro fue localizado a las 4:00 horas aproximadamente a 160 km al Noreste de Tuxpan con movimiento al Este-sureste a razón de 4 km/h con vientos máximos sostenidos de 65 km/h. El Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales mantuvo la alerta Amarilla para el Norte-Centro de Veracruz y Verde para el Sur de Veracruz en su fase de acercamiento.

"Katia" se convirtió en huracán categoría 1 la tarde del miércoles 6 de septiembre cuando su centro fue localizado (16:00 horas) aproximadamente a 300 km al Nor-noreste del puerto de Veracruz moviéndose al Sureste a razón de 6 km/h con vientos máximos sostenidos de 120 km/h. continuando las Alertas Amarilla para el Norte-Centro de Veracruz y Verde para el Sur en su fase de acercamiento.

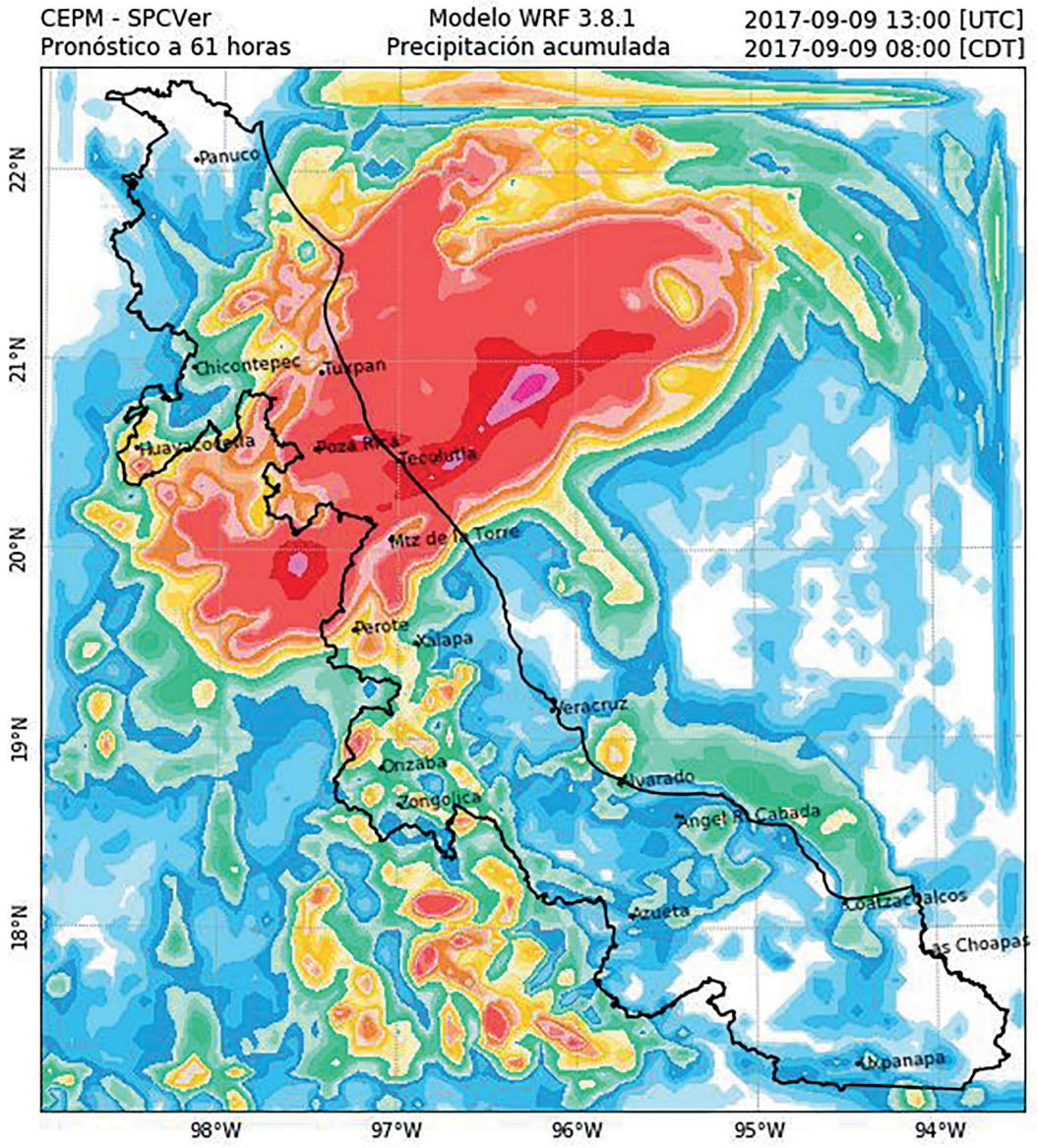
Durante el jueves 7 de septiembre "Katia" se mantuvo estacionario por 15 horas aproximadamente a 315 km al NNE del puerto de Veracruz con vientos máximos soste-

nidos de 130 km/h. La tarde del mismo jueves (16:00 h) el Alertamiento se elevó, cambió a Naranja para el Norte-Centro y Amarillo para el Sur de Veracruz.

A las 10:00 horas del viernes 8 de septiembre "Katia" adquiere la categoría DOS con centro aproximadamente a 140 km al Este-Noreste de Tecolutla con vientos máximos sostenidos de 155 km/h y rachas de 195 km/h, elevándose el alertamiento a Roja para el Norte-Centro y manteniéndose Amarilla para el Sur.

Finalmente a las 21:30 horas del mismo viernes Katia con categoría UNO tocó tierra en las inmediaciones de Rancho Nuevo, municipio de Papantla –aproximadamente a 20 kilómetros al noroeste de Tecolutla, Veracruz- con vientos máximos sostenidos de 120 km/h y rachas de 150 km/h. Durante la noche del viernes y madrugada del sábado 9 de septiembre "Katia" se debilitó conforme se movía entre los límites de las cuencas de los ríos Cazones y Tecolutla, ingresando por la mañana del mismo sábado a la sierra norte del estado de Puebla donde se disipó. (Texto obtenido de reporte interno del CEPM).

La Gráfica 7.12 muestra el pronóstico de precipitaciones del WRF a 48 horas para comparar la similitud con los datos medidos por CONAGUA en la Gráfica 7.13. De la Gráfica 7.14 a la Gráfica 7.17 se muestran las similitudes de las series de tiempo pronosticadas por el WRF comparadas contra datos medidos por CONAGUA en cuatro estaciones de CONAGUA.

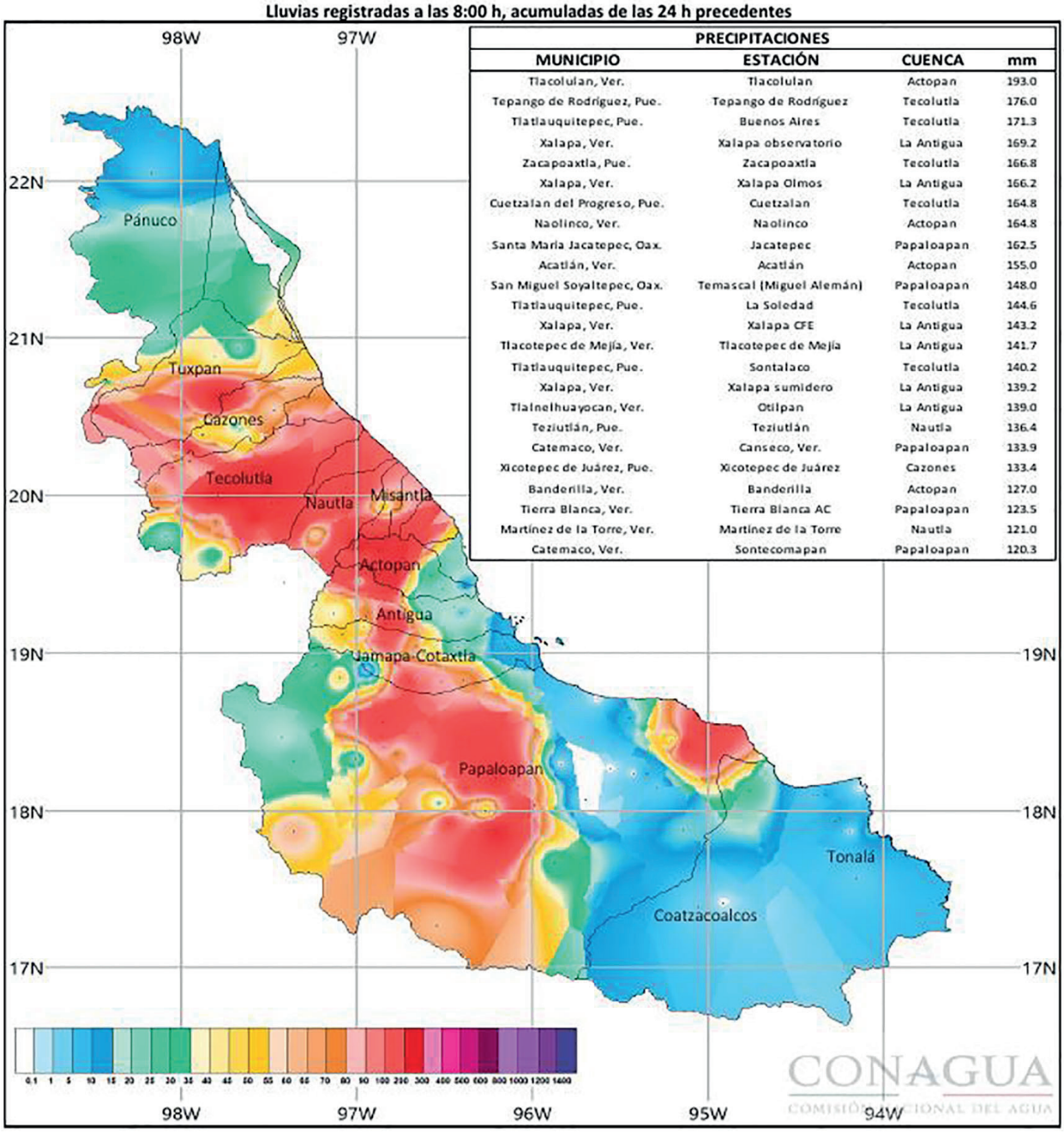


Gráfica 7.12. Pronóstico de precipitación acumulada 48 horas antes del 09/09/17.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 07/09/17

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
ORGANISMO DE CUENCA GOLFO CENTRO
DIRECCIÓN TÉCNICA
JEFATURA DE PROYECTO DE HIDROMETEOROLOGÍA
sábado, 09 de septiembre de 2017

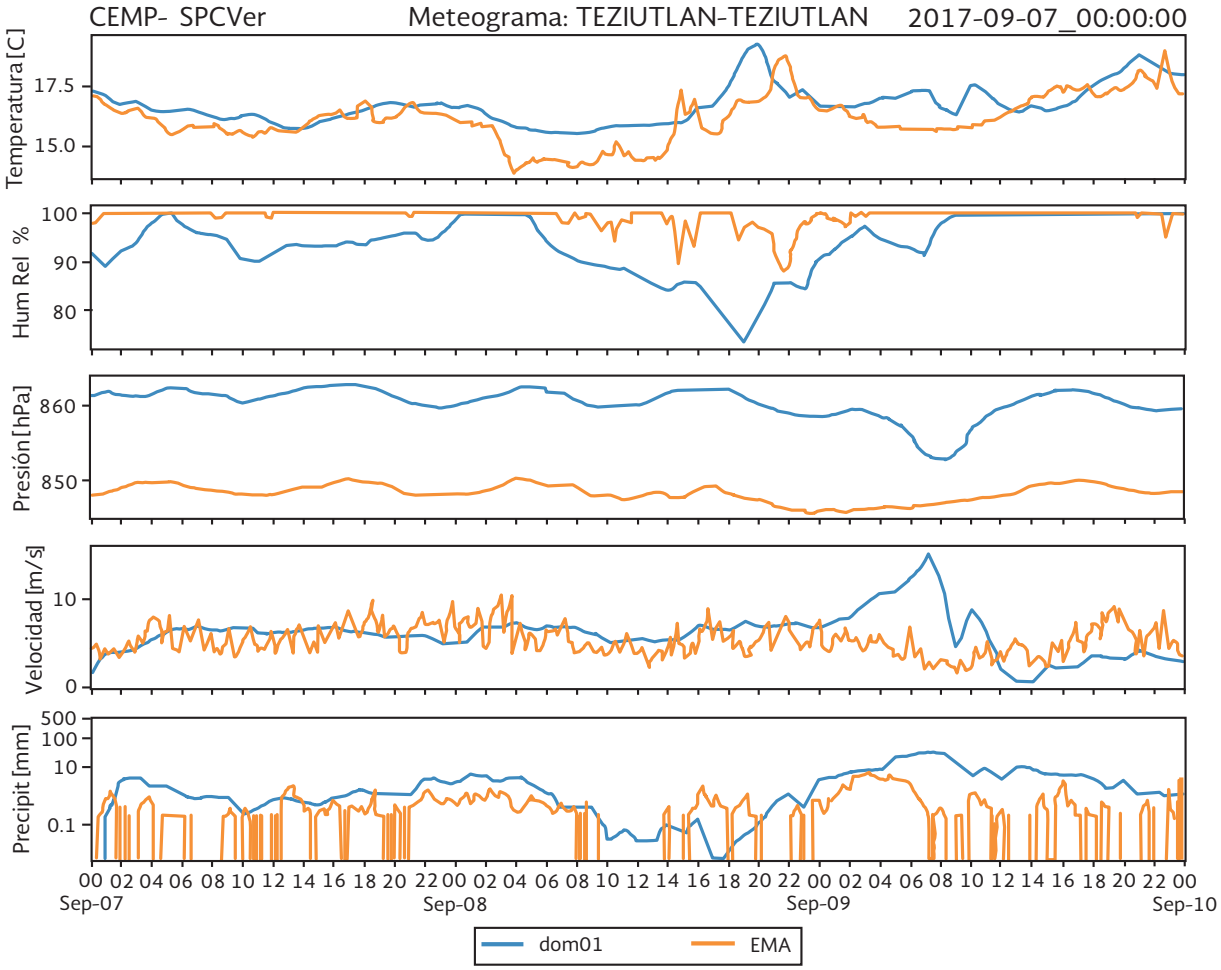
Lluvias registradas a las 8:00 h, acumuladas de las 24 h precedentes



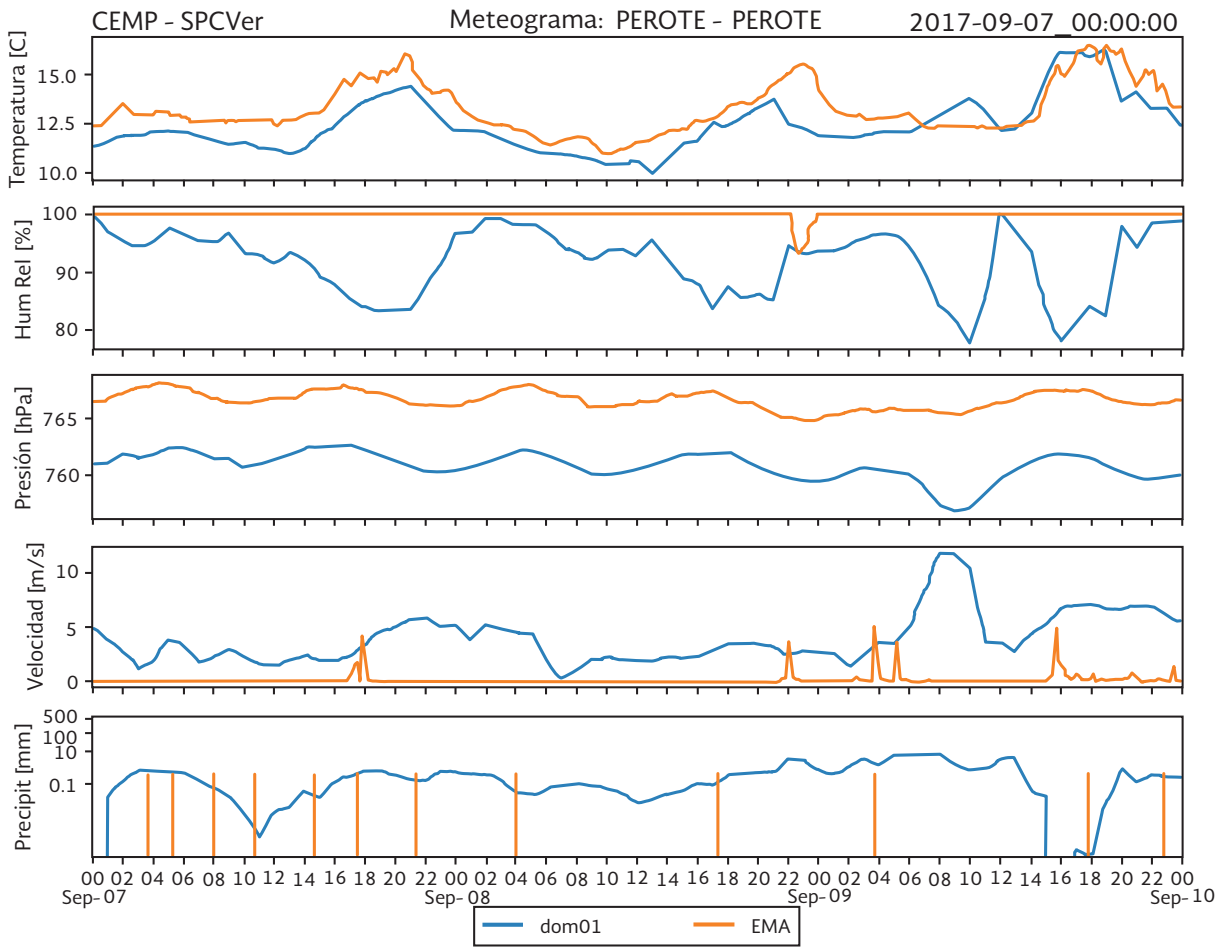
PRECIPITACIONES

MUNICIPIO	ESTACIÓN	CUENCA	mm
Tlacolulan, Ver.	Tlacolulan	Actopan	193.0
Tepango de Rodríguez, Pue.	Tepango de Rodríguez	Tecolutla	176.0
Tlatlauquitepec, Pue.	Buenos Aires	Tecolutla	171.3
Xalapa, Ver.	Xalapa observatorio	La Antigua	169.2
Zacapoaxtla, Pue.	Zacapoaxtla	Tecolutla	166.8
Xalapa, Ver.	Xalapa Olmos	La Antigua	166.2
Cuetzalan del Progreso, Pue.	Cuetzalan	Tecolutla	164.8
Naolinco, Ver.	Naolinco	Actopan	164.8
Santa María Jacatepec, Oax.	Jacatepec	Papaloapan	162.5
Acatlán, Ver.	Acatlán	Actopan	155.0
San Miguel Soyaltepec, Oax.	Temascal (Miguel Alemán)	Papaloapan	148.0
Tlatlauquitepec, Pue.	La Soledad	Tecolutla	144.6
Xalapa, Ver.	Xalapa CFE	La Antigua	143.2
Tlacotepec de Mejía, Ver.	Tlacotepec de Mejía	La Antigua	141.7
Tlatlauquitepec, Pue.	Sontalaco	Tecolutla	140.2
Xalapa, Ver.	Xalapa sumidero	La Antigua	139.2
Tlalnelhuayocan, Ver.	Otilpan	La Antigua	139.0
Teziutlán, Pue.	Teziutlán	Nautla	136.4
Catemaco, Ver.	Canseco, Ver.	Papaloapan	133.9
Xicotepec de Juárez, Pue.	Xicotepec de Juárez	Cazones	133.4
Banderilla, Ver.	Banderilla	Actopan	127.0
Tierra Blanca, Ver.	Tierra Blanca AC	Papaloapan	123.5
Martínez de la Torre, Ver.	Martínez de la Torre	Nautla	121.0
Catemaco, Ver.	Sontecomapan	Papaloapan	120.3

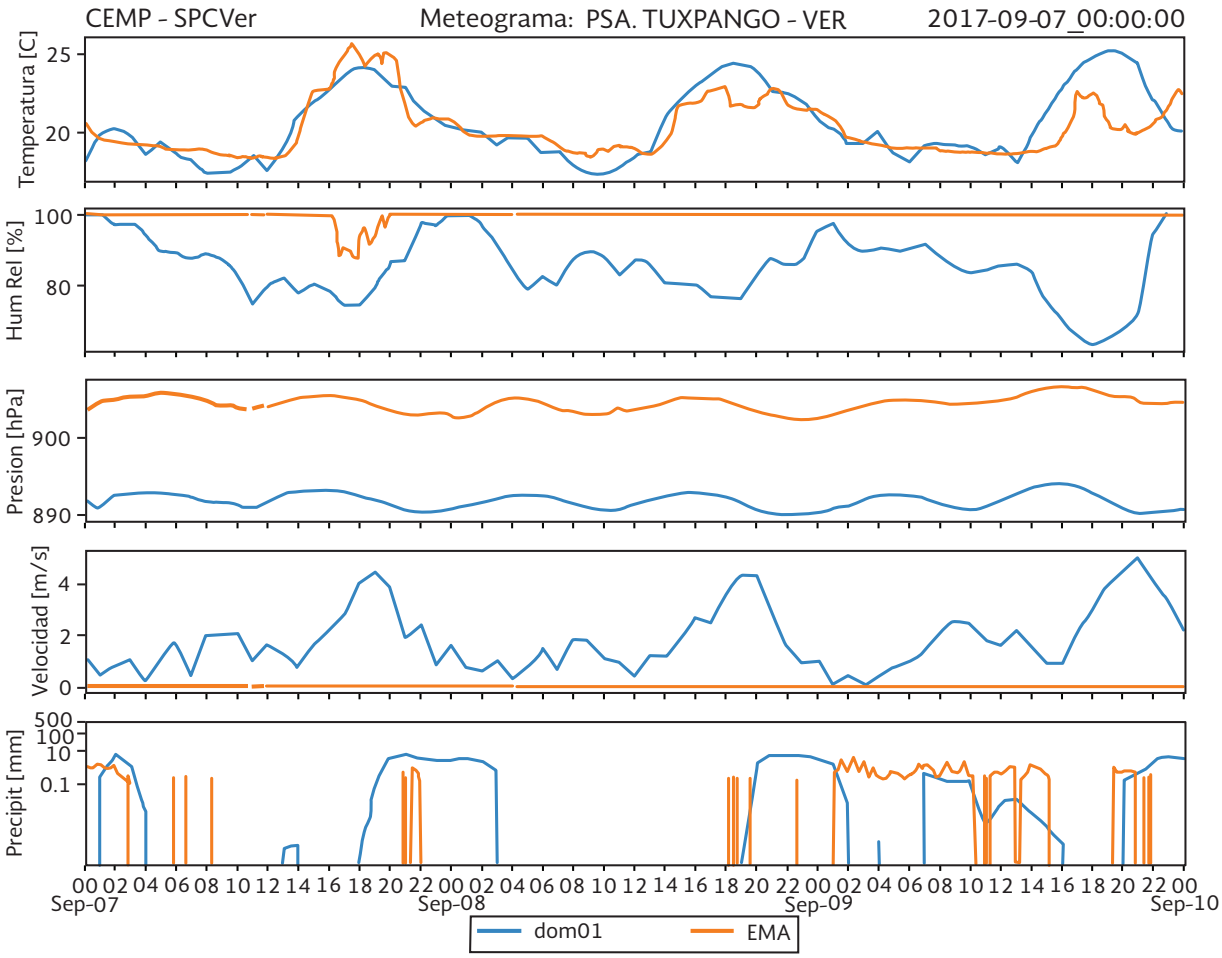
Gráfica 7.13. Precipitación acumulada con datos de la CONAGUA del 09/09/17.
Fuente: Organismo Cuenca Golfo Centro (CONAGUA, 2017)



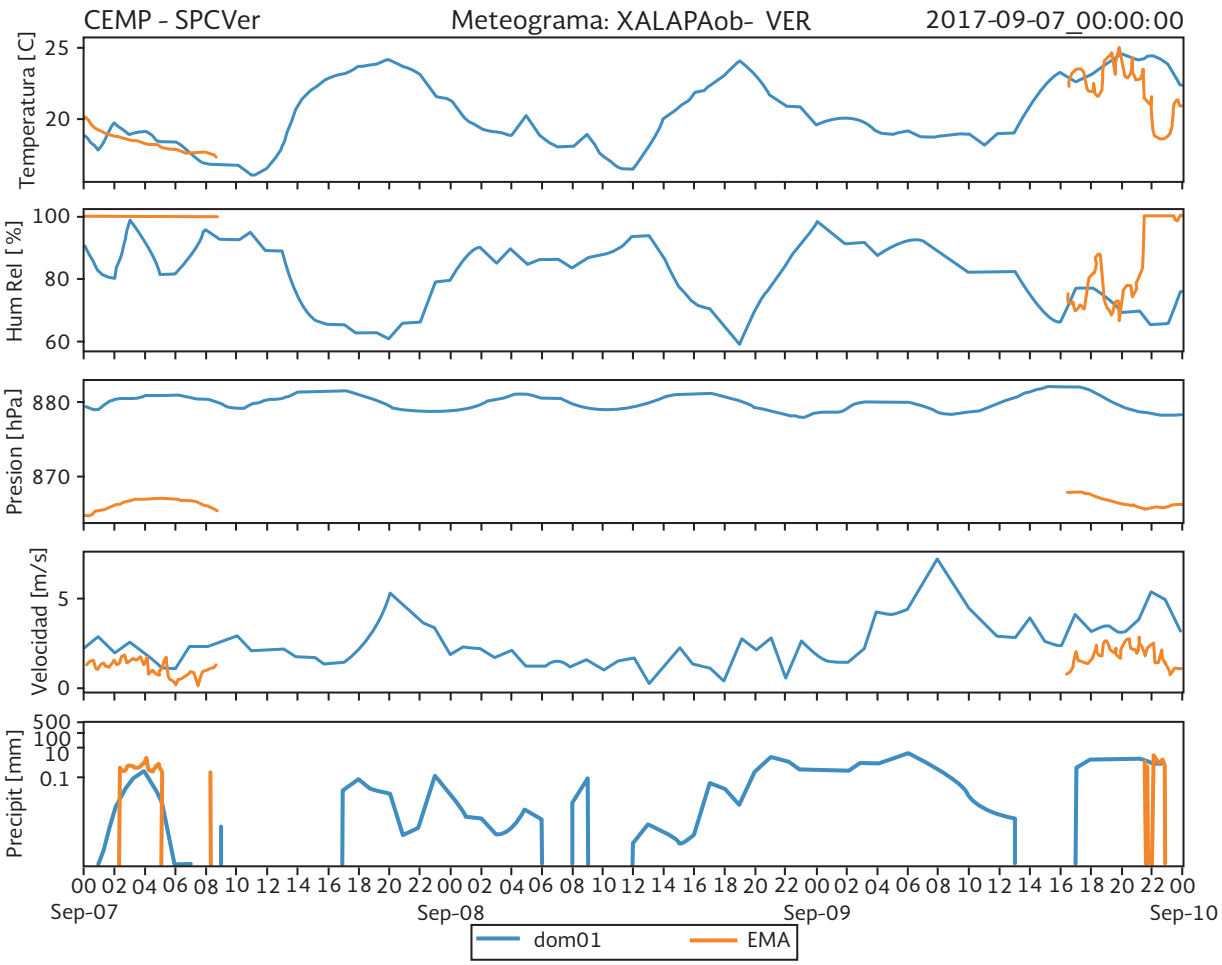
Gráfica 7.14. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Teziutlán.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 07/09/17



Gráfica 7.15. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Perote.



Gráfica 7.16. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Tuxpango.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 07/09/17



Gráfica 7.17. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Xalapa.
Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 07/09/17

7.15. Desarrollo actual y trabajo por hacer

El sistema de pronóstico implementado en CEPM, se ejecuta acorde a las necesidades de los meteorólogos operativos. Se seguirá trabajando en la mejora de este sistema.

7.16. Separación del preproceso

Debido a que la descarga de dos datos de entrada es donde mayor tiempo demora el "sistema de pronóstico" se considera usar otras computadoras, aunque cuenten con poco recursos, existentes en el CEPM para la descarga de datos y alojarlos en la computadora que ejecutará el modelo WRF.

7.17. Aumento en tiempo de pronóstico

Actualmente el sistema se ejecuta a 72 horas, para este periodo de tiempo los meteorólogos operativos han verificado que el pronóstico numérico, según su experiencia, es muy bueno. Por tal motivo han sugerido un incremento en el pronóstico a 96 horas y probar luego con 120 horas de pronóstico numérico del WRF.

7.18. Cómputo en la nube

Teniendo ya la experiencia en el manejo e implementación del modelo WRF de forma remota a través de SSH, una posibilidad para la implementación del modelo es usando los servicios de cómputo en la nube que brindan algunas empresas. Actualmente se trabaja con permisos de prueba que algunas empresas proporcionan a nuevos usuarios.

7.19. Conclusiones

El sistema de pronóstico implementado en CEPM, basado en el modelo WRF, pronostica en forma exitosa las condiciones atmosféricas a 72 horas de acuerdo a las comparaciones con EMA's y mapas elaborados por el OCGC.

Además de las comparaciones contra datos medidos, la opinión de los meteorólogos operativos favorecen la utilidad de la implementación del WRF que proporciona mayor detalle en espacio y tiempo y mayor certeza en los pronósticos comparado con los pronósticos numéricos de escala global o hemisférica.

7.20. Referencias

Banco Mundial (2017), última consulta el 20 de Septiembre del 2017, disponible en: http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2017/03/23/forecasting-for-catastrophes-how-investment-in-weather-services-can-save-lives-and-grow-economies

CONAGUA (2017). Comisión Nacional del Agua, Jefatura de Proyectos de Hidrometeorología

Mölders, N. and Kramm, G.: Lectures in Meteorology, Springer, 1–591, 2014.

NOAA and NWS (2017), última consulta el 21 de Septiembre del 2017, disponible en: http://www.weather.gov/media/ajk/brochures/NumericalWeatherPrediction.pdf

NOAA (2017), última consulta el 21 de Septiembre del 2017, disponible en: https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets

NCAR (2017), última consulta el 21 de Septiembre del 2017, disponible en: https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model

ANEXO 1

Descripción de dos modelos numéricos utilizados en el CEPM

7.21. Global Forecast System (GFS)

El modelo GFS es un modelo de pronóstico numérico acoplado, compuesto de cuatro modelos independientes que trabajan juntos para proporcionar una imagen precisa de las condiciones meteorológicas. GFS cubre todo el mundo hasta una resolución horizontal de 28 km (NOAA). Se puede obtener en: http://nomads.ncep.noaa.gov/

North American Mesoscale Forecast System (NAM)

NAM es un modelo regional de pronóstico del tiempo que cubre América del Norte hasta una resolución horizontal de 12 km. Docenas de parámetros meteorológicos están disponibles en las redes NAM, desde temperatura y precipitación hasta relámpagos y energía cinética turbulenta (NOAA). Se puede obtener en: http://nomads.ncep.noaa.gov/

7.22. Rapid Refresh (RAP)

RAP es un modelo regional de pronóstico del tiempo de América del Norte, con subredes separadas (con diferentes resoluciones horizontales) dentro del dominio general de Norteamérica. RAP produce pronósticos cada hora con una duración prevista de 18 horas. RAP reemplazó el modelo de ciclo de actualización rápida (RUC) el 1 de mayo de 2012 (NOAA). Se puede obtener en: http://nomads.ncep.noaa.gov/

7.23. Weather Research and Forecasting (WRF)

El modelo WRF es un modelo de predicción numérica de mesoescala de próxima generación, diseñado tanto para la investigación atmosférica como para las aplicaciones de pronóstico operacional. Cuenta con dos núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos, y una arquitectura de software que soporta la computación paralela y la extensibilidad del sistema. El modelo sirve a una amplia gama de aplicaciones meteorológicas a través de escalas de decenas de metros a miles de kilómetros. El esfuerzo para desarrollar el WRF comenzó en la última parte de la década de 1990 y fue una colaboración del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (representada por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP)), la Agencia de Tiempo de la Fuerza Aérea (AFWA), el Laboratorio Naval de Investigación, la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA).

Para los investigadores, el WRF puede producir simulaciones basadas en condiciones atmosféricas reales (es decir, a partir de observaciones y análisis) o condiciones idealizadas. WRF ofrece un pronóstico operativo de una plataforma flexible y eficiente, mientras que refleja los avances recientes en la física, los números y la asimilación de datos aportados por los desarrolladores de la comunidad de investigación expansiva. WRF está actualmente en uso operacional en NCEP y otros centros meteorológicos nacionales de EUA, así como en configuraciones de predicción en tiempo real en laboratorios, universidades y empresas privadas. (NCAR). Se puede obtener en: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/

VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL EN PUERTO VALLARTA, JAL., MÉXICO

8

Variabilidad de la temperatura superficial en Puerto Vallarta, Jal., México

Surface temperature variability in Puerto Vallarta, Jal., Mexico

Fátima Maciel Carrillo-González[1]*; Antonio Velázquez-Ruiz[2]*; Julio Cesar Morales-Hernández[3]*; Virginia Martínez Hernández[4]* y Héctor Javier Rendón Contreras[5]*

8.1. Resumen:

El monitoreo del clima es importante en cualquier región por su relación con los temas de salud, seguridad y planeación socioeconómica. Identificar su comportamiento y variabilidad adecuadamente permite incorporar la información en pronósticos meteorológicos y sus impactos en diversos procesos. En este capítulo, se presenta un análisis de la variabilidad de la temperatura superficial en la ciudad de Puerto Vallarta, en la región Costa centro del Pacífico Mexicano, durante el periodo de 1926 al 2016. Utilizando datos de tres estaciones climáticas convencionales del Servicio Meteorológico Nacional (1926-2004) y dos estaciones meteorológicas automáticas de la Universidad de Guadalajara (2008-2016). Se realizó estadística descriptiva y la correlación con señal global del índice de El Niño-Oscilación del Sur. El análisis de la temperatura muestra que la temperatura máxima está decreciendo, sin embargo, la mínima se ha incrementado, disminuyendo así la amplitud térmica anual. El mayor valor de coeficiente de correlación

1 fatima.carrillo@academicos.udg.mx
2 antonio.vruiz@academicos.udg.mx
3 cesarbemarena@gmail.com
4 vickymarpv5@yahoo.com.mx
5 hrendon@cuc.udg.mx
* CEMCO Centro de Estudios Meteorológicos de la Costa. Departamento de Ciencias Exactas, Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

del evento El Niño – Oscilación del Sur con la anomalía de la temperatura fue 0.69. Esta información es de gran utilidad para entender la variabilidad del clima local, para nutrir los modelos de simulación numérica meteorológica o climatológica, así como a los programas de adaptación y mitigación a la variabilidad climática de largo y corto plazo.
Palabras Clave: ENSO, anomalía de la temperatura, índices, correlación.

8.2. Introducción

Uno de los principales objetivos del ser humano ha sido tratar de predecir el futuro con mayor precisión. A través de la ciencia ha tratado de entender y conocer mejor como se interrelaciona todo lo que sucede a su alrededor. La meteorología y la climatología no es la excepción, en especial por la relación directa e indirecta que guarda con el resto de las ciencias. Por ello en la actualidad los científicos desarrollan modelos de pronóstico numérico del tiempo que les permita predecir el clima con mayor precisión a corto y largo plazo, mejorar la resolución espacial, así como analizar el comportamiento de los fenómenos meteorológicos para entender su formación y desarrollo (Collini E. & Martin P., 2009; Goddard L, *et.al.*, 2001; Basher R., et.al., 2001). Aunque se han tenido muchos progresos, aún es un reto realizarlo a nivel local, en especial en los trópicos y sobre todo en las zonas costeras tropicales; por lo que es importante, identificar y entender el comportamiento de los patrones de diferentes variables meteorológicas y su interacción con las actividades humanas.

Una de las señales más relevantes de variabilidad climática identificadas a nivel global es el fenómeno climático El Niño – Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés), el cual opera de manera interanual, manifestando variabilidad en la región del trópico, tanto en las condiciones oceánicas como atmosféricas (Bjerknes J., 1969; McPhaden M.J., et.al., 2006) y se ha relacionado con anomalías climáticas en gran parte del mundo (Magaña, 1999; Zebiak, S., et.al., 2014).

Existen diversos índices del ENSO que se calculan a partir de variables oceanográficas y algunas también con información atmosférica que permiten identificar las fases y fortalezas del fenómeno. Uno de estos índices es el ONI (Índice del Niño Oceánico), definido

por la modificación de la temperatura superficial del mar (TSM) en grandes áreas del Océano Pacífico. Otro es el Índice multivariado del ENSO (MEI por sus siglas en inglés) el cual se obtiene de seis variables observadas en el Pacífico Tropical. Sin embargo, a pesar de diversas investigaciones (Zebiak, S., et.al., 2014), ciertas características del ENSO han provocado opiniones contradictorias, principalmente en lo que respecta a la aparición irregular de las fases cálida y fría con un ciclo de duración media de cuatro años, pero incluyendo ciclos irregulares de intensidad variable de 2 a 7 años. Tales variaciones hacen difícil predecir la ocurrencia del ciclo (Philander & Fedorov, 2003).

La mayoría de herramientas de análisis han sido desarrolladas para tratar de encontrar un diagnóstico de la variabilidad climática en modelos y observaciones de estudio. Uno de ellos es el Paquete de Diagnóstico de Variabilidad Climática (CVDP por sus siglas en inglés) de Phillips, A.S. et.al. (2014), en el cual incluye el ENSO, la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO ídem), Oscilación Multidecenal del Atlántico (AMO ídem), Modos Anulares del Norte y el Sur, Oscilación del Atlántico Norte, así como patrones de teleconexión en América del Norte a Sur del Pacífico.

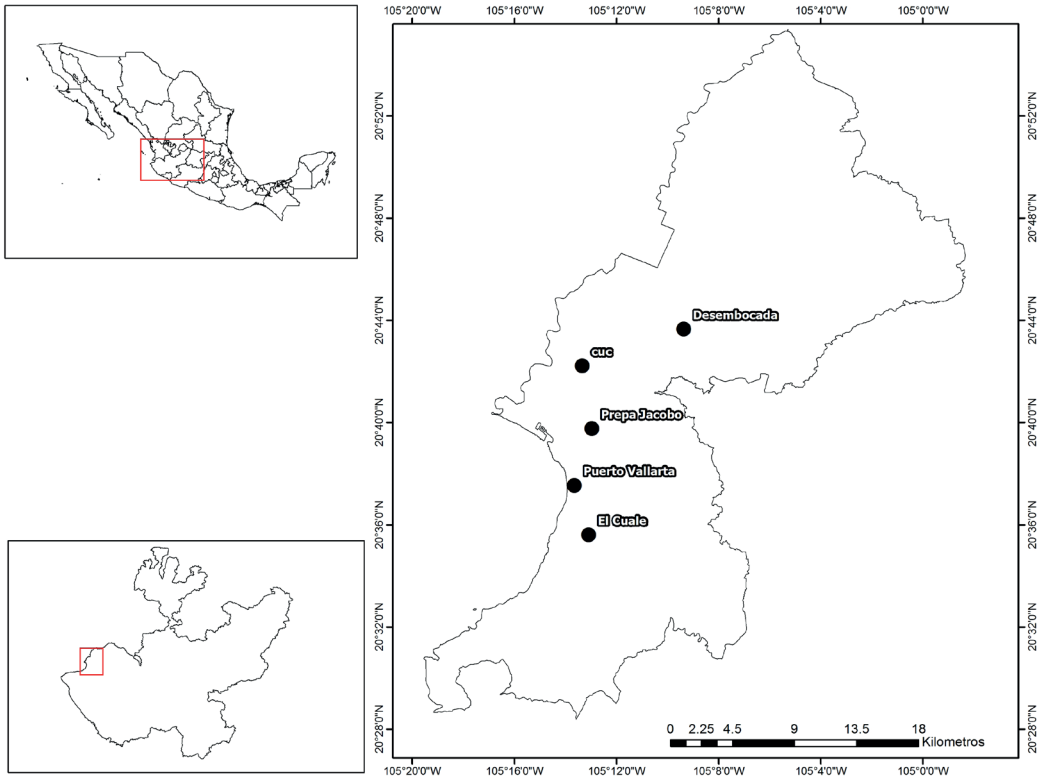
En México, la mayoría de los estudios de variabilidad climática han sido relacionados con el ENSO (Douglas & Englehart, 1997; Magaña, V., 1999; Magaña et.al., 1999; García-Páez, et.al., 2009; Bravo Cabrera J.L., et.al., 2010; Salas-Flores, M.A., et.al., 2014), con el PDO – ENSO (Pavia, E.G., et.al. 2006), con la Oscilación Multidecenal del Atlántico (Cruz-Rico, J., *et. al.* 2015) o algunos además de señalar estos fenómenos también consideran fenómenos a menor escala, como el Monzón Mexicano y los Ciclones Tropicales (Mosiño & García, 1974).

Todo lo anterior evidencia que aunque se han realizado importantes avances para tratar de identificar y entender la variabilidad climática, sin embargo se requiere continuidad para contar con mayor información que permita la precisión de los modelos de simulación y predicción, tanto a nivel global como regional, elemental para las actividades prioritarias de la humanidad como seguridad, alimento y salud (Zebiak, S., et.al., 2014). En este trabajo se pretende abonar información de la variabilidad de la temperatura superficial en Puerto Vallarta y su relación con el fenómeno del ENSO.

8.3. Materiales y métodos

8.3.1. Descripción del área de estudio

La ciudad de Puerto Vallarta, Jalisco, está localizado en el centro de la costa este de Bahía de Banderas. Esta bahía está en la costa central del Pacífico Mexicano, en el límite del estado de Nayarit y Jalisco. Localizado a una latitud de 20°40'N y longitud de 105°16'O (Figura 1). Es un destino turístico que ofrece al visitante hermosas playas, sol y descanso. La ciudad está rodeada por tres principales sierras que van de la costa hasta las montañas con aproximadamente 2,800msnm. El clima corresponde a la transición entre el semicálido subhúmedo con altas temperaturas todo el año en las zona costera a una temperatura templada en las zonas altas, su temperatura promedio es de 22.7°C y precipitación anual de 1,328mm (Velázquez-Ruiz, A., *et.al.*, 2012). La vegetación que la cubre es selva baja a transición a bosque de pino.



Gráfica 8.1. Área de estudio. Región de Bahía de Banderas y localización de las estaciones meteorológicas. Elaboración propia.

8.3.2. Datos utilizados

El cálculo del presente trabajo se realizó a partir de las series de datos de temperatura disponibles en la ciudad de Puerto Vallarta y la base de datos de los índices ONI y MEI del ENSO, los cuales se detalla a continuación.

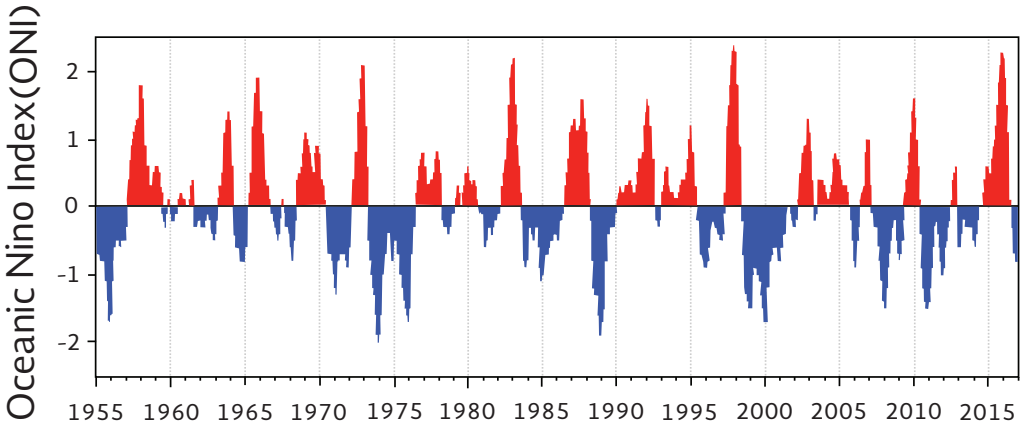
La serie de datos de temperatura superficial se dispuso de dos fuentes de información en cinco ubicaciones. Dos corresponden a las ubicaciones nombradas CUC y Prepa, son parte de una red de estaciones meteorológicas automáticas de la Universidad de Guadalajara del Centro de Estudios Meteorológicos de la Costa (CEMCO), las cuales registraron datos de temperatura cada diez minutos a partir de una estación meteorológica automática Davis Vantage Pro Plus dos, con una longitud de 9 años de datos correspondientes del 2008 al 2016. Y las otras tres ubicaciones nombradas Desembocada, El Cuale y Puerto Vallarta provienen de la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN- CONAGUA), registrados a partir de estaciones climatológicas manuales, que reportan un dato diario de la temperatura máxima y mínima, estas series se tomaron en distintos periodos continuos entre 1926 al 2004. Esta información está disponible en la base de datos climatológicos del CLIMCOM (http://clicom-mex.cicese.mx/). Ver detalles en Cuadro 8.1.

Cuadro 8.1. Características de las series de temperatura.

#	Nombre	Periodo	Años	Tipo de Estación Meteorológica
1	Desembocada	1949-2004	56	Manual
2	El Cuale	1980-2004	25	Manual
3	Puerto Vallarta	1926-1988	63	Manual
4	CUC	2008-2016	9	Automática
5	Prepa	2008-2016	9	Automática

Respecto a los índices, el ONI define por la anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) en grandes áreas del Océano Pacífico, específicamente tomaremos la región nombrada 3.4, ubicada entre la latitud de los 5°N a 5°S y de longitud 120° O a 170°O, en la que si persiste por al menos tres meses una anomalía de al menos 0.5°C de la TSM, en base a períodos centrados a 30 años y actualizados cada 5 años, cum-

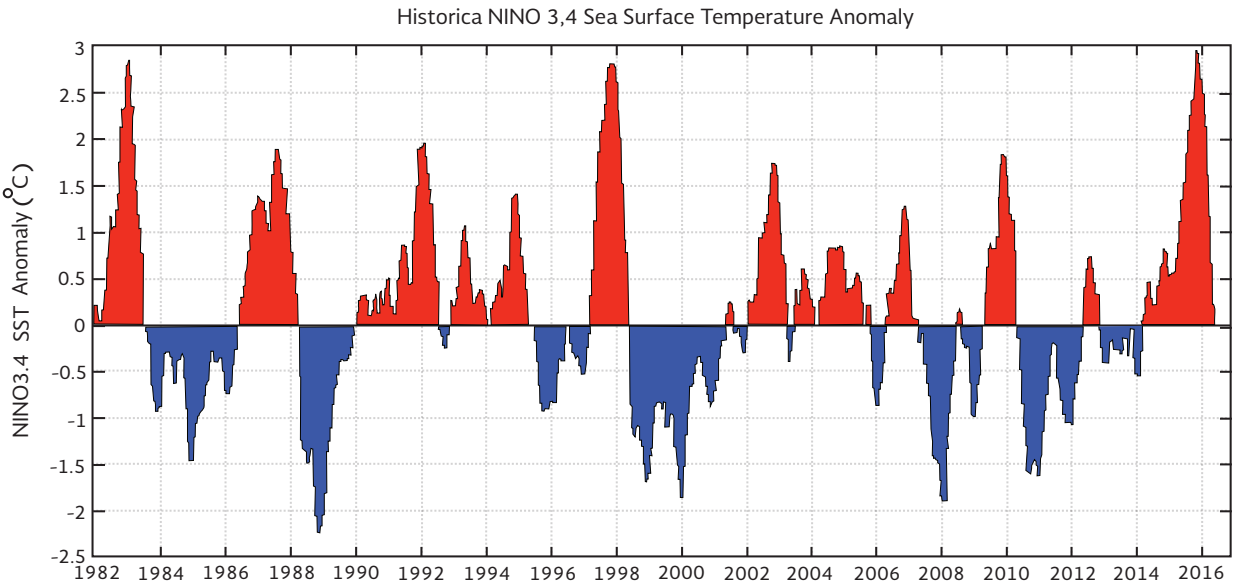
pliéndose esto se clasifica como evento ENSO (Smith *et. al.*, 2008). Si esta anomalía es positiva, es decir cálida, se le nombra El Niño, caso contrario si la anomalía es negativa, es decir fría, se le llama La Niña. Estos eventos ocurren alternativamente y sin frecuencia exacta. Ver Figura 2. La base de datos se extrajo de la página http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Cabe mencionar que esta base de datos está disponible desde el año 1950 a la fecha.



Gráfica 8.2. Índice Oceánico de El Niño (ONI por sus siglas en inglés) Se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región El Niño 3.4 (franja comprendida entre 5°N – 5°S y 120°-170°O) Fuente: https://www.nwfsc.noaa.gov/research/divisions/fe/estuarine/oeip/figures/Figure_ONI-01.JPG

El índice MEI se obtiene de seis variables observadas en el Pacífico Tropical, que son: presión al nivel del mar, componente zonal y meridional del viento superficial, la temperatura superficial del mar, temperatura del aire superficial y la fracción de nublado del cielo. El MEI se calcula por separado para cada una de las doce temporadas bimensuales (dic/ene, ene/feb, ..., nov/dic). Después de filtrar espacialmente los campos individuales en clúster, el MEI se calcula como el primer componente principal no girado de los seis campos observados combinados (Wolter, 1987). Esto se logra normalizando la varianza total de cada campo y luego realizando la extracción del primer componente principal en la matriz de covarianza de los campos combinados (Wolter & Timlin, 1993). Con el fin de mantener el MEI comparable, todos los valores estacionales se estandarizan con respecto a cada estación y al periodo de referencia 1950 -93. Ver Figura 3. La base de datos de obtuvo de la página https://www.esrl.noaa.gov/

psd/enso/mei/table.html. Cabe mencionar que esta base de datos al igual que el ONI está disponible desde el año 1950 a la fecha.



Gráfica 8.3. Índice Multivariado del ENSO (MEI por sus siglas en inglés)obtendio a partir de seis varaibles observadas sobre el Pacífico Tropical. Fuente NCAR 2013 Fuente: https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/multivariate-enso-index.

8.3.3. Procedimiento

Se procedió a procesar la información para verificar el porcentaje válido de la serie. Se obtuvieron los promedios mensuales de la temperatura para cada una de las ubicaciones. Cabe mencionar que por la naturaleza distintas de las series de datos, los datos de temperatura mensual mínima, máxima y promedio de las estaciones automáticas se calculó a partir de los datos cada diez minutos. Sin embargo, para los datos provenientes de las estaciones manuales que solo reporta un dato medido diario de la temperatura a las 08:00 h, así como la temperatura máxima y mínima diurna, se procedió a tomar la temperatura promedio a partir del promedio de la temperatura máxima y mínima, como se realiza en el trabajo de Cruz-Rico, J., *et. al.* (2015). Adicionalmente se realizó el control de calidad mediante el paquete de software RClimDex

1.1 (CC1/CLIVAR/JCOMM) para series de tiempo de temperatura máxima y mínima como sugiere el método propuesto por el Equipo de Expertos en Detención e Índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en Inglés).

Se obtuvieron promedios anuales para graficar tendencia. Para evidenciar la tendencia de un periodo más largo, se unió la serie de la ubicación de Puerto Vallarta con la de la estación de CUC, por ser las más largas. Después, de las misma serie de datos se obtuvieron los datos mensuales para graficar y analizar los datos del patrón anual. Además se realizaron promedios decenales de esta serie compuesta y poderlo comparar con los datos del IPPC de su último informe donde muestran un aumento global acelerado en las últimas tres décadas.

A partir de los promedios mensuales de la temperatura, se le restó la señal anual, mediante la resta del promedio mensual de la serie completa a cada uno de los datos mensuales. Es decir a cada dato mensual se le restó el promedio del mes respectivo; por ejemplo a enero del primer año se le restó el promedio de los meses de enero anteriores; de esta forma se quita la señal anual y sólo queda la anomalía de la temperatura. Después se suavizó la señal mediante el promedio trimestral (dic-ene-feb, ene-feb-mzo, mzo-abr-may,... nov-dic-ene) para su correlación con el ONI y el promedio bimensual (dic-ene, ene-feb, feb-mar, ...nov-dic) para su correlación con el MEI. Esto de acuerdo a como se realiza el cálculo de cada uno de los índices. Sólo en los datos de los extremos, se dejó el dato. Por último se calculó el coeficiente de correlación de cada una se las series de temperatura sin la señal anual y suavizadas de cada variable para cada ubicación con el periodo correspondiente de la series de los índices MEI y ONI.

8.4. Resultados y Discusiones

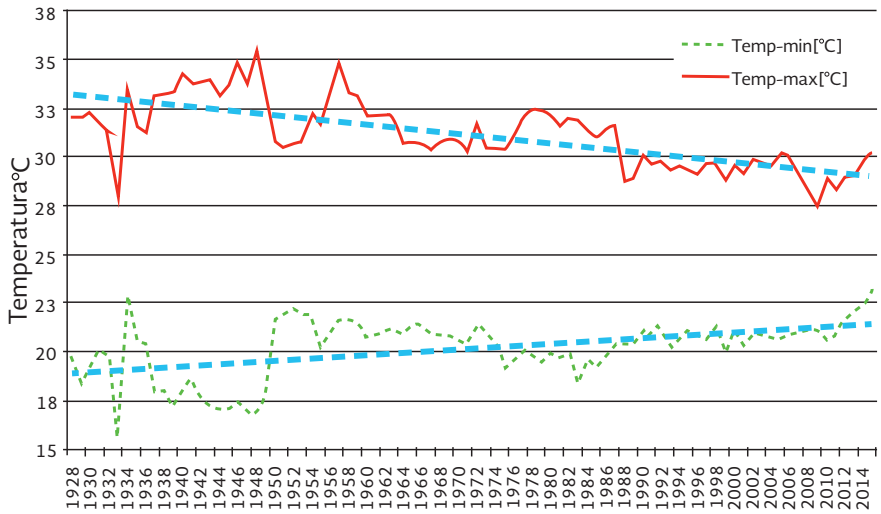
El porcentaje de datos válidos fue de 77.55% de la ubicación de la desembocadura, 94.60% Puerto Vallarta, El Cuale 95%, CUC 98.36% y Prepa con 96.74%. Donde los promedios se muestran en el Cuadro 8.2. Es de notar que en los promedios se observa que los promedios de la temperatura máxima son menores que las series más recientes(de 1980 a la fecha) en comparación a las que tiene datos desde 1926. Sin embargo

Cuadro 8.2. Promedio de temperatura de las series disponibles.

#	Nombre	Periodo	Temperatura °C		
			Máxima	Mínima	Promedio
1	Desembocada	1949-2004	32.36	19.77	21.94
2	El Cuale	1980-2004	28.49	16.74	18.20
3	Puerto Vallarta	1926-1988	32.02	19.90	22.31
4	CUC	2008-2016	28.94	21.23	25.33
5	Prepa	2008-2016	28.26	21.58	25.52
	Promedio		30.0	19.8	22.70

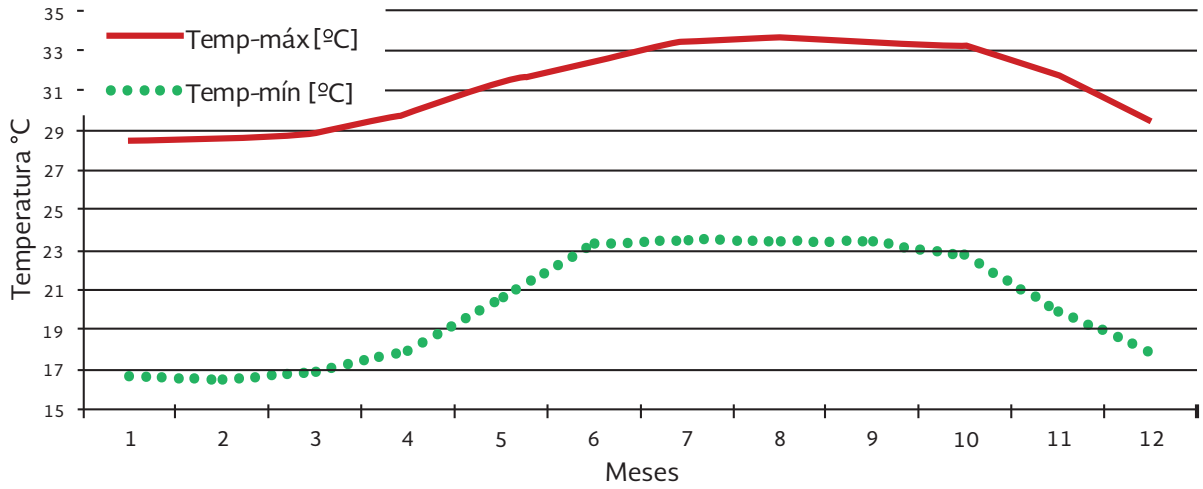
se puede observar que la temperatura mínima en promedio ha aumentado. El río Cuale nace en la sierra del Cuale, la cual es probablemente la zona más influenciada por el proceso de brisa, en esta zona se presentan temperaturas más bajas, a pesar de estar geográficamente más cerca (menos de 5km).

Para observar con mayor detalle este comportamiento se unieron las series más largas (ubicación Puerto Vallarta y CUC), como se muestra en la Gráfica 8.4. Se observa que en la líneas de tendencia de la temperatura máxima tiene pendiente negativa y la correspondiente a la temperatura mínima tiene tendencia positiva.



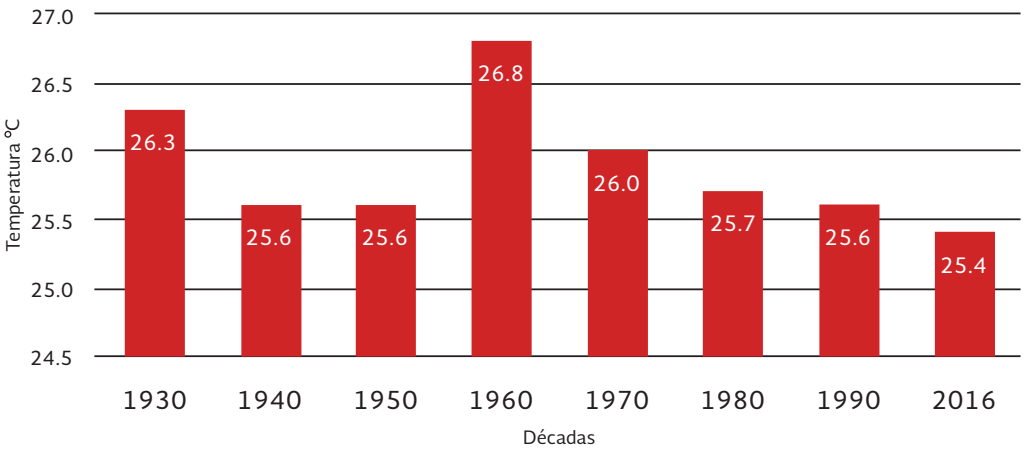
Gráfica 8.4. Promedios anuales de la temperatura [°C] mínima en línea punteada y máxima en línea continua, de 1928 al 2016. Se unió la serie histórica de la estación manual (Puerto Vallarta) y datos de una estación meteorológica automática (CUC).

A partir de la serie que se gráfico en la Gráfica 8.4 se obtuvieron los promedios mensuales para identificar el comportamiento a lo largo del año (ver Figura 5), donde se evidencian los periodos cálidos y templados de la región, de acuerdo a lo publicado por Velázquez-Ruiz,A. et.al., (2012).



Gráfica 8.5. Promedios de la Temperatura mensual [°C] mínima en línea punteada y máxima en línea continua, de la serie de 1928 al 2016.

En la Gráfica 8.6 se muestra los promedios decenales, donde se ve la evolución de la variación de la temperatura promedio por décadas. Es de notar que en las últimas décadas, al menos en las últimas tres décadas el promedio por década va en disminución, aunque no se pueda decir que sea un comportamiento generalizado de toda la serie. Observamos que en la década de 1960 es la mayor dentro de este periodo analizado, lo que coincide con los resultados mostrados por Cruz-Rico, J., *et. al.* (2015), en el que en la Cd. de Tampico también encuentran un dato de máxima temperatura en esa década, donde este lo relaciona con el pico del manchas solares y área de exposición de la Tierra a las manchas solares (Soon W. & Legates D.,2013).



Gráfica 8.6. Promedio decenal de la temperatura [°C] observada en la ciudad de Puerto Vallarta de 1930 al 2016 de acuerdo a los datos registrados.

En el Cuadro 8.3 se muestran los coeficientes de correlación resultaron en general con valores muy pequeños, a pesar del tratamiento que se realizó a los datos (suavizado de la anomalía de la temperatura mensual).

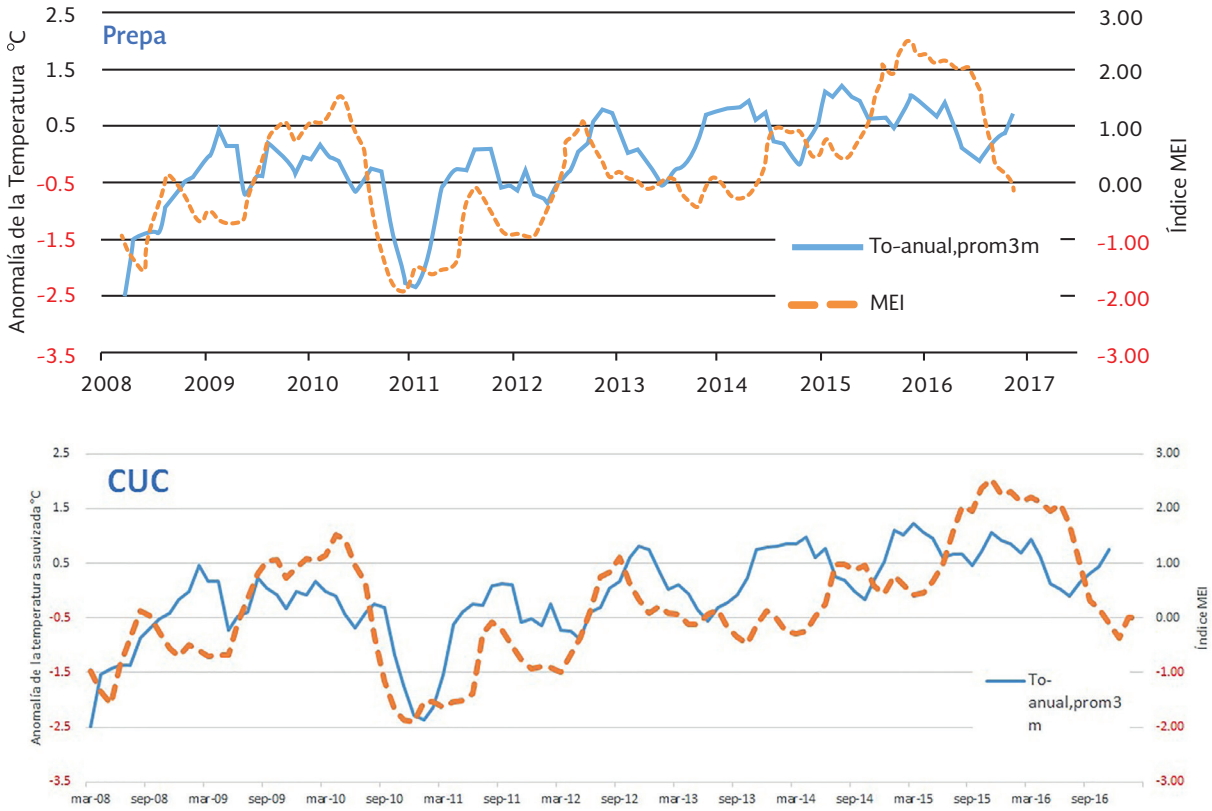
Cuadro 8.3. Resultado de los coeficientes de correlación entre los índices MEI y ONI con las series suavizadas de la anomalía de la temperatura promedio, máxima y mínima

#	Nombre	Correlación del índice:					
		ONI (Oceanic Niño Index) vs anomalía suavizada a tres meses de la:			MEI (Multivariado ENSO Index) vs anomalía suavizada a dos meses de la		
		T prom	T máx	T mín	T prom	Tmáx	T mín
1	Desembocada	0.11	0.08	0.28	-0.06	0.10	0.27
2	El Cuale	0.06	0.34	0.02	0.03	0.31	0.00
3	Puerto Vallarta	0.17	0.12	0.08	0.28	0.26	0.00
4	CUC	0.50	0.33	0.50	0.58	0.20	0.49
5	Prepa	0.59	0.36	0.48	0.69	0.31	0.42

Es de notar que hay diferencias entre las correlaciones con ambos índices con las series tomadas por las estaciones manuales con valores < 0.34, donde incluso hubo varios resultados de valor nulo; en comparación con respecto a las correlaciones con las series registradas con las estaciones automáticas con valores de hasta 0.69 el más alto y el más bajo de 0.20. Registrándose las correlaciones más altas solo con la temperatura promedio. Tal vez esto debido a que ambos índices del MEI y del ONI se calculan principalmente a partir de las anomalías del promedio de la temperatura superficial del mar en un segmento del Océano Pacífico (Wolter, K., 1987) y no de los valores extremos de temperaturas máxima o mínimas. Por ello tal vez era de esperarse que las correlaciones con las temperaturas máximas y mínimas resultaran bajos en comparación con los resultados de la temperaturas medias. Aunque esto último no se cumple para la series tomadas con las estaciones manuales, en las cuales no se registra la temperatura media, si no que se calculó a partir del promedio de la máxima y la mínima; como se ha observado en otros trabajos (Cruz- Rico, J. et.al. 2015) da una referencia muy acercada del comportamiento de la temperatura, la correlación resultó sensiblemente menor con las señales registradas con aparatos automáticos. Por esta misma razón los resultados de las correlación de los índices con las temperaturas promedios de las estaciones automáticas resultaron se los valores más grandes.

Tal vez una razón es que las series de la series automáticas (CUC y Prepa) tiene un periodo más corto que las de las estaciones manuales, por lo que la correlación es más factible en series pequeñas que en series más largas.

Se observa en las Figura 7 a y b que durante el periodo del 2008 al 2016 el comportamiento de la anomalía de la temperatura está alineado cerca del 70% y 60% con el comportamiento del índice MEI que es con el que se encontró mayor correlación.



Gráfica 8.7. Anomalía suavizada de la temperatura del punto Cuc(a) y la Prepa (b) con línea sólida y MEI con línea punteada.

Como se detalló anteriormente, existen diversas publicaciones de cómo está relacionada las anomalías de la temperatura a nivel nacional con los eventos El Niño y La Niña. Esperábamos encontrar similitud entre el análisis local (a pequeña escala), coincidiera con los comportamientos o anomalías que se han descrito a nivel nacional (a mayor escala). Sin embargo, la región de Puerto Vallarta se encuentra entre los límites de las regiones que se definían en estos trabajos al referirse a zona norte o zona sur del país.

8.5. Conclusiones

Con los datos disponible y la técnica de análisis presentada, no es posible afirmar de manera contundente la influencia del ENSO en eventos de la temperatura en la Ciudad de Puerto Vallarta, pues se encontró que la anomalía en la temperatura registrada puede estar relacionada en un 60 o 70% está influenciada por este evento. Se recomienda continuar con el monitoreo de esta y más variables meteorológicas para que permita definir con mayor precisión cuanto y de que forma está variando en clima en esta región.

La información de este tipo de trabajos es útil para incorporarla a nuevo trabajos de simulación o predicción climática, procurando luego así abonar a los pronósticos meteorológicos de corto plazo para abonar así al ejercicio operativo de la autoridades y comunidad en general.

8.6. Agradecimientos

Se agradece a las diversas instituciones y personas que colaboraron para la obtención y análisis de la información aquí presentada. Así como de los que se recibió financiamiento como COECYTJal, Proyectos semilla de REDESClim – CONACYT, Programas PIFI, PRODEP y de la Universidad de Guadalajara.

8.7. Referencias

Basher R., Clark C., Dilley M., Harrison M.. 2014. Coping with the climate: a way forward. A Multi-Stakeholder Review of Regional Climate Outlook Forums Concluded at an International Workshop, 2001. Available at http://iri.columbia.edu/docs/publications/2000-1016 PretoriaSumRpt2.pdf. (Accessed May 2014).

Bjerknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon Weather Rev, 97:163-172

Bravo Cabrera J.L., E. Azpra Romero, V. Zarraluqui Such, C.Gay García and F. Estrada Porrúa. 2010. Significance tests for the relationship between "El Niño" phenomenon and precipitation in Mexico. Geofísica Internacional 49 (4): 245-261.

Collini E., Martin P. 2009. El Modelo de pronóstico numérico del tiempo WRF-ARW: Su uso operativo en el Departamento de Meteorología del SHN. XXIV Reunión de la Asociación de Geofísicos y Geodestas (AAGG). Mendoza, Argentina.

Cruz- Rico J.; Rivas Camargo D. y Tejeda- Martínez A. 2015. Variability of Surface air temperature in Tampico, northeastern Mexico. International Journal of Climatology, Vol.35, Num.11, Pag. 3220-3228. DOI: 10.1002/joc.4200.

Douglas, A. V., and P. J. Englehart. 1997. Inter-monthly variability of the Mexican summer monsoon. Twenty Second Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop. NOAA. USA. 207 p.

García-Páez, F. and Cruz-Medina I.R., 2009. Variability of rainfall in the north pacific region of Mexico. Agrociencia 43: 1-9. 2009.

Goddard L., Mason S.J., Zebiak S.E., Ropelewski C.F., Basher R., Cane M.A. 2001. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. Int J Climatol, 21:1111–1152. 35. McPhaden MJ. Genesis and Evolution of the 1997–98 El Niño. Science 1999, 283:950–954. 36.

Magaña V. O., J. L. Pérez, C. Conde, C. Gay, y S. Medina.1999. El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS) y sus impactos en México. Departamento de Meteorología General, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 13 p.

Magaña, V. O., 1999. Los impactos de El Niño en México. Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, México, 229 pp.

McPhaden M.J., Zeibak S.E., Glantz M.H.2006. ENSO as an integrating concept in earth science. Science, 314:1740-1745

Mosiño, P.A. y E. García, 1974. The Climate of Mexico. Chap. 4 of Climates of North America, R.A. Bryson y F.K. Hare (Ed), Elsevier Sci. Pub. Co., 345-391.

NCAR 2013; National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 20 Aug 2013.

"The Climate Data Guide: Multivariate ENSO Index". Retrieved from https://climate-dataguide.ucar.edu/climate-data/multivariate- enso-index.

Pavia, E. G., F. Graef and J. Reyes, 2006. PDO-ENSO Effects in the climate of Mexico, Journal of Climate, 19, 6433 – 6438.

Philander, S.G. and A. Fedorovo, 2003. Is El Niño sporadic or Cyclic?. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 31,579-574

Phillips, A.S., C. Deser, and J. Fasullo, 2014: A New Tools for evaluating Modes of Variability in Climate Models. EOS, 95, 453-455, doi: 10.1002/2014EO490002. (http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014EO490002/pdf).

Salas- Flores, Marco A.; María E Hernández-Cerda, Javier Villicaña-Cruz, Enrique Azpra-Romero y Claudia T. Lomas –Barrie. 2014. The influence of Strong el Niño phases on the rainfall over the Yucathan Peninsula, Mexico. Scientific annals of "Alexandru Ioan Cuza" University of Iasi. Volumen LX, no.1, s. II C, Geography series 2014 (printed versión ISSN 1223-5334, online versión eISSN 2284-6379)

Smith T.M., Reynolds R.W., Peterson T.C., Lawrimore J. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land–ocean surface temperature analysis (1880–2006). J. Climate 21: 2283–2296., http://dx.doi.org/10.1175/2007jcli2100.1

Soon W, Legates D. 2013. Solar irradiance modulation of Equator-toPole (Artic) temperatura gradients: empirical evidence for climate variation on multi-decenal timescales. J. Atmos. Sol-Terr. Phy. 93: 45–56.

Stephen E. Zebiak, Ben Orlove, Ángel G. Muñoz, Catherine Vaughan, James Hansen, Tara Troy, Madeleine C. Thomson,1, Allyza Lustig and Samantha Garvin, 2014. Investigating El Niño-Southern Oscillation and society relationships. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, vol. 6, numero 1, pag. 17-34. Doi. WIREs Clim Change 2014. doi: 10.1002/wcc.294

Veláquez- Ruiz A., Martínez R L.M., Carrillo-González F.M. 2012. Caracterización climática para la región de Bahía de Banderas mediantes el sistema de Köpen, modificado por García, y técnicask de sistemas de información Geográfica. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 79, .7-19.

Wolter, K., 1987. The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, Eastern Pacific and Indian Oceans as captured by cluster analysis. Journal of Climate and Applied Meteorology. Vol 26, pág. 540-558.

Wolter, K., and M.S. Timlin, 1993: Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. Proc. of the 17th Climate Diagnostics Workshop, Norman, OK, NOAA/NMC/CAC, NSSL, Oklahoma Clim. Survey, CIMMS and the School of Meteor., Univ. of Oklahoma, 52-57.

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS PM10 EN LA ZONA URBANA DE PUERTO VALLARTA, JALISCO, Y SU RELACIÓN CON LOS FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS

9

Evaluación de la concentración de partículas PM10 en la zona urbana de Puerto Vallarta, Jalisco, y su relación con los fenómenos atmosféricos

Evaluation of the concentration of particles PM10 in the urban zone of Puerto Vallarta, Jalisco, and his relation with the atmospheric phenomena

Julio Cesar Morales Hernández[1]*; Fabiola Ponce Pelayo[2]; Víctor Manuel Cornejo López[3]*; Fátima Maciel Carrillo González[4]*

9.1. Resumen

Para realizar un estudio de todos los contaminantes atmosféricos se requiere contar con una Red de Monitoreo Ambiental, la cual registre cada uno de sus compuestos. Uno de los más importantes, accesible a monitorear, de interés al ambiente y a la salud es el material particulado (PM10), el cual se define como cualquier sustancia a excepción del agua pura, presentes en la atmósfera en estado líquido o sólido, cuyo tamaño se considera entre los 0.002 hasta los 100 µm de diámetro. El municipio de Puerto Vallarta presenta un fuerte crecimiento en los últimos años, con ello se han incrementado las fuentes de contaminación del aire. Esta normado que debe ser observación obligatoria para asen-

1 Email. cesarbemarena@gmail.com.
2 Estudiante de Biología, CEMCO Centro de Estudios Meteorológicos de la Costa. E-mail: favipon230895@gmail.com
3 E-mail: vicmancor@hotmail.com
4 E-mail: fatima.carrillo@academicos.udg.mx
* CEMCO Centro de Estudios Meteorológicos de la Costa, Departamento de Ciencias Exactas, Universidad de Guadalajara, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

tamientos humanos con más de 500 mil habitantes, como es el caso de Puerto Vallarta. En la zona de estudio se ubicaron ocho puntos de muestreo, en los cuales se localizan las zonas conurbadas de la región. Se realizó una base de datos atmosféricos de la página oficial de la NOAA (termodiagramas e imágenes atmosféricas GOES para su interpretación de sistemas meteorológicos). Para el muestreo se utilizó un sistema de medición de partículas suspendidas PM10 portátil, con un tipo de sensor óptico. Se tomaron los datos durante una semana diariamente por las mañanas (9:00 am a 12:00pm). El objetivo del presente trabajo fue evaluar la concentración de partículas PM10 suspendidas en el aire en la zona urbana de Puerto Vallarta y analizar la relación de los sistemas atmosféricos.

Palabras clave: Calidad del aire, Termodiagramas, Áreas Conurbadas, sistemas atmosféricos.

9.2. Abstrac

In order to study all the air pollutants it is necessary to have an environmental monitoring network, which registers each one of these pollutants. Where one of the most important, accessible to monitor and of interest to the environment and health in the particulate material (PM10), is defined as any substance other than pure water present in the atmosphere in solid or liquid state under normal terms and which diameter is between 0.002µm y 100 µm. Puerto Vallarta has been showing a strong growth of air pollution in the last years and therefore, the sources of air pollution have increased. We are next to have the necessity of a system to monitor the air quality. This observation rule is obligatory for human settlements with more than 500,000 habitants which is Puerto Vallarta case. In the study area there are eight sampling points, in which the conurbated areas of the region are located. An atmospheric database of the NOAA website (thermodiagrams, atmospheric images and their interpretation of atmospheric systems was carried out. Sampling was carried out using a portable PM10 suspended particulate measurement system with a type of optical sensor (9 : 00 am) The objective of the present work was to study the concentration of PM10 particles in the urban area of Puerto Vallarta and analyze the relationship of atmospheric systems to the concentration of particles suspended in the air.

Key words: Air quality, Thermodiagrams, Conurbated areas, atmospheric system

9.3. Introducción

La atmósfera es un bien común indispensable para la vida, respecto de la que todas las personas tienen el derecho de su uso y disfrute, así como la obligación de conservarla. La calidad del aire y la protección de la atmósfera es una prioridad de la política ambiental, debido a todos los perjuicios que origina su contaminación, tanto para la salud humana como al ambiente y demás elementos de la naturaleza. Entendiéndose a la contaminación atmosférica como la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza (OMS, 2002).

El fenómeno de la contaminación atmosférica, por su naturaleza compleja, necesita para su atención, del concurso de múltiples actuaciones para atender otros tantos aspectos de este, por lo que se requiere un enfoque integrador (Vera *et. al.,* 2014).

Los principales contaminantes atmosféricos urbanos del mundo y, por ello, los más estudiados, son el dióxido de azufre (SO_2) y el material particulado derivado de la oxidación de combustibles fósiles. Además, otros contaminantes de interés son el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el ozono (O_3) (Aránguez *et. al.*, 1999). Para realizar un estudio de todos los contaminantes atmosféricos se requiere de contar con una Red de Monitoreo Ambiental, la cual registra cada uno de estos contaminantes, donde uno de los más importantes, accesible a monitorear y de interés al ambiente y a la salud es el material particulado (PM10).

El material particulado (MP), o también llamado partículas suspendidas totales (PST), se define como cualquier sustancia a excepción del agua pura, presentes en la atmósfera en estado líquido o sólido, bajo condiciones normales y cuyo tamaño se considera está comprendido entre los 0.002µm y los 100 µm de diámetro (Martínez, 2005). Este forma parte de los indicadores para medir la calidad del aire limpio en un área determinada (OMS, 2005). Su composición elemental incluye diferentes elementos, unos livianos como el aluminio, silicio, potasio, calcio, y otros pesados como hierro, zinc, vanadio, titanio, cadmio, plomo, mercurio y antimonio; además, compuestos orgánicos de elevada toxicidad y potencial efecto cancerígeno y mutágeno (Suárez y Pérez, 2006).

Las fuentes de partículas suspendidas son diversas y abarcan desde las naturales, como polvo volcánico y tolvaneras, hasta las de origen antropogénico, que incluyen fábricas de acero, plantas de generación de energía, ladrilleras, cementeras, fundidoras, obras de construcción y demolición, hornos y chimeneas que utilizan madera como combustible, áreas sujetas a erosión y motores diésel (Pérez-Vidal *et. al.,* 2010).

El comportamiento del material particulado varía de forma irregular y temporal en la atmósfera, debido a las actividades humanas, condiciones atmosféricas inestables y fenómenos meteorológicos (Reina y Olaya, 2013). Existe una relación significativa entre las inversiones térmicas y la duración de la acumulación de contaminantes, donde las inversiones térmicas son factor para elevados índices de contaminación (García *et. al.,* 2012).

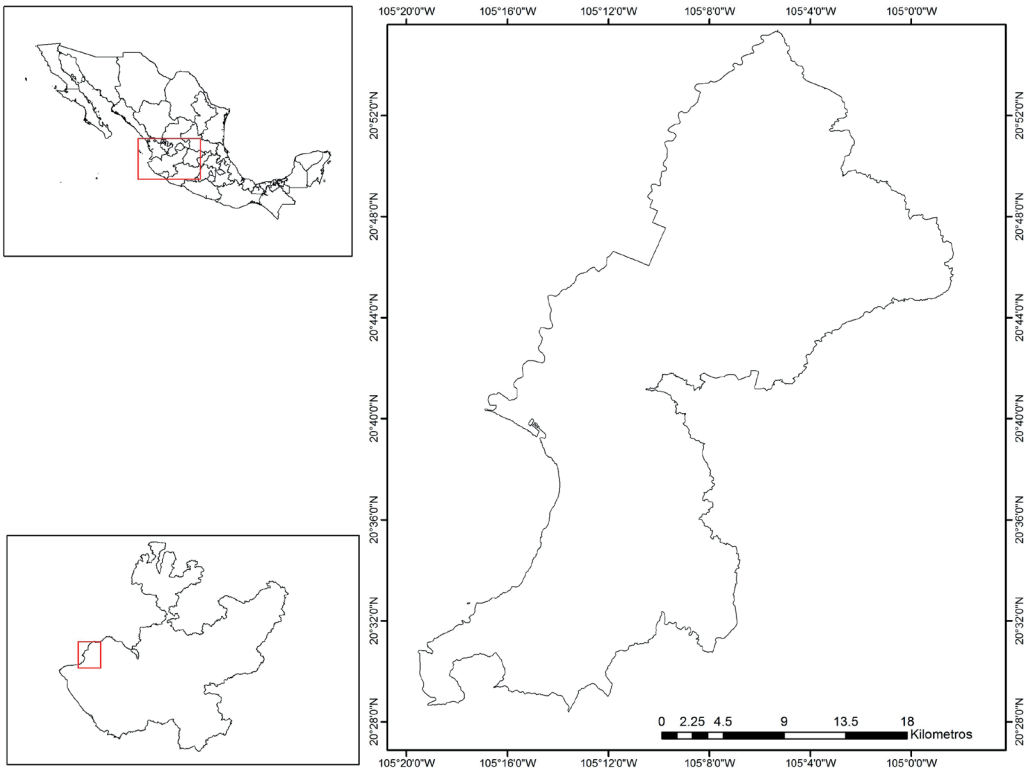
En México, los contaminantes que actualmente se utilizan como indicadores de la calidad del aire son los denominados "contaminantes criterio". Estos contaminantes son aquellos que se han identificado como perjudiciales para la salud de las personas y cuentan con una norma emitida a través de la Secretaría de Salud, ya que presentan características toxicológicas (Meza *et. al.*, 2010); es por esto que la contaminación del aire, sobre todo en las grandes ciudades de nuestro país, se ha vuelto un tema relevante, en donde solo nueve ciudades realizan monitoreo de contaminación del aire por material particulado PM10 (World Health Organization, 2016), lo que indica que existe mucho trabajo por hacer.

El municipio de Puerto Vallarta presenta un fuerte crecimiento en los últimos años, con ello se han incrementado las fuentes de contaminación del aire. Por lo que estamos próximos a tener la necesidad de un sistema de monitoreo de la calidad del aire. Esta norma es de observación obligatoria para asentamientos humanos con más de 500 mil habitantes, como es el caso de Puerto Vallarta. Ante esta situación, el control de la contaminación ambiental por partículas suspendidas en el aire es necesario en casi todas las regiones del país para proteger la salud de la población.

Por tal motivo el objetivo de la presente investigación es evaluar la concentración de partículas PM10 en la zona urbana de Puerto Vallarta, así como determinar las zonas con el índice más alto de contaminación del aire por partículas PM10 y analizar la relación de los sistemas atmosféricos con la concentración de partículas suspendidas en el aire.

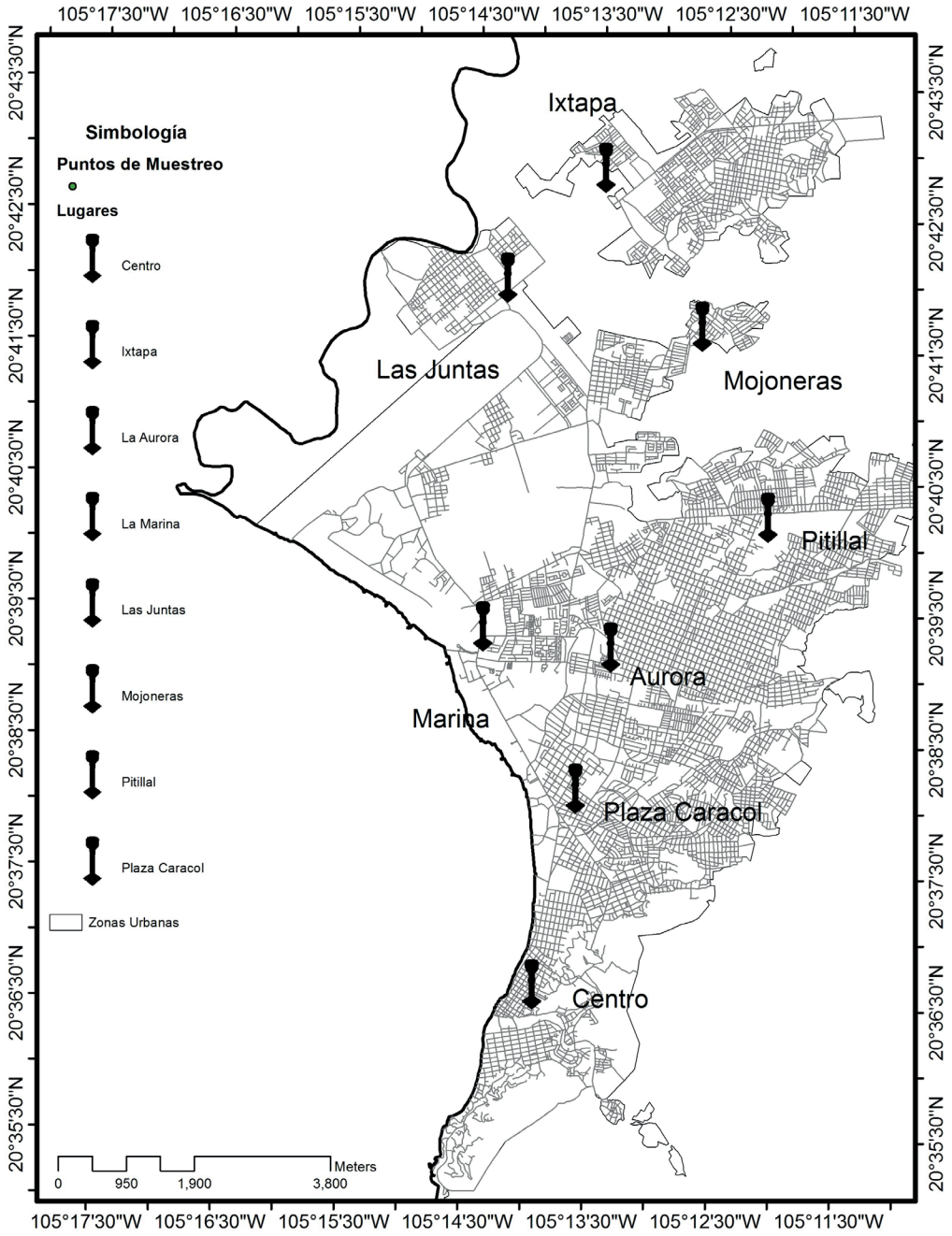
9.4. Área de estudio

Puerto Vallarta es un municipio y ciudad turística del estado de Jalisco, México, en la Bahía de Banderas, en el Océano Pacífico. Está situado al poniente del estado, en las coordenadas 20°27'00'' a los 20°59'00'' de latitud norte y los 104°55'00'' a los 105°33'00''de longitud oeste, a una altura de 2 msnm. Limita al norte con el estado de Nayarit, al sur con el municipio de Cabo Corriente y Talpa de Allende; al oriente con San Sebastián del Oeste y Mascota y al poniente con el Océano Pacífico (Ver Gráfica 9.1). El municipio cuenta con muy pocas zonas planas, éstas se localizan principalmente en la margen derecha del río Ameca y por la costa, desde su desembocadura hasta la del río Cuale hacia el sur. El clima es semitropical y húmedo, la temperatura máxima es de 31 °C en el verano y la mínima de 19 °C. En el invierno; la media anual es de 25 °C. La temporada de lluvias abarca de mediados del mes de junio a finales del mes de agosto, continuando con lluvias aisladas hasta mediados de octubre; tiene una precipitación media anual de 1,417 milímetros (Morales-Hernández *et. al*, 2010).



Gráfica 9.1. Ubicación geográfica del área de estudio. Municipio de Puerto Vallarta.
Fuente: Elaboración propia.

En la zona de estudio se ubicaron ocho puntos de muestreo, en los cuales se localizan las zonas conurbadas de la región, entre los cuales los sitios a estudiar son los siguientes (Gráfica 9.2):



Gráfica 9.2. Ubicación geográfica de cada uno de los puntos de muestreo
Fuente: Elaboración propia.

9.5. Materiales y métodos

Para desarrollar el siguiente trabajo se realizaron las actividades que se mencionan a continuación:

1. Búsqueda y revisión bibliográfica especializada de trabajos acordes a la investigación.
2. Elaboración de una base de datos atmosféricos de la página oficial de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (Termodiagramas, la cual nos ofrece información útil de cómo se comportan las capas de aire en la atmósfera). Y otra base de imágenes atmosféricas GOES (Global Online Enrollment System) para la interpretación de los sistemas atmosféricos presentes.
3. Se analizaron los sistemas atmosféricos presentes, así como las inversiones térmicas que se registraron en los termodiagramas para posteriormente compararlas con las concentraciones de PM10 obtenidas en cada punto de muestreo, para determinar si los resultados están influenciados por los sistemas atmosféricos que se presentaron en los días de muestreo.
4. Muestreo en puntos de interés, para la medición de partículas suspendidas PM10 presentes en el aire se realizó en temporada seca en los meses de febrero, marzo y abril. Para realizar el muestreo se utilizó un sistema de medición de partículas suspendidas PM10 portátil, con un tipo de sensor óptico, por diferencia laser, en cada una de las estaciones mencionadas, se tomaron los datos durante una semana diariamente por las mañanas por tres horas (9:00 am a 12:00pm), el sistema de medición fue puesto a una altura aproximada de 1.5, 2 y 2.5 metros respectivamente. Los datos fueron registrados en una base de datos en formato ASCII separado por comas para su posterior análisis en hoja de cálculo, correspondiendo los valores a fecha, hora, PM10, e IMECAS (Índice Metropolitano de la Calidad del Aire), en valores enteros 0-500. Estos datos IMECAS ya se encontraban normalizados a la NOM NOM-034-ECOL-,1993. de estudio.

9.6. Resultados

9.6.1. Evaluación de partículas PM10

La interpretación de la variabilidad de los niveles de concentración de PM10, en las ocho estaciones de muestreo seleccionadas ha dado como resultado la identificación de patrones diarios de niveles de partículas específicas, estos patrones vienen determinados a nivel local, regional y externo, donde los aportes locales son característicos de cada uno de los entornos.

Los resultados de las concentraciones de material particulado se muestran en el Cuadro 9.1. Para la interpretación de los datos IMECAS obtenidos, se utilizó la norma de calidad diaria de la Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) (Cuadro 9.2). En total se obtuvieron 284 datos, el promedio aritmético es de 124 IMECAS, con un valor máximo de 183 y un mínimo de 48.

Cuadro 9.1. Resultados de cada uno de los puntos, expresado en IMECAS.

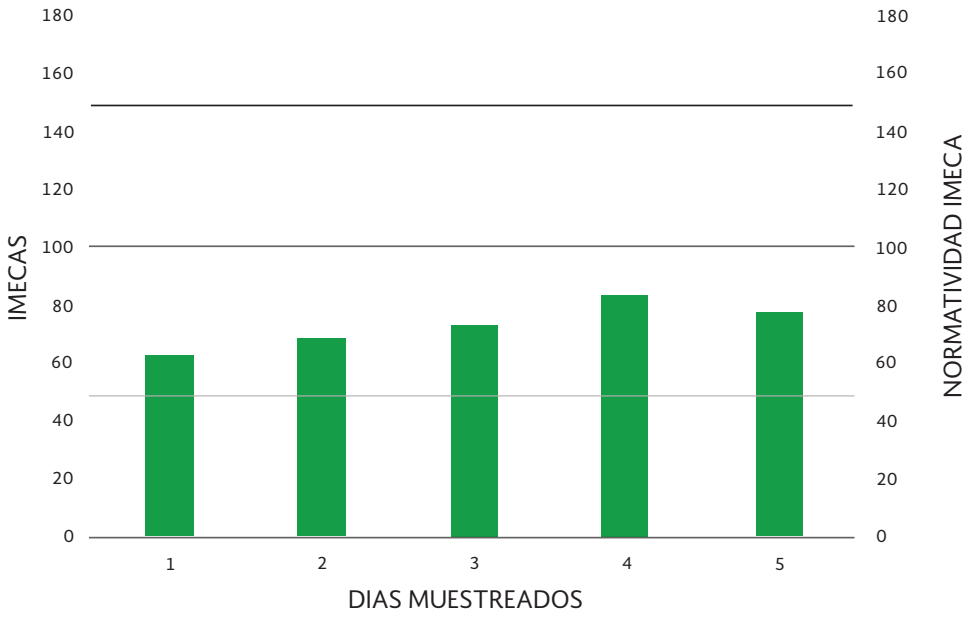
Punto	Valor Mín..	Valor Máx.	Prom. Mín	Prom. Máx.
IXTAPA	48	114	63	83
JUNTAS	83	150	105	129
MOJONERAS	122	183	175	150
PITILLAL	138	175	141	152
MARINA	117	174	121	131
AURORA	143	241	150	168
CARACOL	118	146	123	133
CENTRO	119	145	126	133

Cuadro 9.2. Interpretación del IMECA. Fuente: Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (2011).

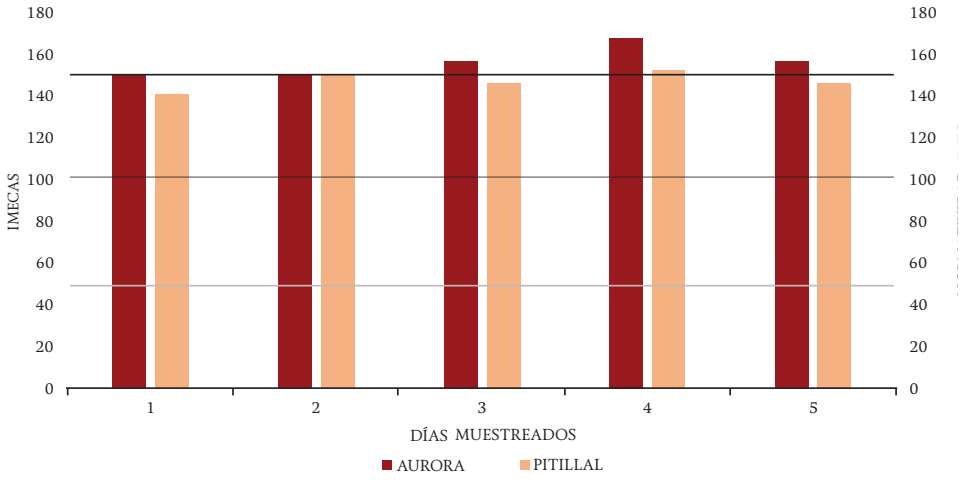
IMECA	Condición	Efectos a la salud
0-50	BUENA	Adecuada para llevar a cabo actividades al aire libre.
51-100	REGULAR	Posibles molestias en niños, adultos mayores y personas con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.
101-150	MALA	Causante de efectos adversos a la salud de la población, en particular los niños y los mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.
151-200	MUY MALA	Causante de mayores efectos adversos a la salud de la población en general, en particular los niños y los adultos mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.
>200	EXTREMADAMENTE MALA	Causante de efectos adversos a la salud de la población en general. Se pueden presentar complicaciones graves en particular los niños y los mayores con enfermedades cardiovasculares o respiratorias como el asma.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los diferentes puntos de muestreo, cada uno de estos, se pueden clasificar según la condición en la que se ubiquen los datos dentro de la tabla interpretación IMECA (buena, regular, mala, muy mala o extremadamente mala).

Dentro de las concentraciones medias de PM10 obtenidas, se registraron los valores mínimos en el punto Ixtapa, con concentraciones medias dentro del intervalo 51-100 IMECAS (Gráfica 9.3), por lo que se puede ubicar como el único punto en la condición regular, caso contrario ocurre en los puntos Aurora y Pitillal, donde se registraron los valores máximos, y las concentraciones medias se ubicaron dentro del intervalo 151-200 IMECAS en la condición muy mala (Gráfica 9.4).

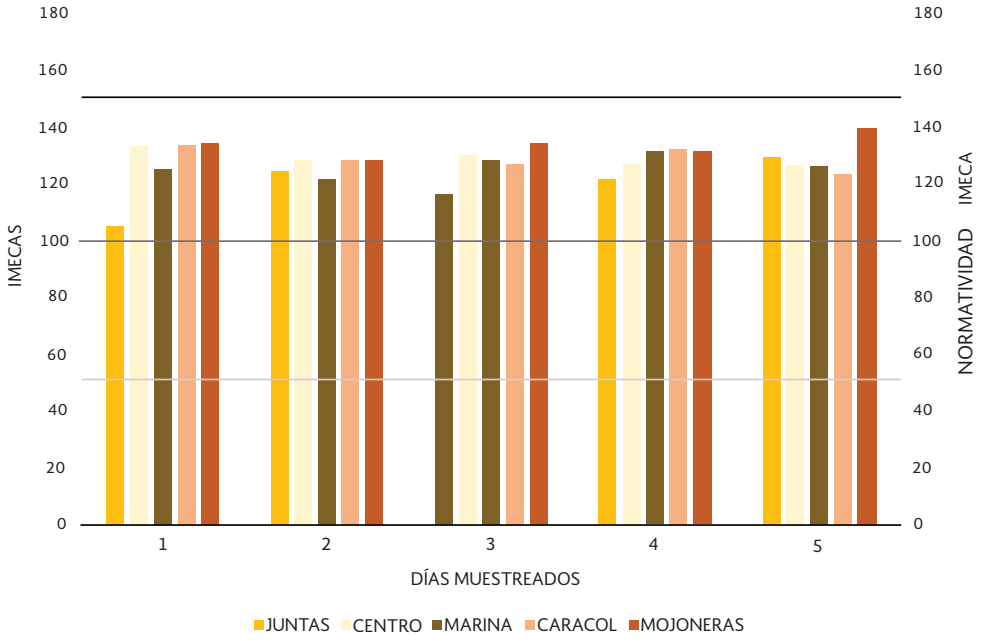


Gráfica 9.3. Concentraciones medias de PM10 por día de la semana en el punto Ixtapa



Gráfica 9.4. Concentraciones medias de PM10 por día de la semana de los puntos Aurora y Pitillal

En el resto de los puntos muestreados: Juntas, Centro, Marina, Caracol y Mojoneras, se registraron valores similares, dichos resultados se ubicaron en la categoría mala, desde lo exigido por la Secretaria de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (Gráfica 9.5).



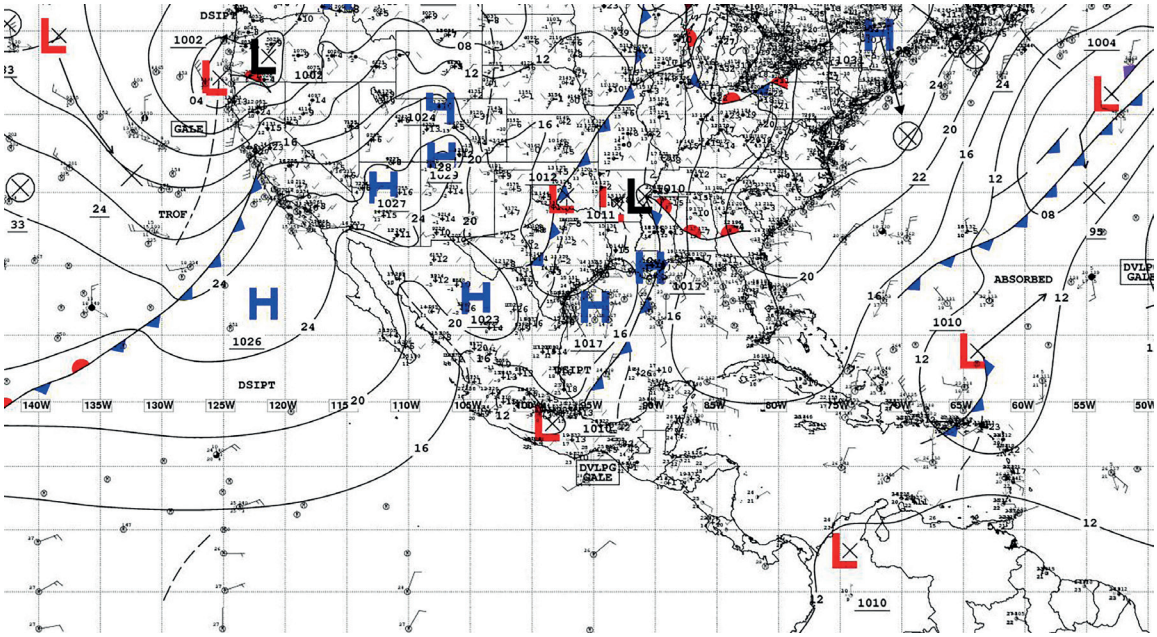
Gráfica 9.5. Concentraciones medias de PM10 por día de la semana de los puntos Juntas, Centro, Marina, Caracol y Mojoneras

9.7. Relación sistemas atmosféricos – concentración de PM10

Se realizó un análisis de los sistemas atmosféricos presentes, las inversiones térmicas registradas y las concentraciones de PM10 obtenidas en cada uno de los días muestreados, para observar si la variación de los datos se vió influenciada por dichas variables. Por lo que se pudo observar claramente que, en algunos de los días, se aprecia la relación de los sistemas atmosféricos presentes y las concentraciones obtenidas. Como es el muestreo en el punto Ixtapa realizado del 20 al 24 de febrero del 2017 donde se registraron las concentraciones mínimas de todo el estudio, o bien el punto Aurora, muestreo realizado del 27 al 31 de marzo del 2017, donde se registraron las concentraciones máximas en todo el muestreo.

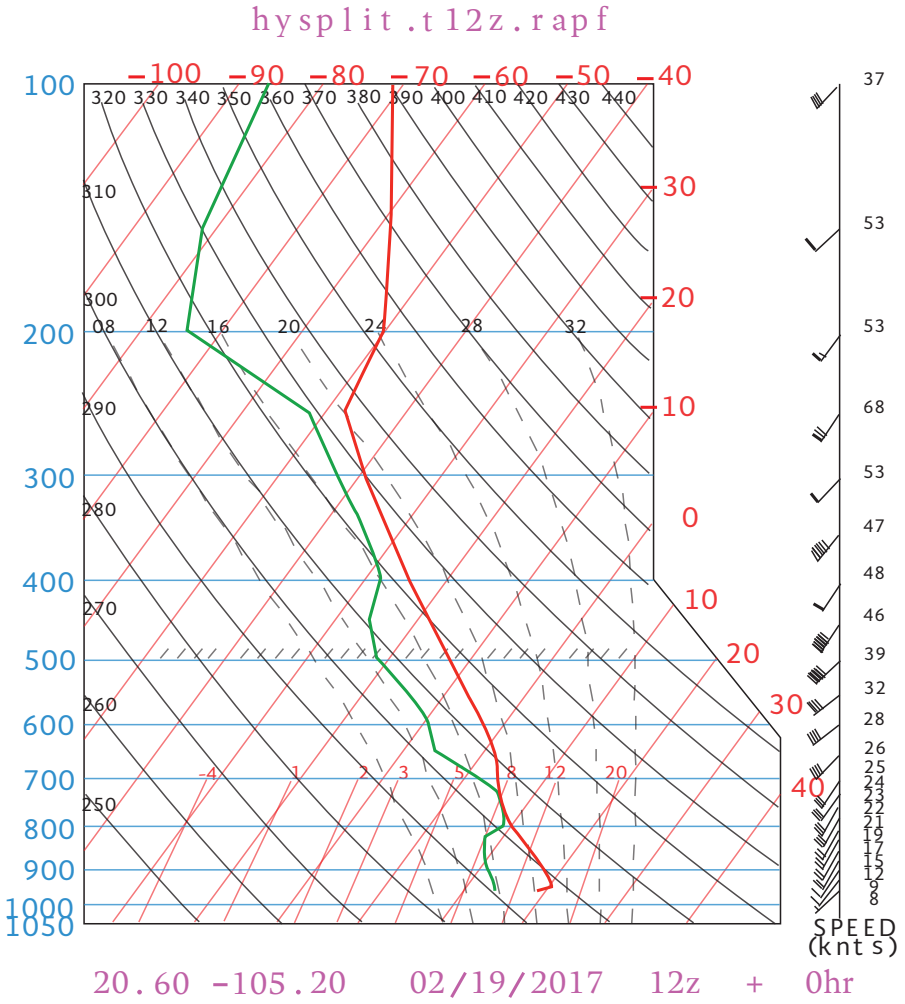
9.8. 19 de febrero punto Ixtapa

En el mapa se puede observar que la zona estaba bajo influencia de un Sistema de baja presión asociado a un Sistema frontal en fase de disipación, que avanza lentamente al sureste (Gráfica 9.6).



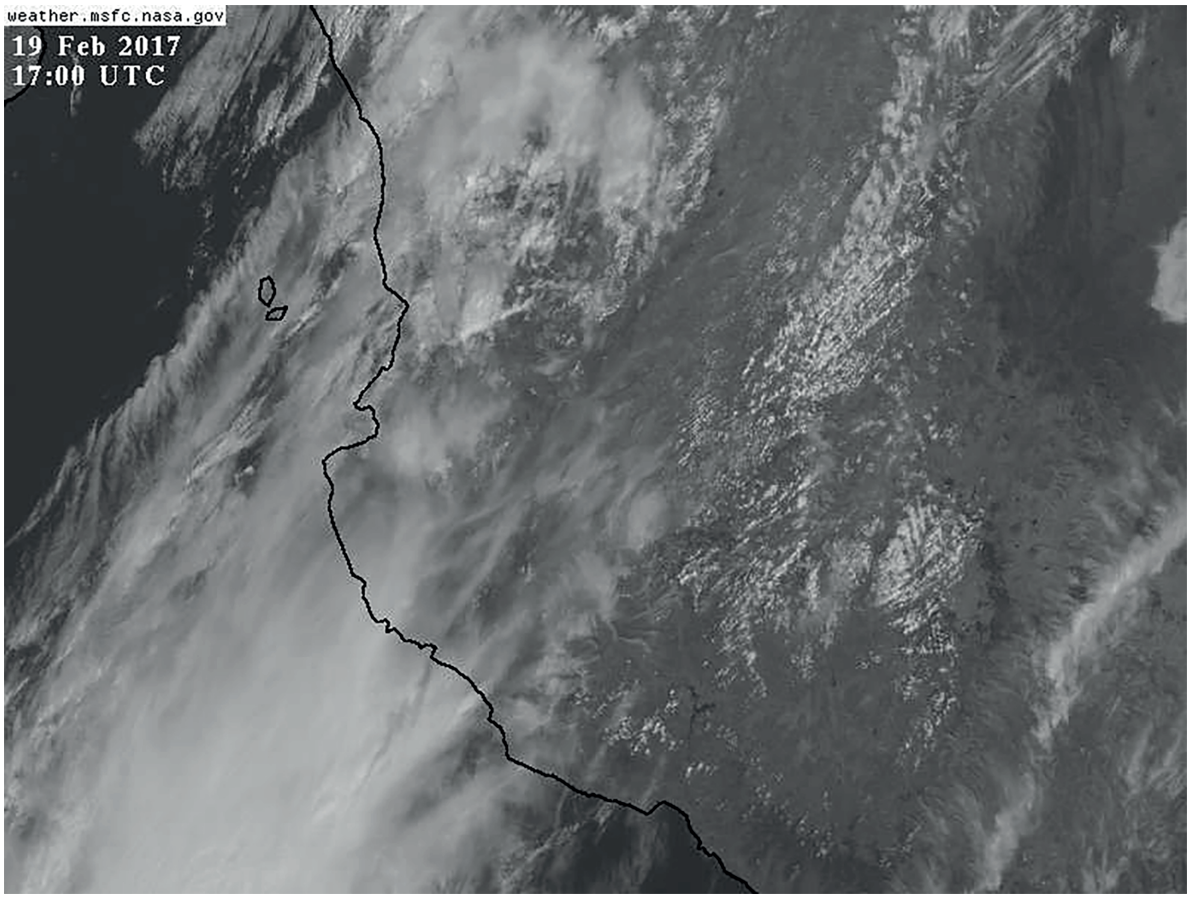
Gráfica 9.6. Mapa de superficie de los sistemas atmosféricos presentes en la región de estudio. Fuente: Centro Nacional de Huracanes (NHC), Análisis y Pronósticos Marinos (2017)

En el termodiagrama, se observa una inversión térmica superficial, no muy intensa, pero de poco espesor, sin embargo, también se muestran altos niveles de humedad en la vertical, pero con vientos relevantes de componente suroeste, principalmente en niveles medios y altos que favorece un arrastre de nubes desde esa dirección con lluvias ligeras al paso de nubes densas, situación que favorece el obligado descenso de partículas hacia la superficie por parte de la lluvia (Gráfica 9.7).



Gráfica 9.7. Sondeo por satélite (19/02/2017-12:00 UTC).
Fuente: Air Resources Laboratory (2017)

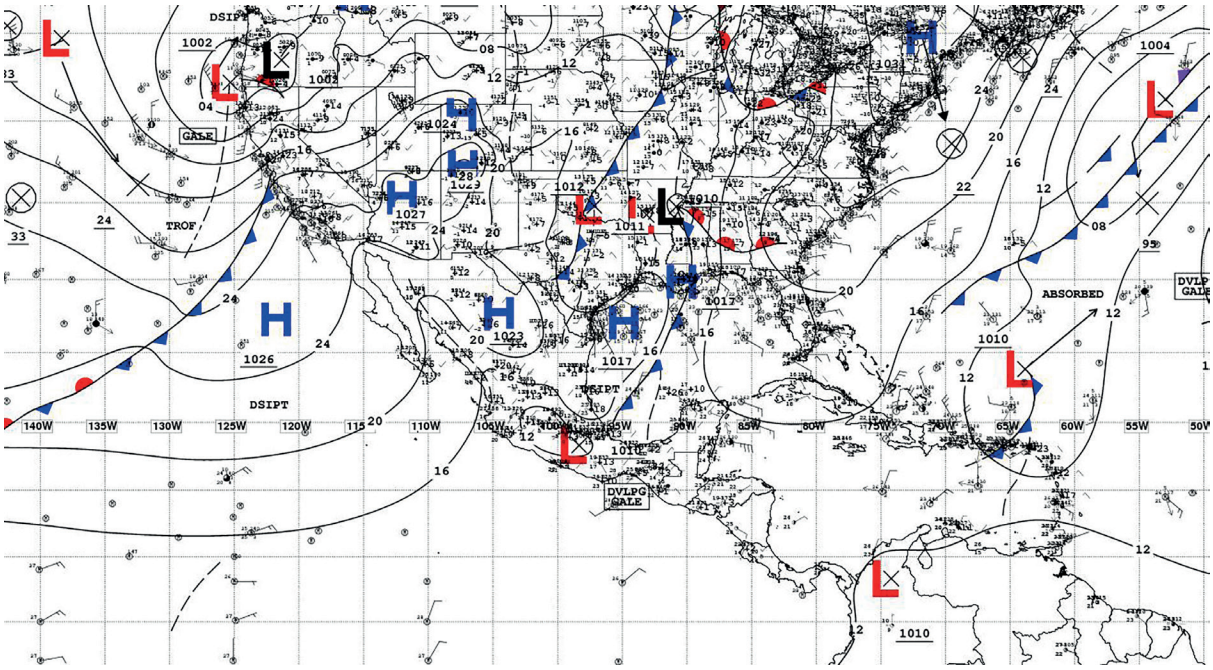
De acuerdo con la imagen visible, la zona frontal asociada a los altos niveles de humedad que se encuentra sobre el occidente propicia la poca cantidad de partículas suspendidas en el aire (Gráfica 9.8).



Gráfica 9.8. Imagen Satelital de vapor (19/02/2017-12:00 UTC).
Fuente: Marshall Space Flight Center (MSFC) (2017).

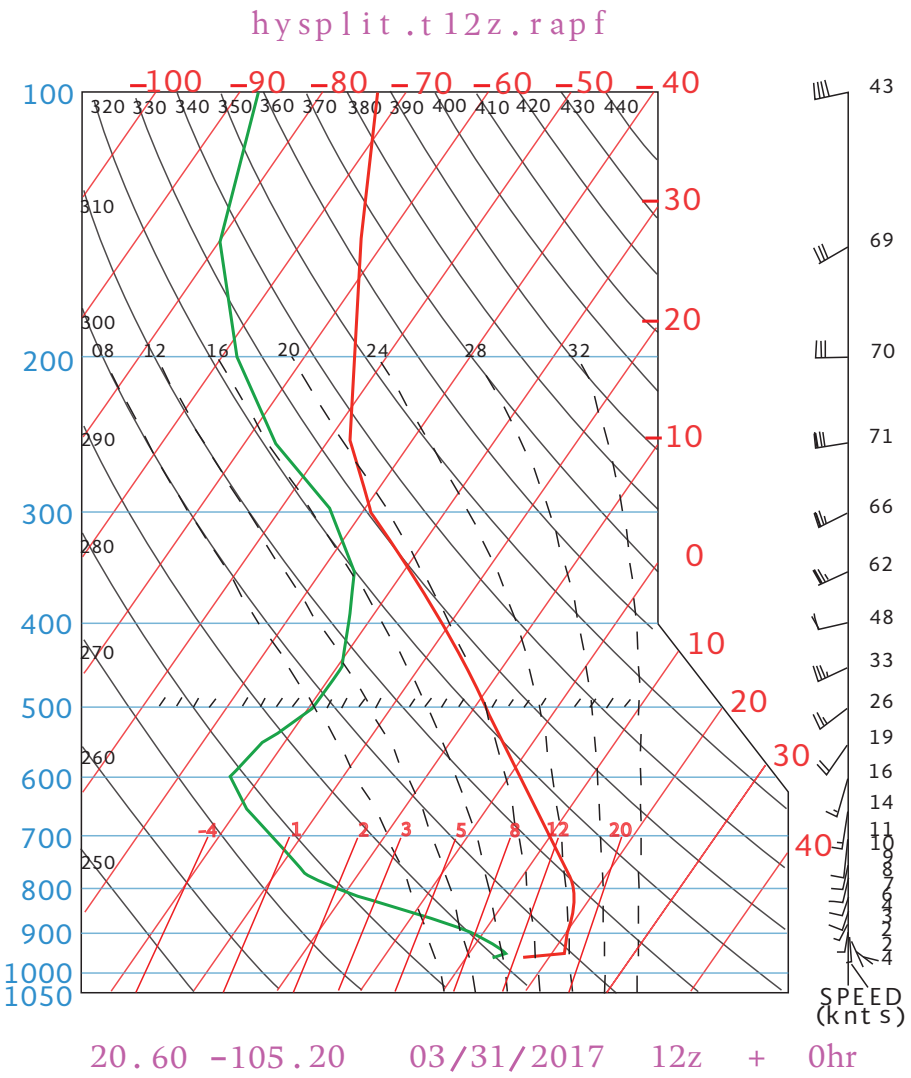
9.9. 31 de marzo punto Aurora

De acuerdo con el mapa de análisis sinóptico se puede observar fuerte sistema de alta presión, en niveles bajos o en superficie, uno con centro en el Pacífico y otro en el Atlántico, con movimiento anticiclón y presencia de movimientos subsidentes, lo que trae cielos despejados (Figura 9).



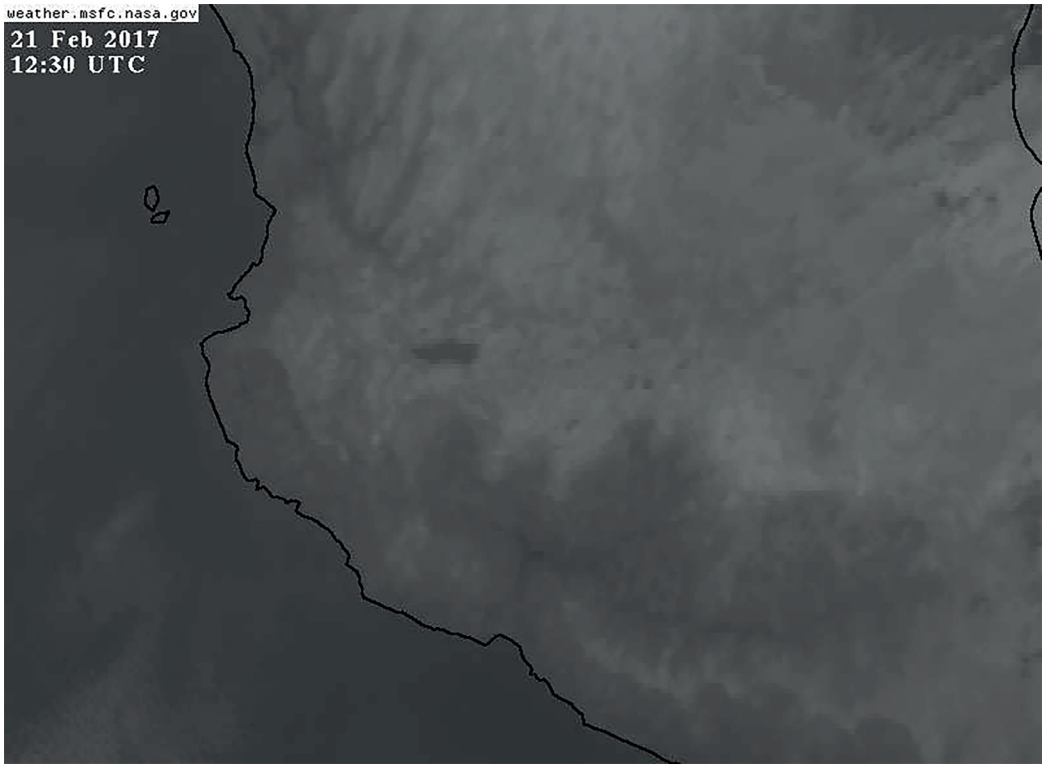
Gráfica 9.9. Mapa de superficie de los sistemas atmosféricos presentes en la región de estudio. Fuente: Centro Nacional de Huracanes (NHC), Análisis y Pronósticos Marinos (2017)

En el termodiagrama se aprecia que en la zona de Puerto Vallarta se registra una inversión térmica algo intensa, de poco espesor y de amplia duración matutina. El viento presenta en las verticales características anticiclónicas y la humedad en niveles bajos y medios presenta cierta resequedad lo que favorece cielos claros con fuerte radiación solar, toda esta situación favorece la concentración de partículas suspendidas (Gráfica 9.10).



Gráfica 9.10. Sondeo por satélite (31/03/2017-12:00 UTC).
Fuente: Air Resources Laboratory (2017)

De acuerdo con la imagen visible, se observa en todo el espesor condiciones totalmente secas. El conjunto de condiciones anticiclónicas favorece movimientos de subsidencias que propician que las partículas suspendidas se concentren en superficie (Gráfica 9.11).



Gráfica 9.11. Imagen Satelital de vapor (31/03/2017-12:00 UTC).
Fuente: Marshall Space Flight Center (MSFC) (2017)

9.10. Conclusiones

Las consecuencias relacionadas con la presencia de altos niveles de material particulado en la atmósfera están directamente relacionadas con enfermedades cardiorrespiratorias en el hombre, deterioro de materias y otros efectos, por tal motivo es notorio resaltar la importancia del comportamiento de la atmósfera en el material particulado, con el objetivo de predecir los riesgos e impactos a los que el hombre se encuentra expuesto y de esta manera desarrollar medidas de control para mejorar la gestión pública ambiental y con ello mejorar la calidad del aire.

De acuerdo con la evaluación de la concentración de material particulado PM10 en la zona urbana de Puerto Vallarta se concluye:

La concentración de material particulado medido en los ocho puntos, únicamente en el punto Ixtapa se encontraron valores satisfactorios, los otros siete puntos restantes,

están dentro de una calificación mala y muy mala, es decir, la calidad del aire se considera no satisfactoria, y la contaminación del aire representa un riesgo.

El muestreo fue realizado en época de secas, por lo que las condiciones meteorológicas en cada uno de los puntos de muestreo fueron similares, a excepción del Punto Ixtapa, donde se observó un sistema de baja presión que ocasionó lluvias, esto provocó la limpieza de la atmósfera quedando los contaminantes en el suelo, por lo tanto, bajas concentraciones de PM10. En los puntos restantes en su mayoría se presentaron altas presiones ocasionando a su vez inversiones térmica y altas concentraciones de PM10 en la atmósfera.

Finalmente, se puede afirmar que existe un amplio consenso en aceptar los efectos nocivos de la contaminación ambiental. Sin embargo, este consenso no es tan amplio a la hora de establecer, entre otras cuestiones, qué niveles pueden ser considerados como seguros para el conjunto de la población, cuáles son los posibles efectos crónicos de la contaminación, qué compuestos tóxicos son los responsables del daño en salud, así como los mecanismos fisiológicos de desencadenamiento del efecto. Todas ellas están siendo planteadas en el ámbito de diferentes proyectos de investigación, en especial proyectos interdisciplinarios.

9.11. Recomendaciones

El muestreo fue realizado únicamente una semana, de lunes a viernes, durante tres horas por día en cada uno de los puntos, se observó que los promedios de PM10 han superado la norma de calidad de aire en varias ocasiones**,** atento a los efectos que sobre la salud señala la OMS, sería recomendable establecer el monitoreo diario a 24 horas y a más días de la semana, esto para observar la variación de los contaminantes por mes, y por tanto en cada una de las estaciones del año.

La zona conurbada de Puerto Vallarta, como una de las ciudades turísticas importantes de México, no cuenta con suficientes resultados de proyectos de investigación, que informen el estado en que se encuentran los niveles de contaminación atmosfé-

rica, con ello se dificulta la implementación de medidas de atención que respondan a una condición adecuadamente caracterizada.

9.12. Agradecimientos

Se agradece a las REDESClim del CONACYT por el apoyo para la elaboración de este artículo en colaboración multidisciplinar, así como también al PROMEP por el apoyo financiero para la elaboración de este proyecto y a la Universidad de Guadalajara por todas las facilidades para realizar esta investigación.

9.13. Referencias

Air Resources Laboratory (2017). Current & Forecast and Meteorology. Recuperado de: https://ready.arl.noaa.gov/READYcmet.php. Última fecha de consulta: marzo del 2017.

Análisis y Pronósticos Marítimos (2017). Disponible en: https://meteorologia.semar.gob.mx/

Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A. y Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. Revista Española de Salud Pública, 73(2): 123-132.

García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., Arias, S. y Pérez, A. (2012). Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la zona Metropolitana de Guadalajara (México). Investigaciones Geográficas, (58): 9-29.

Marshall Space Flight Center (MSFC) (2017). Interactive Global Geostationary Weather Satellite Images. Recuperado de: https://weather.msfc.nasa.gov/GOES/. Última fecha de consulta: marzo del 2017.

Martínez, P. S. (2005). Caracterización de la contaminación atmosférica producidas por partículas en suspensión en Madrid. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica. Universidad Complutense de Madrid, Madrid. 272 p.

Meza, L. M., Quintero, M., García, R. y Ramírez, J. (2010). Estimación de factores de emisión de PM10 y PM2.5, en vías urbanas en Mexicali, Baja California, México. Información Tecnológica, 21(4): 45-56.

Morales, H. J. C., Carrillo, G. F. M., Cornejo, López V. M. y Téllez, L. J. (2010). Análisis del campo de viento en Puerto Vallarta, Jalisco, México. Avances sobre Investigaciones Marinas y Acuícolas del Pacífico Tropical Mexicano, 2: 11–18.

National Hurricane Center (NHC). (2017). Tropical Surface Analysis & NWS Unified Surface Analysis. Recuperado de: http://www.nhc.noaa.gov/marine. Fecha de consulta Octubre, 2017.

OMS (Organización Mundial de la Salud). (2002). The world healt report, Recuperado de http://www.who.int/whr/2002/chapter4/en/index7.html. Consultado el 13 de febrero de 2017.

OMS (Organización Mundial de la Salud). (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización 2005. Recuperado de http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf. Consultado el 29 de enero de 2017.

Pérez-Vidal, H., Lunagómez-Rocha, M., y Acosta-Pérez, L. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. Universidad y Ciencia, 26(2): 151-162.

Reina, J., y Olaya, J. (2013). Ajuste de curvas mediante métodos no paramétricos para estudiar el comportamiento de contaminación del aire por material particulado PM10. Revista EIA, 9(18): 19-31.

Sistema de Monitoreo Atmosferico de la Ciudad de Mexico (2011). Imeca. Recuperado de: http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/index.php?opcion=2&opcioninfoproductos=22. Consultado en octubre de 2017.

Suárez, V. D. y Pérez, C. P. (2006). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. Acta Nova, 3(2): 308-322.

Vera, J. D. J., González, R. I., Díaz, G. A., Álvarez, G. E. M., Ávila, R. C. M., Zamora R. López. G. M. (2014). Código de medio ambiente. Tecnos (Grupo Anaya, S. A.). 1ra edición. Madrid España. 1179 p.

World Health Organization. (2016).Ambient Air Pollution Database, WHO, May 2016.Recuperado de www.who.int/quantifying_ehimpacts/.../AAP_PM_database_May2014.xl. Consultado el 30 de enero de 2017.

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PARTÍCULAS PM10 EN LA ZONA URBANA DE PUERTO VALLARTA, JALISCO, Y SU RELACIÓN CON LOS FENÓMENOS ATMOSFÉRICOS

10

Vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales el caso de dos ciudades del estado de Yucatán

Marcelino García Benítez[1]*; Salvador Adame Martínez[2*]; Roberto A. Sánchez Rodríguez[3]

10.1. Resumen

Los asentamientos humanos ubicados en corredores con trayectorias de tránsito ciclónico presentan una alta probabilidad de ser vulnerables ante estos, en parte por las condiciones en el estado medioambiental que produce su acercamiento a los centros urbanos; lo que aumenta la propensión de daños generados por sus efectos en la economía e infraestructura local. Son eventos cada vez más intensos, pero menos constantes ante las secuelas que genera el cambio climático, su alertamiento ha influido en el conocimiento de sus impactos por las perturbaciones que causa a las actividades económicas entre las poblaciones de la península de Yucatán.

A pesar que los procesos de desarrollo urbano de las ciudades del estado de Yucatán presentan distintos factores de condiciones de habitabilidad, son los procesos socioambientales y demográficos internos los que influyen en la distribución espacial del grado de vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación) que presentan las secciones electorales de las ciudades de Progreso de Castro y Motul de Carrillo Puerto. Son dos ciudades de importancia por su estructura poblacional en el

1 Dr. en Urbanismo. . E-mail: geomagabe@gmail.com.
2 Profesor-investigador. E-mail: sadamem@uaemex.mx.
3 Profesor-investigador. Departamento de Estudios Urbanos y Medio Ambiente. DEUMA-EL COLEF. Correo electrónico. robsan@colef.mx. Carretera Escénica Tijuana-Ensenada Sn, San Antonio del Mar, 22560 Tijuana, B.C.
* Facultad de Planeación Urbana y Regional. FAPUR-UAEM. Calle Mariano Matamoros s/n casi esquina Paseo Tollocan, Toluca. Estado de México. C.P. 50130.

sistema urbano estatal, localizadas en dos entornos naturales distintos, la primera es una ciudad costera y la segunda, una ciudad al interior, aproximadamente a 40 kilómetros de distancia de la franja costera, pero ambas dentro del corredor ciclónico de la península de Yucatán.

El presente trabajo de investigación abordó la vulnerabilidad intraurbana a nivel de secciones electorales de dos ciudades del estado de Yucatán, ubicadas dentro de la zona de tránsito ciclónico. Se describe y evalúa la vulnerabilidad propiciada por los procesos de urbanización que han generado el riesgo interno del asentamiento urbano. Para evaluar la vulnerabilidad se construyeron indicadores a través de subíndices de cambio climático (exposición, sensibilidad y la capacidad de adaptación, con lo cual se permiten obtener el índice de Vulnerabilidad Urbana por Ciclones Tropicales (IVUCT) a nivel de cada una de las secciones electorales.

Los resultados muestran que cada ciudad, aunque se encuentren dentro del corredor ciclónico, presentan secciones electorales con grados de vulnerabilidad uniformes, a pesar de que se localizan en un entorno medioambiental similar. Las dimensiones de la vulnerabilidad pueden generar áreas similares en exposición, pero el grado de sensibilidad está determinada por las dimensiones sociales y económicas, mientras que el grado de capacidad adaptativa disminuye en la caracterización de la infraestructura, ya que depende de las condiciones institucionales y civiles que intervienen en respuesta ante la vulnerabilidad local.

Aunque la interrelacion de los resultados obtenidos en el IVUCT con los escenarios de cambio climático definen las condiciones de temperatura, humedad y lluvia invernal en los próximos 15 años, por lo que se establece la propensión de los ciclones tropicales por las condiciones medio ambientales y su probabilidad de acercamiento a las ciudades ubicadas en la zona de tránsito ciclónico del estado de Yucatán.

Palabras claves: vulnerabilidad urbana, ciclones tropicales, secciones electorales, Progreso de Castro y Motul de Carrillo Puerto.

10.2. Introducción

Los procesos de urbanización de las ciudades mexicanas se asemejan a las Latinoamericanas, por su crecimiento acelerado de las ciudades más grandes del país. Durante décadas los nuevos espacios incorporados en las periferias de los centros urbanos eran ocupados por sus habitantes con los servicios de infraestructura mínima y en algunos casos sin ningún tipo (Álvarez, 2011, p. 118). Este desfase de cobertura de servicios e infraestructura genera que el proceso de urbanización presente algún tipo de riesgo y vulnerabilidad ante la presencia de distintos tipos de peligros o amenazas.

El proceso de urbanización carece de formas de administración debido a las presiones de la población y a los constantes cambios de uso de suelo, sobre todo en la periferia de las ciudades. Durante el proceso de urbanización, no se considera la capacidad de uso del suelo, lo que propicia conflictos de uso y por ende un desequilibrio ecológico local. La ciudad es el espacio construido donde los habitantes han modificado elementos ambientales como el suelo y vegetación para habitarlo, precede de un origen físico como el paisaje que ha permitido la construcción de la traza urbana y el desarrollo de una red de infraestructura.

El riesgo por fenómenos hidrometeorológicos y climáticos continúa siendo un serio problema para el sistema socioambiental de las ciudades, el cual debe ser atendido para disminuir la probabilidad de afectación a la población y a la infraestructura, entre otros.

Por otra parte, el estudio de la vulnerabilidad presenta un proceso teórico-conceptual cambiante desde distintos enfoques. Pese a ello se ha buscado que la vulnerabilidad sea más operativa con la finalidad de disminuir los daños causados por el incremento de ciclones tropicales, su frecuencia e intensidad, lo que expone al riesgo a los asentamientos humanos.

Otro aspecto a considerar es que la variabilidad climática ha incidido en el aumento del nivel del mar sobre la línea de costa y en la vulnerabilidad de los centros urbanos ubicados sobre ella. Existe la posibilidad de afectaciones hasta 40 ó 50 km hacia el interior, tierra adentro, en las planicies o en regiones carentes de sistemas monta-

ñosos que puedan coadyuvar al debilitamiento de los fenómenos ciclónicos (Gay, 2000).

La falta de estudios específicos sobre ciclones tropicales impacta en la capacidad de adaptación y aplicación de estrategias eficientes para la disminución de daños causados a las sociedades expuestas., sobre todo cuando los ciclones se intensifican o cambian sus condiciones físicas. Cuando esto sucede se categorizan en función de estos atributos y se denominan según la velocidad de los vientos y humedad. Las trayectorias de los huracanes se han desarrollado desde el Océano Atlántico y las probabilidades de afectación a la sociedad y a la infraestructura aumentan en la medida que se acercan hacia la península de Yucatán (García, Adame y Alvarado, 2017).

Este trabajo de investigación proporciona un aporte conceptual sobre vulnerabilidad, producto de los ciclones tropicales, con un enfoque de cambio climático y a escala de secciones electorales. Esta vulnerabilidad se evalúa mediante la construcción de indicadores agrupados en las dimensiones propuestas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. Los resultados obtenidos son estandarizados y ponderados para obtener el Índice de Vulnerabilidad Urbana por Ciclones Tropicales (IVUCT), el cual es aplicado en dos casos empíricos: la ciudad de Progreso de Castro y Motul de Carrillo Puerto, Yucatán.

Se espera que las ciudades estudiadas presenten grados altos de exposición en las secciones electorales ubicadas a menos de 10 kilómetros del centro de las trayectorias de los ciclones tropicales. La vulnerabilidad por sensibilidad aumentará en la medida que la población vulnerable cuente con menores capacidades sociales para asimilar los efectos en sus bienes personales. Por lo tanto, la capacidad de adaptación mantendrá una vulnerabilidad baja en la medida que los daños ocasionados al patrimonio de la población no se vea afectada o solo sea de carácter temporal, lo que coadyuvará en disminuir el tiempo de recuperación ante los efectos de los ciclones.

Para los próximos años se espera que las condiciones ambientales influyan en la formación de ciclones con una trayectoria cercana a las ciudades, pero esto dependerá de la humedad, lluvia invernal y temperatura que se acumule en la superficie.

10.3. Vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales

Vulnerabilidad es un término surgido, desde una visión generada por el estrés, que causa una amenaza al territorio, consecuencia del riesgo que implica el entorno global, pero al mismo tiempo es consecuencia del mal uso y manejo de los recursos naturales y el medio ambiente. Al procesar las materias primas de forma industrial, se generan cambios físico-biológicos en el ambiente, aumentando el flujo de energía la cual no se regula y se almacena en la atmósfera alterando su composición y su ciclo natural en el entorno geográfico. La vulnerabilidad relacionada con el cambio climático es propiciada de manera negativa por el uso intensivo de los recursos disponibles en la naturaleza, por lo que las condiciones sociales que presentan los grupos de individuos menos favorecidos merman su capacidad de reaccionar ante los procesos climáticos (Lampis, 2013).

La definición de vulnerabilidad urbana en los procesos conceptuales se relaciona, en muchas ocasiones, con las investigaciones realizadas en torno al proceso analítico de riesgo-vulnerabilidad y desastre, por lo que las formas de evolución e interpretación conceptual dependerán de cada una de las diferentes disciplinas.

De esta manera la vulnerabilidad urbana a cambio climático presenta características más enfocadas a determinar los procesos técnicos y metodológicos, en los cuales la población está imposibilitada a resistir los efectos naturales de los eventos climáticos extremos, considera la susceptibilidad, magnitud y capacidad de adaptación a los cambios extremos presentados en el ambiente (UnHabitat, 2004). Además, se puntualiza que es la posibilidad de ser dañado, como el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos de una o varias amenazas o problemas, surge ante la presencia de eventos cada vez más extremos se espera que se intensifiquen en zonas urbanas que presenta un grado de aridez a desertificación producto de la variabilidad climática regional (Romero y Hua, 2011).

Por otra parte, para definir qué es un ciclón tropical, se parte de la noción conceptual para denominarlo; ¿Ciclón tropical o Huracán? La ubicación geográfica donde será uti-

lizado el término es muy importante, ya que existe sinónimos para referir el mismo evento en diversas regiones del mundo. Existen diferentes fuentes para definir a los ciclones tropicales, en este trabajo se considera la definición que señala a los huracanes, se debe partir del significado de ciclón tropical a la cual se clasifica de acuerdo con la presión atmosférica que existe en su centro o la velocidad de sus vientos (Rosengaus y otros, 2002). Sin embargo, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) describe a un ciclón tropical como un sistema frontal de escala sinóptica, de núcleo caliente, que se origina sobre aguas tropicales o subtropicales, dotado de convección profunda organizada y circulación cerrada de los vientos de superficie alrededor de un centro bien definido, se clasifica según su intensidad (OMM, 2005, p. 12).

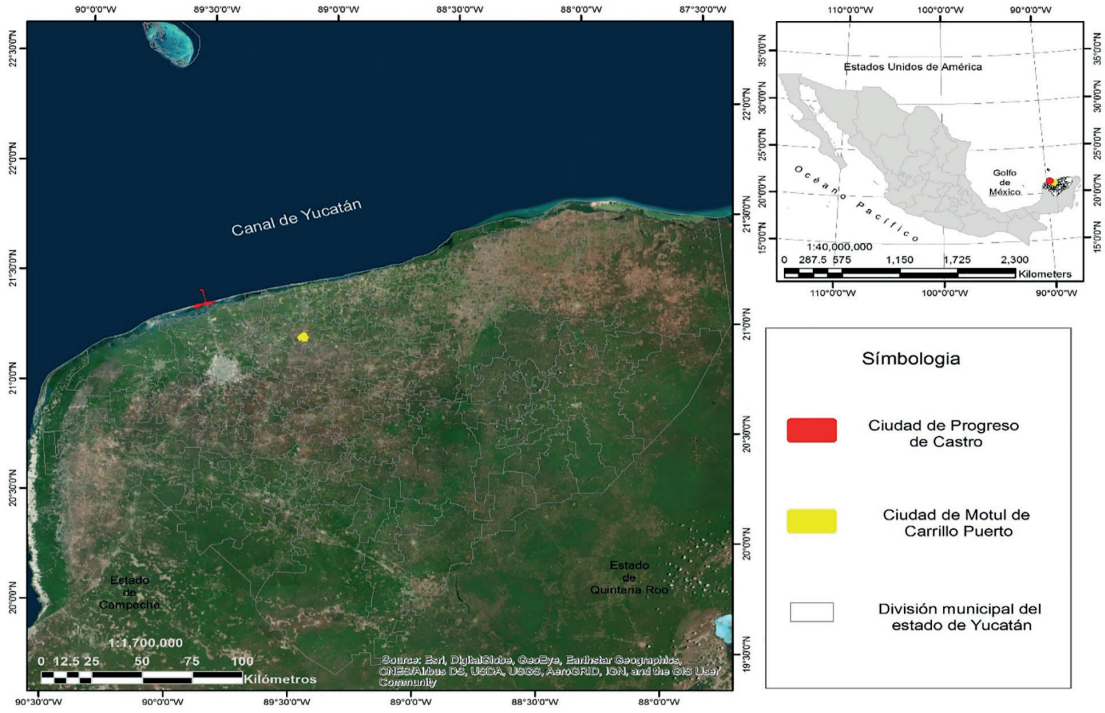
La categoría de un ciclón tropical la establece la escala Saffir-Simpson, que mide la intensidad de los vientos en superficie, nivel de destrucción y su probabilidad de daños generados a la infraestructura básica, según su trayectoria en la superficie terrestre. Cada evento ciclónico que se desarrolla en cualquier región en el mundo presenta condiciones de atmosféricas distintas, es lento o de rápido desarrollo que incide en la velocidad de los vientos con la que se desplaza; acumulación de humedad en los sistemas de espiral que se forma por la inestabilidad de las corrientes convectivas y su amplitud o tamaño que abarca en la atmósfera.

La vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales en las ciudades es definida como *el grado en que las personas, grupos o comunidades en una sección de la ciudad, enfrentan los efectos del viento y precipitación de la trayectoria que se presenta en el territorio, los cuales ocasionan otros efectos como inundaciones o marejadas a consecuencia de la categorización de fenómeno, según las carencias en su capacidad de resistir, prever y adaptarse a los impactos en sus bienes personales, materiales e infraestructura que son afectados de forma parcial o temporal*. La forma de conciliar los distintos aportes realizados para el estudio del riesgo y la vulnerabilidad es mediante la integración de un marco conceptual y metodológico operativo que contribuya a la integración de las dimensiones, las cuales son evaluadas a través de indicadores y que permiten describir los grados de vulnerabilidad de cada sección electoral aplicado a los casos empíricos.

10.4. Materiales y métodos

La ciudad de Motul de Carrillo Puerto se localiza en el centro-este de Yucatán a 40 kilómetros de la costa y a 38 kilómetros de la ciudad de Mérida, es una ciudad intermedia que conecta a la capital con el oriente del estado (ver Gráfica 10.1). Desde el punto de vista histórico, su origen es muy antiguo aproximadamente de 1,100 D.C, y fue fundada por un sacerdote maya Zac Motul y sirvió para la colonización del norte de la península (Quezada, 2001).

La ciudad de Progreso de Castro se ubica dentro del municipio de Progreso, sobre la costa central del estado de Yucatán, a 36 kilómetros de la ciudad de Mérida (ver Gráfica 10.1), el proceso de fundación fue favorecido por la necesidad que presentaba la economía de la región a finales del siglo XVIII para la construcción del puerto, esto permitió la salida de mercancías producidas en la región, situación que favoreció el establecimiento de la ciudad como destino económico y social en la actualidad (Quezada y Frías, 2006) .



Gráfica 10.1. Localización de las ciudades
Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2010.

Con lo que respecta al paisaje Kárstico de Yucatán, este incide en la carencia de una barrera natural que ayude a obstaculizar el tránsito de fenómenos regionales como los ciclones tropicales. Sin embargo, el conjuntar el vínculo ambiental con el atmosférico y oceánico, inciden en la biodiversidad de plantas y animales endémicos o aquellos que son capaces de adaptarse a estas condiciones de humedad, alta temperatura y en ocasiones de alta salinidad por la escasa profundidad de la roca madre, así como la falta de suelo orgánico (Meyer, 1999).

Por su parte, las secciones electorales son unidades geoestadísticas con las cuales se pueden realizar estudios interurbanos, son utilizadas para agrupar áreas electorales las cuales están determinadas por el número de población votante que según la ley electoral vigente es de 750 a 1500 personas (INEGI y IFE, 2010). Estas secciones presentan una ventaja, la información sociodemográfica está determinada por la población que habita en estas áreas geográficas, por lo que el control de la información presenta una mejor oportunidad de realizar estudios a escala local, sobre todo cuando se trata de describir la situación intraurbana de la población dentro de una ciudad (Cadena y Campos, 2012). Para describir a las secciones electorales que se ubican hacia el interior de las ciudades de Motul y Progreso se hizo una zonificación, para analizar de una forma más ordena la distribución de los grados de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación (ver Cuadro 10.1).

Cuadro 10.1. Zonificación de las secciones electorales por ciudades

Ciudad	Clave de las secciones	Zona dentro de la ciudad
Motul de Carrillo Puerto	3152661	Noroeste
	3152662	Noreste
	3152663, 3152664, 3152666, 3152667	Centro
	3152668	Sureste
	3152665, 3152669, 3152670	Suroeste
Progreso de Castro	3159739 a 3159741	Oeste
	3159742 a 3159746	Norte
	3159747,3159748, 3159753	Este
	3159754 a 3159758 y 3159763	Sur

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI-IFE, 2010.

Existe una carencia de trabajos sobre la aplicación de metodologías en el análisis de la vulnerabilidad por eventos extremos en los centros urbanos, principalmente en aquellos que presentan altos niveles de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación por su ubicación geográfica, pero además por la concentración de la población urbana en ciudades, se estima sea alrededor del 75 por ciento para 2030 en el mundo (UNHabitat, 2004).

Los estudios de vulnerabilidad urbana revisados en la literatura se basan en evaluar los distintos tipos de vulnerabilidad (física, social, económico, cultural y política); pero aún no los aspectos urbanos e infraestructura. Los indicios sobre la manera de medir este tipo de vulnerabilidad, establece sus bases en la vulnerabilidad global, en la cual se agregan otros factores más específicos como los ambientales-ecológicos, sociales, económicos, políticos, pero no los urbanos e infraestructura, este último limita el desarrollo de las ciudades, con sus características internas propias que las hacen estar expuestas por su tamaño y crecimiento de su población.

En la generación de indicadores de vulnerabilidad al cambio climático es importante seleccionar una cantidad relativamente menor, y además deben reflejar la historia, el desarrollo y las proyecciones del fenómeno a analizar. Entre mayor número de indicadores se escoja, mayor la incertidumbre, por lo que se puede priorizar al momento de ponderar las variables; el índice de vulnerabilidad contempla los factores físico, social y económico.

La literatura prevé dos vertientes para la aplicación de métodos por indicadores: primero se asume que todos los indicadores tienen la misma importancia durante el cálculo; el segundo, asigna diferentes pesos para evitar la incertidumbre que significa la misma valoración y por lo complejo que resulta el manejo de diferentes escalas o medida dada la diversidad de los indicadores aplicados. Sobre este último, se conocen diferentes formas como el juicio de expertos desarrollado sobre análisis de componentes principales, correlación con eventos pasados (Brooks y otros, 2005) y lógica difusa (Eakin y Bojórquez, 2008; citado por Monterroso, 2012, p. 23,24).

a) Subíndice exposición

El componente externo de la vulnerabilidad se refiere a la exposición y riesgo a un determinado fenómeno o estresor (Monterroso, 2012). Para incrementar el conocimiento de la causalidad de los ciclones en las ciudades existen distintas maneras para evaluar la dimensión externa de la vulnerabilidad, una posible es hacerlo mediante indicadores biofísicos, aunque la aplicación está limitada por la subjetividad en la selección de sus variables, la asignación de ponderación y peso, así como la disponibilidad de información dificulta probar o validar los resultados, así lo señala (Luers y otros, 2003).

Las evaluaciones mediante indicadores biofísicos están enfocadas en los impactos físicos inducidos por los eventos extremos y los cambios futuros sobre variables climáticas como lo señala Füssel y Klein, (2006). De esta manera determina en parte el potencial con que se presentan los eventos, aunque estos no están determinados por sí mismo, son por las condiciones ambientales susceptibles a su trayectoria. Para definir la vulnerabilidad por exposición de las ciudades se considera cinco indicadores, estos están relacionados con las variables determinadas por la causalidad de los fenómenos ciclónicos, a saber:

I. *Ciclones tropicales (E1).* Se considera el número de eventos ciclónicos que presentaron una trayectoria 1 a 10 km de distancia entre la cantidad de eventos ciclónicos registrados con una trayectoria entre 1-200 km.
II. *Precipitación extrema diaria (E2).* Precipitación extrema diaria promedio entre la precipitación promedio mensual.
III. *Precipitación total acumulada (E3).* Precipitación total acumulada promedio entre precipitación total mensual.
IV. *Viento (E4).* Velocidad del viento promedio mensual entre velocidad del viento promedio anual.
V. *Urbanización (E5).* Superficie urbanizada entre superficie total.

b) Subíndice sensibilidad

La sensibilidad es la habilidad con la que cuenta el sistema ambiental para enfrentar un estrés o perturbación, se hace referencia al nivel en que un sistema es afectado,

o su capacidad de respuesta a un estímulo generado por un evento climático (Smit, Burton, Klein, y Wandel, 2009).

El análisis de este componente en el estudio de la vulnerabilidad urbana intenta vincular directamente los escenarios futuros del cambio climático con sus posibles efectos o impactos sobre las dimensiones socioeconómicas y urbana e infraestructura (Downing y Patwardham, 2006). Busca comprender el proceso mediante el cual los escenarios futuros se traducen en riesgos o impactos sobre un determinado grupo o sistema, son un aspecto relevante que pueden identificar puntos de intervención y de opciones de respuesta (Monterroso, 2012).

Para medir la vulnerabilidad urbana para cambio climático por sensibilidad se propone la aplicación de 16 indicadores, estructurados en tres subdimensiones: nueve para medir lo social, tres lo económico y cuatro para la infraestructura. Lograr describir esta parte de la vulnerabilidad urbana a cambio climático implica que pueden ser requeridas otras más variables que reflejen el impacto físico de los ciclones en estas ciudades, sin embargo, una de las razones principales es la falta de información fiable y disponible, la cual no se logra conseguir y más cuando existe una falta de sensibilización en los servidores públicos locales por trasmitir las acciones que permitan disminuir las problemas sin importar el color del partido que administra.

VI. *Densidad urbana (S1).* Población total entre superficie total en kilómetros cuadrados. Es un indicador medidor de la conglomeración de la población en un área determinada, en este caso sección electoral.
VII. *Población vulnerable infantil (S2).* Población de 0 a 14 años entre población total por 100.
VIII. *Población vulnerable adultos mayores (S3).* Población de 65 años y más entre población total por 100.
IX. *Población vulnerable femenina (S4).* Población femenina entre población total por 100.
X. *Hogares con jefatura femenina (S5).* Número de hogares con jefatura femenina entre total de hogares por 100.

XI. *Población analfabeta (S6).* Población de 15 años y más analfabeta entre población total por 100.

XII. *Población indígena (S7).* Población indígena entre población total por 100.

XIII. *Viviendas particulares habitadas con materiales en pisos (S8).*

XIV. *Viviendas particulares habitadas con radio (S9).* Viviendas con disponibilidad de radio de comunicación entre total de viviendas habitadas por 100.

XV. *Población Económicamente Activa (S10).* Población Económicamente Activa (PEA) entre población de 15 a 64 años por 100.

XVI. *PEA según ingresos (S11).* Población ocupada que gana hasta 2 Salarios mínimos entre total de población ocupada por 100.

XVII. *Población en pobreza de patrimonio (S12).* Población con pobreza de patrimonio entre población total por 100.

XVIII. *Calles con pavimentación (S13).* Superficie pavimentada entre superficie total de la sección electoral por 100.

XIX. *Calles con fosas de absorción (Alcantarillado pluvial) (S14).* Número de fosas de absorción entre superficie total por kilómetro cuadrado de la sección electoral.

XX. *Viviendas particulares habitadas con agua potable (S15).* Viviendas con agua potable entre total de viviendas habitadas particulares por 100.

XXI. *Viviendas particulares habitadas con servicios de drenaje (S16).* Viviendas con servicio de drenaje entre total de viviendas habitadas particulares por 100.

XXII. *Viviendas particulares habitadas con servicio de energía eléctrica (S17).* Viviendas con energía eléctrica entre total de viviendas habitadas particulares por 100.

c) Subíndice capacidad de adaptación

La capacidad de un sistema es propensa a modificar sus circunstancias propias de los individuos para moverse a una condición menos vulnerable. Pueden considerarse en función de la salud, tecnología, educación, infraestructura, acceso a recursos económicos, estabilidad política y capacidad de manejo dentro de un sistema ambiental (O'Brien y otros, 2004) y (Brooks y otros, 2005; citado por Monterroso, 2012, p. 75). La

adaptación debe enfocarse a los grupos sociales de menor ingreso ya que son estos los que más padecen en el momento de que se enfrentan a un fenómeno adverso (Adger, 1999).

En la vulnerabilidad urbana la infraestructura es la parte con menos probabilidad de adaptación, las obras realizadas para disminuir la vulnerabilidad de las personas quedan rebasadas en la medida que estas no aumentan las acciones para volverse más resilientes a eventos ciclónicos. El propósito de estudiar la capacidad adaptativa de un país, región o ciudad es buscar dirigir la adaptación hacia aquellas áreas o sectores de mayor exposición o menor capacidad para adaptarse a los fenómenos ciclónicos (Smith y Wandel, 2006). Para evaluar este componente, el cual resulta más subjetivo porque las variables dependen de las características menos técnicas de las ciudades, se proponen cuatro indicadores:

XXIII. *Refugios temporales (CA1).* Número de refugios temporales entre la población total por sección electoral.

XXIV. *Organizaciones sociales (CA2).* Número de asociaciones civiles. En cada ciudad la presencia de asociaciones o grupos de voluntarios que se conforman para la atención de emergencias como los ciclones tropicales, se coordinan con las autoridades para brindar asistencia a las personas que así lo requieran.

XXV. *Planes, programas de riesgo y vulnerabilidad (CA3).* Número de planes y programas de riesgo y vulnerabilidad.

XXVI. *Número de declaratorias de desastre (CA4).* Número de declaratorias de desastre entre número de eventos ciclónicos.

XXVII. *Evidencia de daños (D1).* Incorporar datos estadísticos oficiales de informes técnicos realizados posterior a un fenómeno ciclónico es parte de las propuestas para solventar la falta de datos en el análisis del riesgo y la vulnerabilidad (Hinkel, 2011).

La capacidad adaptativa está en función de la preparación de la sociedad para disminuir los daños que genera un ciclón, pero dependerá de la capacidad individual de los habitantes para resultar menos afectados de un fenómeno a otro, sin importar la

temporalidad a la que se presenten estos en la región. Cualquier acción positiva por mínima que se asuma, el resultado será la probabilidad de no ser afectado por un ciclón sin importar la localización hacia el interior de la ciudad.

10.5. Procesamiento de los indicadores

Para la construcción del Índice de Vulnerabilidad Urbana por Ciclones Tropicales (IVUCT) a cambio climático por subíndices, el procesamiento de los indicadores que fueron construidos a través de variables métricas permitieron analizar las condiciones que propician la vulnerabilidad al interior de una ciudad, en un principio fueron consideradas el mayor número de variables en función de la disponibilidad de datos obtenidos mediante la revisión hemerográfica, censal y de informes técnicos, así como del trabajo de campo (entrevistas a la población).

Terminado de construir los indicadores, se les aplicó el método de estandarización para la unificación de las unidades entre las variables de los indicadores por dimensiones. Este proceso es utilizado para ajustar, adaptar y homologar distintas formas, estilos o mediciones que se encuentran en diferentes unidades. La aplicación del método de ponderación por método Saaty, cuyo objetivo es el de llegar a expresar, en términos cuantitativos, la importancia de los distintos elementos; si bien es frecuente al asignar pesos a criterios, la especificación de los mismos es una cuestión en la que no existe un método generalmente aceptado para su determinación.

Se trata de una técnica multidisciplinar en la cual se unifican criterios de fuentes distintas que permiten delinear el impacto de los factores, aunque las variables no se encuentren en las mismas unidades métricas. Para aplicar este proceso se aplicó la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{\pi - \mu}{\sigma}$$

Donde:

Z	=	Dato estandarizado o normalizado
π	=	Valor nominal del dato a estadarizar
μ	=	Media aritmética
σ	=	Desviación estándar

Jerarquización o ponderación, descompone las estructuras complejas en componentes unilaterales, ordenando estos componentes o variables en una estructura jerárquica y obtiene valores numéricos para generar juicios de preferencia y además sintetiza o determina las variables que tienen más alta prioridad (Cadena y Campos, 2012; Ávila, 2016). Para llevar a cabo este proceso se aplicó la siguiente ecuación:

$$1/N/ + E1/N$$

Donde:

1	=	Valor ponderado
N	=	Número de jerarquización según indicado
E1	=	Indicador a ponderar

Este proceso permite quitar la incertidumbre de los datos extremos, haciéndolos menos distantes. Por último, se aplicó la ecuación para la obtención del IVUCT por subíndices de indicadores a nivel de sección electoral, los resultados permitieron el cálculo de los subíndices exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa como lo describe el (IPCC, 2007).

$$E = \frac{E1 + E2 + E3 + E4 + E5}{5}$$

$$S = \frac{\frac{S1 + S2 + S3 - S4 + S5 + S6 + S7 + S8 + S9}{9} + \frac{S10 + S11 + S12}{3} + \frac{S13 + S14 + S15 + S16 + S17}{5}}{CA = \frac{CA1 + CA2 + CA3 + CA4}{4}}$$

Donde:

E	=	Exposición
S	=	Sensibilidad
CA	=	Capacidad de adaptación

Al integrar los subíndices mediante la aplicación de cálculos aritméticos como suma y resta, se obtiene el índice de vulnerabilidad, este método ha sido utilizado por (Eakin y Bojórquez, 2008) para el análisis multicriterio y fue retomado en esta investigación para la medición de la vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales a escala de secciones electorales. Ahumada y otros (2015), aplicaron esta misma operación para el

cálculo de la vulnerabilidad a cambio climático en el sector agrícola mexicano, construido a través de indicadores basados en áreas censales básicas.

$$IVUCT = \frac{\exp osición + sensibilidad + (-capacidad\ adaptativa)}{3}$$

La aplicación de esta fórmula genera un índice integrador de los factores causales que determinan el grado de vulnerabilidad de un lugar respecto a los elementos con los que cuentan la sociedad urbana para enfrentar una amenaza por ciclones tropicales. Para categorizar el grado de vulnerabilidad al interior de las ciudades, se aplicó el método de semaforización para la representación cartográfica de los resultados a escala de sección electoral. Es una alternativa para explicar los resultados del cálculo de este índice, además de integrar las zonas en las que se divide la ciudad, por lo que de esta manera simplifica posibles controversias generadas en la interpretación de los mismos (BID, 2010).

10.6. Escenarios de cambio climático en la península de Yucatán

Los escenarios de cambio climático son imágenes generadas para la formulación de escenarios sobre lo que podría acontecer en el futuro, constituyen un instrumento apropiado para el análisis sobre las fuerzas determinantes de las emisiones de gases de efecto invernadero y su posible evaluación del margen de incertidumbre. Es importante mencionar que no son predicciones ni pronósticos los escenarios construidos para la península de Yucatán, esto se debe a que la incertidumbre de los modelos proyectados sobre las alteraciones del clima, solo reflejan un rango posible ante las variaciones de las emisiones de GEI producto de las actividades humanas (Orellana, Espadas, Conde y Gay, 2009:3).

En la península de Yucatán el cambio climático está latente y delimitado por tres sistemas oceánicos: Golfo de México, Canal de Yucatán y Mar Caribe, origen de la presencia de los ciclones tropicales en la temporada de verano-otoño. Aunque el acer-

camiento de los ciclones a la península depende de las condiciones del estado del medio ambiente, ello permite detonar su potencialidad de daños que podrían generarse y depende de los factores como: situación demográfica, económica, social y de infraestructura de cada una de las ciudades expuestas.

Para el estudio de la vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales se describen tres tipos de escenarios construidos para la región peninsular con variables asociados a las condiciones ambientales que permiten el desarrollo de trayectorias ciclónicas: a) precipitación pluvial; b) P/T o índice de Lang,y c) lluvia invernal. Los cuales han sido calculados para la península de Yucatán y que son retomados para identificar los escenarios propuestos sobre las condiciones ambientales de humedad y temperatura que podrían presentar las ciudades de Motul de Carrillo Puerto y Progreso de Castro al año 2020.

Existen distintos tipos de escenarios construidos para la península de Yucatán, que son: 1) HADCM3A1F1 con un uso intensivo de combustibles fósiles; 2) HADCMEB11 que representa una baja emisión de CO_2 , y 3) HADCMEB21 ambiente de bajas emisiones (ver Cuadro 10.2). La elección de estos escenarios de cambio climático obedece a las condiciones más comunes que se presentan a nivel regional, por lo tanto, influyen en las condiciones ambientales que permiten la formación de los fenómenos ciclónicos en los océanos más activos del mundo.

Cuadro 10.2. Condiciones ambientales según tipo de escenario de cambio climático en las ciudades.

Ciudad	Variable	Escenario base (mm)	Escenario HADCM3A1F1	Escenario HADCMEB11	Escenario HADCMEB21
Motul de Carrillo Puerto	Precipitación total anual	900-1,000	600 - 700	600 - 700	400 - 500
	Índice de Lang	22.9 – 43.2	5 – 10.2	22.9 – 43.2	22.9 – 43.2
	Lluvia invernal	5 - 10.2	10.2 - 18	5 - 10.2	>18
Progreso de Castro	Precipitación total anual	< 600	< 500	< 500	< 300
	Índice de Lang	< 22.9	< 5	22.9 – 43.2	22.9 – 43.2
	Lluvia invernal	Zona SE. >10.2, Resto de la ciudad 5 - 10.2	Zona SE. 10.2 – 18, Resto de la ciudad 5 -10.2	5 - 10.2	>18

Fuente: Elaboración propia con base en Orellana, Espadas, Conde y Carlos Gay, (2009).

10.7. Resultados

Para atender el problema de la vulnerabilidad urbana se debe estudiar la distribución de la exposición y sensibilidad hacia el interior de las ciudades, el aporte que se presenta en este trabajo está relacionado con la forma de interrelacionar información cuantitativa, disponible en las estadísticas censales y datos cualitativos, que permite identificar qué acciones contribuyen en la prevención de daños en las personas, sus bienes personales, la protección de la infraestructura urbana y de la interrupción de las actividades económicas locales.

La vulnerabilidad en los centros urbanos está determinada por las condiciones ambientales, sociales, económicas, políticas, urbanas e infraestructuras, sí se le agrega una escala local se puede identificar las áreas más susceptibles a sufrir daños por los ciclones tropicales. Pero estas variables son aplicadas con el enfoque de cambio climático, como lo propone el IPCC, para determinar la operacionalización de la vulnerabilidad a través de los tres subíndices que complementan los enfoques previos de riesgo y gestión de riesgos como parte de la evolución conceptual, el cual es un aporte de esta investigación.

La distribución de la vulnerabilidad por ciclones tropicales está determinada en tres grados de probabilidad de afectación: alto, medio y bajo, cada uno acotado a las condiciones de fragilidad del territorio expuesto, cada subíndice presenta una distribución espacial uniforme hacia el interior de las ciudades, aunque hay cosas en común que determinan grados similares en ambas ciudades. La exposición es parte de la dimensión ambiental, incluye las condiciones probables de que los ciclones tropicales se presenten en las ciudades o cuando estos propician que sus efectos repercutan a través de la perturbación de las actividades sociales, económicas y estado urbano e infraestructura que enfrentan los habitantes anualmente.

La vulnerabilidad en Motul es alta por exposición en la zona sur, se ubica en la franja de tránsito de los ciclones, mismos que presentan trayectorias de sur a norte de la península. Además su nivel de sensibilidad es alta porque es donde se ubica la población más vulnerable a ser afectada, carente de infraestructura urbana y por ende con

menores capacidades de adaptarse ante los efectos del viento, intensas precipitaciones, principalmente.

La ciudad de Progreso está integrada por 18 secciones electorales agrupadas en cuatro zonas, la vulnerabilidad es alta en la parte norte y oeste de la ciudad por la propensión de inundación del mar hacia el manglar. Es sensible en las zonas este y oeste donde se ubican las áreas de menor densidad urbana, mayor población vulnerable y superficie urbana ganada tanto a la parte de manglar como al mar. La capacidad de adaptación es muy baja en general en la ciudad, esto se debe a la falta de actualización de esquemas que disminuyan la probabilidad de afectación de la población, que ante el alertamiento de ciclón es evacuada hacia el interior del estado (ver Cuadro 10.3).

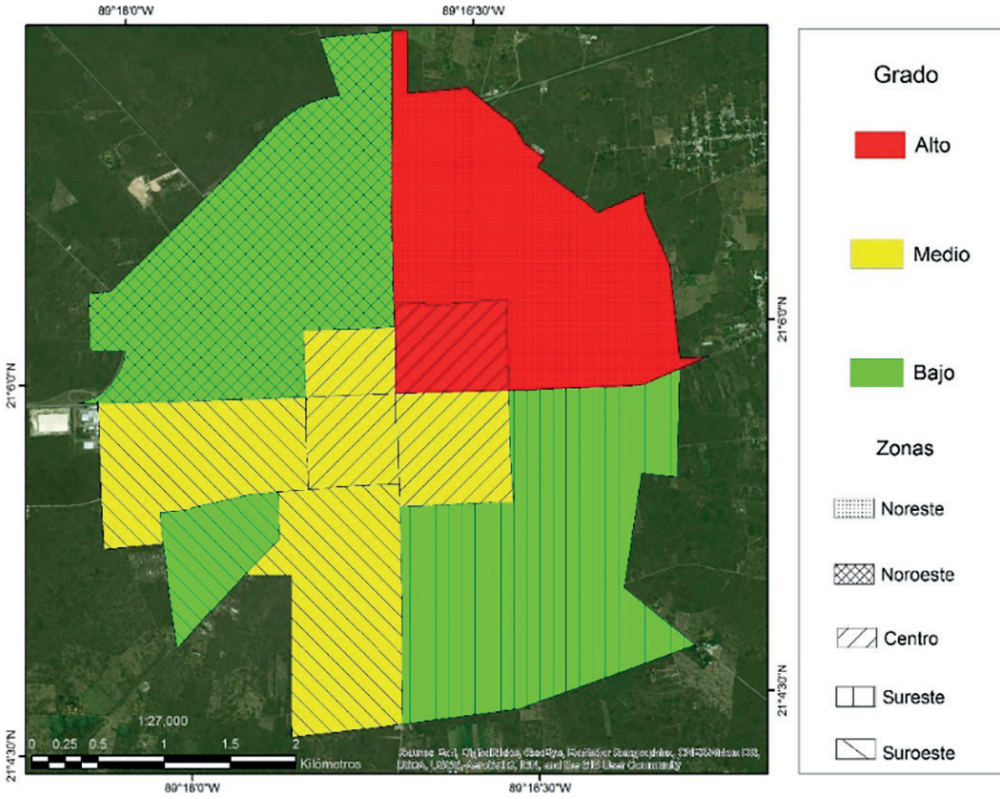
La presencia de ciclones en las ciudades ha presentado daños importantes a lo largo de la historia urbana, la cercanía de las trayectorias con los centros urbanos ha determinado la cantidad de daños que han podido generar cuando han cruzado por la península de Yucatán, aunque hay que decir, el 80 por ciento de ellos han llegado como huracanes y el resto como tormentas tropicales o categorías menores. Disminuyen la intensidad cuando entran a tierra adentro, pero siguen su trayectoria una vez que llegan al canal de Yucatán o Golfo de México. En el caso de dos huracanes en particular, Gilbert (1988) e Isidore (2002), dejaron una huella profunda, traumas psicológicos, en la población joven y adulta de ese tiempo.

Cuadro 10.3. Grados de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales por subíndices de cambio climático en las secciones electorales de las ciudades.

Ciudades	Zonas	Exposición	Sensibilidad	Capacidad de adaptación
Motul de Carrillo Puerto	Noreste	Medio	Medio	Alto
	Noroeste	Medio	Alto	Medio
	Centro	Medio-Bajo	Medio-Bajo	Medio
	Sureste	Alto	Alto	Medio
	Suroeste	Alto	Alto	Medio-Bajo
Progreso de Castro	Este	Medio-Bajo	Alto-Medio	Bajo
	Sur	Medio-Bajo	Medio-Bajo	Bajo
	Oeste	Alto-Medio	Alto-Medio	Bajo
	Norte	Alto-Medio	Medio-Bajo	Bajo

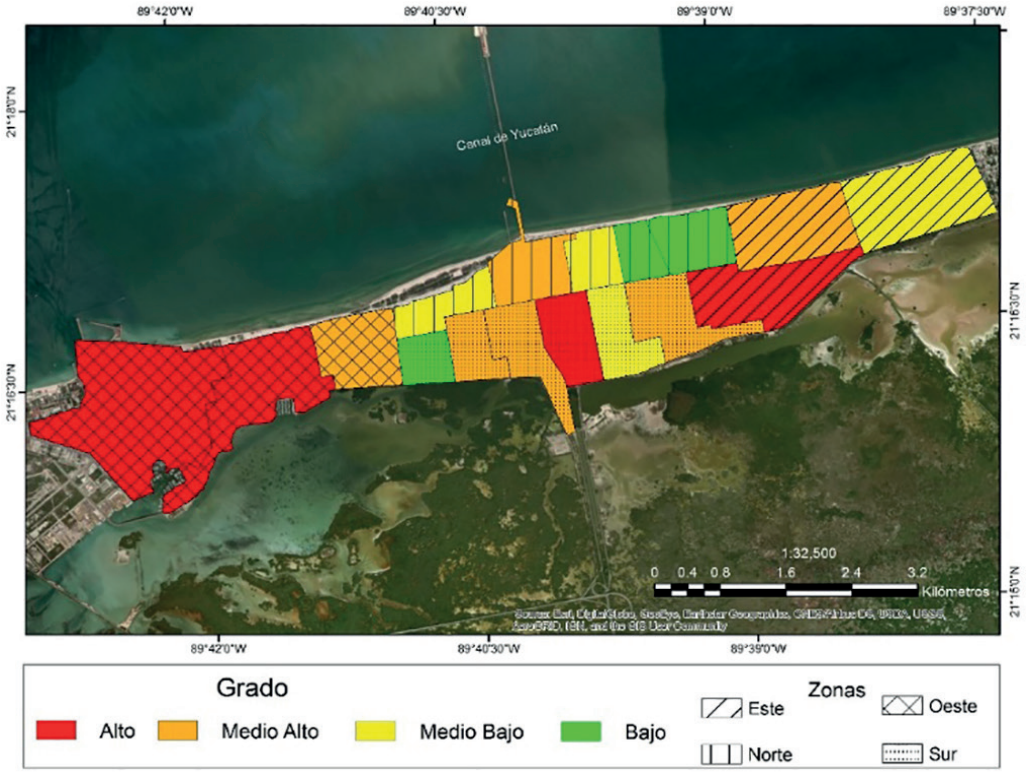
Fuente. Elaboración propia

El índice de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales por subíndices de cambio climático en Motul de Carrillo Puerto considera a la zona noreste de la ciudad con alta probabilidad de ser afectada por ciclones, aquí se presentan buenas condiciones de infraestructura, servicios públicos amplios, menor sensibilidad y mayor capacidad de adaptación ante la probabilidad de alertamiento de ciclones (ver Gráfica 10.2).



Gráfica 10.2. Índice de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales en la ciudad de Motul a nivel de secciones electorales. Fuente: Elaboración propia

En la ciudad de Progreso el índice de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales, por subíndices de cambio climático, es alto en tres secciones electorales de tres partes: este, sur y oeste. Se caracterizan por ser terrenos de menor densidad urbana, reciente crecimiento urbano, expuestas a inundaciones tanto por el mar como por la zona de manglar, además de presentar carencias en el suelo para filtrar los excesos de precipitación al subsuelo, son áreas donde habita población de bajos recursos económicos, con probabilidad de afectaciones a las viviendas y a la infraestructura urbana (ver Gráfica 10.3).



Gráfica 10.3. Índice de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales en la ciudad de Progreso a nivel de secciones electorales. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, de los escenarios de cambio de cambio climático y en función del escenario base, la precipitación total anual presenta una tendencia a ser menor entre un 20 a 50 por ciento agudizándose más hacia la ciudad de Motul de Carrillo Puerto. Sin embargo, el porcentaje en la ciudad de Progreso de Castro es menor entre 15 y 20 por ciento solamente, esto implica que será más húmedo a pesar de estar ubicado en la costa para los siguientes cinco años.

Con lo que respecta al índice de Lang, este describe el grado de humedad o aridez que presenta una región, considera como datos fundamentales las precipitaciones a lo largo del año y las temperaturas medias anuales (como indicador de la capacidad de evaporación), a la vez que sirven como fuente de energía para el desarrollo de ciclones y de sus trayectorias en la superficie terrestre (Orellana, Espadas, Conde y Gay, 2009).

Para la ciudad de Motul de Carrillo Puerto la tendencia de este índice es mantenerse estable entre humedad y temperatura, con respecto al escenario base. Sin embargo,

en la ciudad de Progreso el índice presenta una tendencia mayor al escenario base, la condición de mayor humedad y temperatura media se mantendrá constante, por lo que existe un aumento superior al 50 por ciento.

La precipitación invernal registrada fuera del periodo de ciclones tropicales, permite amortizar la humedad ambiental para la siguiente temporada de secas. Sin embargo, para que la precipitación se presente en invierno se requiere de dos tipos de fenómenos regionales: el primero, los frentes u ondas frías del Norte (vientos helados que se desplaza hacia el Sur a latitudes menores que al cruzar por zonas acuáticas adquieren humedad); y el segundo, son altas presiones de zonas tropicales donde existe mayor temperatura provocando zonas de convergencia (alta y baja presión).

La tendencia futura de lluvia invernal en la ciudad de Motul, de acuerdo a condiciones de los escenarios de alto consumo de combustibles fósiles y bajo consumo de energías, aumentará un 50 por ciento comparado con el escenario (ver cuadro 2), pero en la ciudad de Progreso esta se mantiene en el mismo porcentaje, aunque es la parte Sureste donde el porcentaje aumentará en un 50 por ciento con el escenario base.

10.8. Discusión

Entre la comunidad científica existe un esfuerzo por explicar los constantes daños provocados por fenómenos naturales, los cuales han ocasionado incuantificables pérdidas económicas principalmente en lugares vulnerables y en aquellos sectores de la población que presentan alguna condición de precariedad individual o familiar.

El énfasis de la discusión científica se centra en la vulnerabilidad ante el riesgo actual, se ha buscado una delimitación de las fronteras conceptuales, incluidas las variables, las cuales se han aplicado con dos enfoques: la vulnerabilidad por riesgo y por cambio climático. Aunque no se ha logrado establecer los alcances que permita que la vulnerabilidad sea analítica y operativa, como es el caso de los estudios por fenómenos ciclónicos, abordados desde los estudios urbanos, en el proceso de análisis de la vulnerabilidad global.

La adhesión de las variables sociales, en los estudios de riesgo físico, en un inicio ha contribuido al cambio de paradigma sobre la importancia de la investigación multidimensional, donde cada una de las disciplinas aporta herramientas y técnicas para el estudio de la vulnerabilidad. Con esto se cubren carencias metodológicas y de información, al mismo tiempo se consolidan hipótesis formuladas desde la visión del riesgo, donde solo se incluía el estudio físico de las amenazas o peligros.

En la mayoría de los enfoques analizados por Brooks (2003), considera que no está claro el concepto de vulnerabilidad, además de ser indistinto a su utilización en diferentes contextos se manifiesta como una manera de ejemplificar que los investigadores de peligros darán hincapié en el concepto de riesgo, mientras que los científicos de las ciencias sociales y climáticos prefieren aplicar la vulnerabilidad por etapas (Downing y otros, 2001).

Por lo tanto, Timmermann (1981) propone añadir al concepto de vulnerabilidad una combinación de elementos de peligro y de la respuesta humana, por lo tanto el espacio geográfico y social son incautados. En este sentido, la vulnerabilidad se considera como un efecto combinado de peligro biofísico y de respuesta humana con una localización específica.

Autores como Mansilla (2000), Almejo (2011), Lavell (2010), Cardona (2012) y Lampis (2013) coinciden en que la forma de explicar y analizar los fenómenos perturbadores debe ser desde diferentes disciplinas para generar conclusiones multidimensionales que contribuyan al fortalecimiento de las capacidades técnicas de las poblaciones expuestas, dando prioridad a los más rezagados e impulsar la capacitación entre los gobiernos para la atención de los fenómenos más recurrentes, mediante mecanismos técnicos eficientes y el apoyo de nuevas tecnologías para el pronóstico, seguimiento y prevención de futuros daños.

Por esta razón el concepto de vulnerabilidad está profundamente arraigada en el campo de los riesgos naturales y la pobreza. La vulnerabilidad no tiene una definición universal, pero sin duda se trata de una herramienta de análisis de gran alcance en la descripción de las condiciones actuales en la susceptibilidad al daño, la impotencia y la

marginalidad de los sistemas físicos y socio-ecológicos. Al mismo tiempo, para guiar el análisis normativo en medidas para mejorar el bienestar a través de la reducción del riesgo (Adger, 2006).

Para que la disminución de la vulnerabilidad en las ciudades sea una alternativa de solución a los daños de desastres que impactan cada vez más a las sociedades, hay que promover medidas que permitan fortalecer la capacidad de adaptación de la población a escala local y disminuir la exposición a los cambios ambientales que implica el aumento en la temperatura global a nivel local y regional. El United Nations Environment Programme (2013) a través del IPCC han promovido mecanismos de cooperación técnica entre las naciones con mayor rezago a la adaptación del riesgo y vulnerabilidad mediante asistencia, la cual incluye acciones para reducir el potencial de daños en los centros de población, sin embargo, la falta de información dificulta que las respuestas a los problemas de vulnerabilidad sean infructuosas ocasionando que la resiliencia avance de manera lenta y con mínimo de éxito en comunidades con niveles altos de afectación por los efectos del cambio climático.

Los futuros estudios de vulnerabilidad deberán contener los efectos del cambio climático en la sociedad, además de incluir los distintos subíndices descritos por los autores anteriormente mencionados. Se inicia con la parte física, social y económica, destacando la inclusión de las variables urbanas e infraestructura para el caso de la vulnerabilidad en el ámbito urbano, ya que es en ella donde la población se concentrará en las siguientes décadas.

Pero no se trata de contraponer el concepto de vulnerabilidad como una herramienta metodológica incluyente sino conductora de variables que integran las dimensiones que la componen. Ello con el propósito de integrar indicadores que determinen la probabilidad de afectación por un fenómeno natural, asociado con alteraciones medio ambientales que se presentan, como producto de las emisiones de GEI derivadas por actividades humanas.

La importancia de los escenarios de cambio climático en la gestión del riesgo, implica la aplicación operativa de la zonificación de la vulnerabilidad en políticas local, mediante

la inducción de instrumentos de planeación territorial, considerando como objetivo primordial la disminución del riesgo que enfrentan las ciudades situadas en corredores ciclónicos, como es el caso de Yucatán.

10.9. Conclusiones

La aplicación de la propuesta metodológica para evaluar la vulnerabilidad urbana, por ciclones tropicales con enfoque de cambio climático, ha permitido definir las áreas propensas a ser afectadas por futuros eventos ciclónicos hacia el interior de las ciudades analizadas. No existen antecedentes de estudios que determinen, a mayor nivel de detalle, la probabilidad que presenta la población urbana de evaluar el grado de vulnerabilidad en función de los subíndices que propone el IPCC para la aplicación de medidas operativas.

Se han definido los alcances que presenta la cantidad de indicadores por subíndices propuestos en este trabajo, los cuales solo cubren los aspectos dimensionales estudiados previamente en la literatura: ambiental, social, económico, pero se ha considerado lo urbano y la infraestructura, además de la cantidad de daños generados mediante la recolección de datos hemerográficos. Esta forma de medir la vulnerabilidad ha sido adaptada de otros estudios que tienen el mismo propósito, aunque no en la misma escala territorial, lo que conlleva a fortalecer el desarrollo local.

La propuesta de indicadores cumple con el propósito de evaluación de la vulnerabilidad, con enfoque en lo urbano, en los subíndices de exposición y sensibilidad, pero requiere mayor amplitud en la capacidad adaptiva, la cual es subjetiva la forma de evaluar por el tipo de información disponible, por lo que se deben aplicar otras técnicas de trabajo de campo para recolectar datos que permitan operacionalizar la vulnerabilidad de la sociedad ante cualquier evento perturbador.

Se sugiere que los resultados obtenidos con el índice de vulnerabilidad urbana deben ser incorporados en los estudios sobre el riesgo y vulnerabilidad. La inclusión en los consejos de protección civil locales, servirán de referencia para estudios asociados con

el impacto de los ciclones tropicales y la elaboración de propuestas para mitigar los daños de desastre ocasionados en las viviendas, infraestructura, entre otros.

Conocer las condiciones ambientales futuras probables influye en el fortalecimiento de las capacidades técnicas operativas sobre la reducción de la vulnerabilidad local, así como adoptar e implementar acciones enfocadas en prevención de daños en la infraestructura. La lluvia invernal, la precipitación y humedad en el ambiente son factores geográficos que inducen al acercamiento de los ciclones tropicales en el estado de Yucatán, por lo que conocer los volúmenes de precipitación extrema debería facilitar la toma de decisiones en los organismos encargados de regular la capacidad y administración de los recursos a nivel regional.

10.10. La gestión local ante la vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales

El interés de los gobiernos locales por retomar la cultura de la prevención de daños entre la sociedad mexicana propone esquemas de adaptación a los efectos del cambio del clima global en las áreas urbanas costeras. Además, que el crecimiento de las ciudades debe estar referida a estudios científicos que contribuyan a disminuir los daños por desastre en la población que habitan en la costa.

Las sociedades preparadas para enfrentar y resistir el riesgo y la vulnerabilidad que han sido previstos, posen una cultura de riesgos que implica, voluntad, cooperación y solidaridad; donde existe organización y capacidad técnica para poder afrontar estos fenómenos extremos, también existe la posibilidad de minimizar los daños por desastre. Lo anterior, sirve para fomentar el desarrollo de investigaciones que fortalezcan las capacidades técnicas y científicas de las ciudades que se encuentran expuestas a ciclones tropicales en su territorio (Cilento, 2005).

La forma de articular el conocimiento a través de estudios más específicos permite la elaboración de instrumentos de gestión local, a través de planes y programas, que permitan garantizar la mitigación del riesgo y con ello evitar la vulnerabilidad ante

ciclones tropicales y su intensificación derivada del cambio climático. La Ley de Protección Civil establece la necesidad de fortalecer los mecanismos de desarrollo local, por lo que los estudios científicos contribuyen a reforzar las capacidades en las autoridades que intervienen en la planeación territorial.

No solo es construir conocimiento sino difundirlo para que permee en la sociedad local, lo que permitirá que se consideren acciones de prevención ante fenómenos cada vez más intensos. Pero además, desde el punto de vista gubernamental, se gestione la infraestructura urbana que coadyuve a evitar el colapso ante los factores extremos que se puedan presentar.

10.11. Agradecimiento

Este trabajo de investigación fue presentado durante la V Reunión Anual como parte de las actividades de estudiante en formación asociado con un miembro activo, de REDESClim. Agradecemos profundamente la incorporación del trabajo a la publicación final resultante de las actividades de la red en 2018.

10.12. Referencias

Adger, W. Neil, (1999). "Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam. *World Development"*. No *27*(2). 249-269 pp.

Adger, W. Neil, (2006). "Vulnerability", *Global environmental change*, No.16 (3), pp. 268-281.

Ahumada Cervantes Ramiro, Velázquez Angulo, Gilberto, Rodríguez Gallegos, Hugo B., Flores Tavizón Edith, Félix Gastélum, Rubén, Romero González, Jaime y Alfredo Granados-Olivas, (2015). "An indicator tool for assessing local vulnerability to climate change in the Mexican agricultural sector". *Mitig Adapt Strateg Glob Change*. DOI 10.1007/s11027-015-9670-z.

Almejo Hernández Rubén, (2011). "Vulnerabilidad sociodemográfica ante eventos hidrometeorológicos". En Consejo Nacional de Población (CONAPO). La situación demográfica de México 2011, Secretaría de Gobernación (SEGOB), México DF, pp. 209-223.

Álvarez de la Torre, Guillermo, (2011). "Estructura y temporalidad urbana de las ciudades intermedias en México". Revista Frontera Norte, Volumen 23, No. 46, julio-diciembre, pp. 94-124.

Ávila Flores Omar, (2016). La habitabilidad de las viviendas en la zona metropolitana de Toluca. Tesis Doctoral en Urbanismo. Facultad de Planeación Urbana y Regional. Universidad Autónoma del Estado de México.

Banco Interamericano de Desarrollo (BID), (2010). Indicadores de riesgo de desastre y de gestión de riesgos: Programa para América Latina y el Caribe: Informe resumido, No. 42398, Inter-American Development Bank, pp. 45.

Brooks, N., 2003. Vulnerability, risk and adaptation: a conceptual framework. Working Paper 38, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich. Available at: www.tyndall.ac.uk.

Brooks, N., Neil Adger, W., and Mick Kelly, P. (2005). "The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation". *Global environmental change*. No *15*(2). 151-163 pp.

Cadena, Edel y Juan Campos, (2012). "Vulnerabilidad social y comportamiento social. Un análisis por secciones electorales", Revista papeles de población, No. 71, CIEAP/UAEM, pp. 1-43.

Cilento Sarli, Alfredo, (2005). "Capacidad de resistencia, vulnerabilidad y cultura de riesgos". Espacio Abierto, Vol. 14, No. 2, abril-junio, pp. 265-278.

Cardona, Omar. D., (2012) "Un marco conceptual común para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático: encuentros y desencuentros de una iniciativa insoslayable". En Briones, Fernando, (Coord). Perspectivas de investigación y acción frente al cambio climático en Latinoamérica. Número especial de Desastres y Sociedad en el marco del XX Aniversario de La Red. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED). Mérida, Venezuela. 13-38 pp.

Eakin, Hallie y Luis A. Bojórquez Tapia, (2008). "Insights into the Compositión of household vulnerability from multicritería decision analysis. *Global Enviromental Change*. Vol.18. 112-127 pp.

Downing, T.E., Butterfield, R., Cohen, S., Huq, S., Moss, R., Rahman, A., Sokoma, Y. y Stephen, L. (2001). Vulnerability indices: climate change impacts and adaptations. United Nations, New York, USA.

Downing, T. y Patwardham, A. (2006). Technical paper 3: Vulnerability assessment for climate change adaptation., in: Lim, B., Spanger, E. (Eds.), Adaptation Policy Framework. United Nations Development Program., New York, USA, 251 pp.

Füssel, H.M. y Klein, R.J.T., (2006). "Climate change vulnerability assessment: An evolution of conceptual thinking". Climatic Change, No 5, pp. 301-329.

García B. Marcelino, Adame M. Salvador y Alejandro R. Alvarado G., (2017). "Urbanización e impacto de los ciclones tropicales en la ciudad de Progreso, Yucatán". *Revista Nova Scientia.* Vol. 9 (2), Núm. 19. 819-849 pp.

Gay García Carlos (Comp), (2000). *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México.* Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, pp. 220.

Hinkel Jochen, (2011). "Indicators of vulnerability and adaptive capacity: Towards a clarification of the science–policy interface", Global Environmental Change, No. 21, pp. 198–208.

Instituto Nacional de Estadística Geografía, (INEGI), (2010). Marco geoestadístico nacional. Consultado en www.inegi.org.mx. Consultado el 25 de agosto de 2014.

Instituto Nacional de Geografía Estadística (INEGI) e Instituto Federal Electoral (IFE), (2010). Estadísticas censales a escalas geoelectorales 2010. Disponible en internet http://gaia.inegi.org.mx/geolectoral/viewer.html#, Consultado el 15 de diciembre de 2012.

Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC), (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.[Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Panel Intergubernamental de Cambio Climático, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lampis, Andrea, (2013). "Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: debates acerca del concepto de vulnerabilidad y su medición. Cuadernos de Geografía". Revista Colombiana de Geografía, Vol. 22, Num. 2, julio-diciembre, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, pp. 17-33.

Lavell, Allan, (2010). "Desastres urbanos: una visión global". Woodrow Wilson Center and ASIES Guatemala publication.

Luers, A.L., Lobell, D.B., y otros, (2003). "A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, México". *Global Environmental Change.* No. 13, 255-267 pp.

Mansilla, E. (2000). Riesgo y ciudad (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México. División de Estudios de Posgrado. Facultada de Arquitectura).

Meyer-Arendt, K.J., (1999). "Impacto ambiental provocado por el cambio del uso de suelo en la zona de Progreso, Yucatán". En Universidad Autónoma del Estado de Yucatán, (UADY).

Atlas de Procesos Territoriales de Yucatán, Universidad Autónoma de Yucatán, México City, pp. 259-261.

Monterroso, Rivas Alejandro I, (2012). Contribución al estudio de vulnerabilidad al cambio climático en México. Tesis Doctoral en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM.

Organización Meteorológica Mundial (OMM), (2005). Programa de ciclones tropicales. N° 494, Informe PCT-30, Asociación Regional IV (América del Norte, América Central y el Caribe), Plan Operativo sobre Huracanes, Ginebra-Suiza, pp. 12.

O'Brien, K.L., Leichenko, R.M., Kelkar, U., Venema, H.M., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., Nygaard, L. y West, J. (2004). Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization un India. *Global Environmental Change* 14, 303-313.

Orellana, Roger, Espadas, Celene, Conde, Cecilia y Carlos Gay, (2009). Atlas de escenarios de cambio climático en la península de Yucatán. Mérida: Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). 111 pp.

Quezada Sergio, (2001). Breve historia de Yucatán, Serie breve historia de los estados de la república mexicana, Colegio de México y Fondo de Cultura Económica. México, pp, 288.

Quezada Domínguez Delfín y Romeo Frías Bobadilla, (2006). Puerto Progreso Yucatán. Pasado y presente. Ayuntamiento de Progreso. Colegio Yucatanense de Antropólogos A.C, pp. 194.

Romero Lankao, Patricia, Qin, Hua, (2011) "Conceptualizing urban vulnerability to global climate and environmental change", Current Opinion in Environmental Sustainability, No. 3, pp. 142–149.

Rosengaus Moshinsky. M, Jiménez Espinosa M. y Vázquez Conde M.T., (2002). Atlas climatológico de ciclones tropicales en México, Secretaría de Gobernación (SEGOB) y Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México D.F, pp.106.

Saaty, Thomas, (1988). The analitical hierarchy process. Mc Graw Hill.

Smit, B., y Wandel, J. (2006). "Adaptation, adaptive capacity and vulnerability". *Global environmental change*. No. 16(3). 282-292 pp.

Smit, B., Burton, I., Klein, R. y Wandel, J. (2009) An anatomy of adaptation to climate change and variability, in: Schipper, L., Burton, I. (Eds.), The Earthscan reader on adaptation to climate change. The Earthscan Reader, Sterling VA, USA, p. 459.

Timmermann, P., (1981) Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society. No. 1, En Environmental Monograph. Institute for Environmental Studies, University of Toronto.

United Nations, (2004). Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. United Nations International Strategy for Disaster Reduction, Geneva, Switzerland.

United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). Reducing urban risk and vulnerability. A thematic paper submitted for discussion at the UN-HABITAT/UN-ISDR. Working meeting on vulnerability assessment and reducing urban risk, Madrid, 7 to 9 September 2004.

United Nations Environment Programme, (UNEP), (2013). Research Priorities on Vulnerability, Impacts and Adaptation. Responding to the climate change challenge. Nairobi, pp. 46. Disponible en: http://www.unep.org/pdf/DEW1631NA.pdf. Consultado 14 de octubre de 2013.

VULNERABILIDAD DE LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ DE TEMPORAL ASOCIADA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

11

Vulnerabilidad de la producción de maíz de temporal asociada a la variabilidad climática

Arturo Álvarez Bravo[1]*; Víctor Antonio Vidal Martínez[2]*; José Irán Bojórquez Serrano[3]

11.1. Resumen

En México la influencia del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) sobre las condiciones meteorológicas gobierna el comportamiento de los cultivos en especial del maíz de temporal. Para la región productora de maíz en Nayarit, México; no se dispone de antecedentes que dimensionen esta supuesta influencia. El objetivo de esta investigación fue conocer el grado de vulnerabilidad agrícola en la producción del maíz bajo un régimen de temporal. Se utilizó una base de datos fenológica de 15 años de registros de la región de Santa María del Oro donde se han ubicado evaluaciones periódicas desde 1998 de variedades comerciales de maíz. Cuantificándose la meteorología a través de las variables: precipitación pluvial, días húmedos, evapotranspiración potencial y grados días de desarrollo; que a su vez fueron relacionados por ciclo vegetativo de las variedades de maíz y agrupadas según la fase del ENSO. Aunado a un análisis del rendimiento y su vulnerabilidad a la variabilidad climática. Los eventos "Niña" se caracterizaron por condiciones húmedas contrario a la fase "Niño". Se encontró que las fases del ENSO inciden de manera clara en algunas variables meteorológicas las

1 E-mail: alvarez.arturo@inifap.gob.mx
2 Autor de correspondencia: vidal.victorantonio@inifap.gob.mx
3 Universidad Autónoma de Nayarit. Ciudad de la Cultura Amado Nervo, C.P. 63190. Tepic, Nayarit. E-mail: iranbojorquez@hotmail.com
* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Santiago Ixcuintla Nayarit, México C.P. 63300.

cuales son importantes en el desarrollo del maíz en temporal. Lo anterior explica el comportamiento del rendimiento de grano particularmente en variedades precoces en fase "Niño" y "Niña" (superiores a 7.48 t▪ha^{-1}) y deja en claro como la vulnerabilidad de este cultivo pueden disminuirse si se dispone de semilla adecuada para cada fase del ENSO.

Palabras clave: Fenómeno de El Niño, La Niña, Fases, Rendimiento

11.2. Abstract

In Mexico, the influence of the El Niño Oscillation of the South (ENSO) a phenomenon on weather conditions has a determining influence over the behavior of crops, especially seasonal maize. For the maize-producing region in Nayarit, Mexico; no background is available that measures this supposed influence. The objective of this research was to know the degree of agricultural vulnerability in the production of maize under rainy season regime. A phenological database of 15 years of records from the Santa María del Oro region was used, where periodic evaluations of commercial varieties of maize since 1998 have been located. Quantifying the meteorology through the variables: rainfall, wet days, potential evapotranspiration and growing degree days; which in turn were related by vegetative cycle of the maize varieties and grouped according to the ENSO phase. Grain yield analysis and its vulnerability to climate variability were also recorded. The "Niña" events were characterized by wet conditions contrary to the "Niño" phase. It was found that the phases of the ENSO clearly affect some meteorological variables which are important in the development of seasonal maize. This explains the behavior of the grain yield particularly in early varieties in the "Niño" and "Niña" phases (above 7.48 t ▪ ha^{-1}) and makes it clear how the vulnerability of this crop can be reduced if adequate seed is available for each ENSO phase.

Keywords: El Niño, La Niña, Phases, Grain Yield

11.3. Introducción

Para la agricultura a cielo abierto, el principal factor ambiental que limita la productividad es el clima. Algunos cultivos serán muy afectados debido al incremento de las sequías extremas, la distribución errática de la precipitación o el temporal extremadamente húmedo (FAO, 2010). Dichas condiciones suelen ser moduladas por eventos atmosféricos de escala sinóptica así como teleconexiones globales como el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO en inglés). Por tanto, cultivos que se establecen en el ciclo primavera verano y climáticamente dependientes de "buenas" condiciones como el maíz, son altamente susceptibles o vulnerables. El trabajo de Llano y Vargas, (2011) demostró como la precipitación, en particular su distribución temporal, fue la que explica mejor la variabilidad del rendimiento de maíz. En México, se cultivan anualmente 6.4 millones de hectáreas de maíz y se producen 12.1 millones de toneladas de grano (SIAP, 2016). El maíz en México, no tan solo es importante en términos alimenticios o industriales, sino también social y culturalmente (de los cereales que se producen en este país, el 65% es maíz).

En México el maíz (*Zea mays* L.) es y continúa siendo la base de la alimentación de su población y es por lo tanto el cultivo con mayor superficie sembrada, la cual actualmente se estima es de 6.4 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 3.62 ton ha^{-1}. Bajo temporal estricto, se siembra en México una superficie promedio de 6' 099 689 ha, cuyo rendimiento promedio de grano nacional es de 2.28 ton ha^{-1} (SIAP, 2016). El maíz es de gran importancia en México al ser el cultivo básico de mayor influencia socioeconómica y agronómica. Tal es la razón por la cual su gran diversidad genética aún prevalece a través de los multidiversos nichos agroecológicos y culturales. Dicha diversidad del maíz, se ha manifestado a través de la presencia de las variedades nativas o criollas genéricamente denominadas razas que el productor a través de sus métodos tradicionales de cultivo ha conservado (Muñoz, 2003). México es centro de origen y diversidad de maíces nativos conocidos como "criollos". Dicha diversidad es parte fundamental de la base material de la mayoría de las culturas regionales y los pueblos originarios del país, también es básica para la evolución mundial del maíz ante muy diversos nuevos retos, entre ellos nuevos usos de esa planta y los efectos del cambiante del clima (Ortega-Paczka, 2017).

El cultivo del maíz en México se realiza actualmente bajo un amplio rango de altitud y variación climática, desde el nivel del mar hasta los 3,400 msnm. Se siembra en zonas tropicales con escasa precipitación, en regiones templadas, en las faldas de las altas montañas, en ambientes muy cálidos y húmedos, en escaso suelo, en pronunciadas laderas o en amplios valles fértiles, en diferentes épocas del año y bajo múltiples sistemas de manejo y desarrollo tecnológico (CONABIO, 2011 y Hernández, 1985). A esta gran diversidad de ambientes, los agricultores, indígenas o mestizos, mediante su conocimiento y habilidad, han logrado adaptar y mantener una extensa diversidad de maíces nativos (Muñoz, 2003). Los requerimientos agroecológicos del maíz lo definen como una planta C4, con base en la fijación del carbono en la fotosíntesis, son plantas de día corto (< 10 horas), aunque hay cultivares insensibles a la duración del día o fotoperiodo. Requiere de 500 a 800 mm de precipitación pluvial, dependiendo del genotipo y del clima. La temperatura óptima para germinación es entre 18 y 21°C y la mayoría de sus procesos de crecimiento y desarrollo recaen en temperaturas entre 18 y 28°C; siendo la temperatura media óptima es de 24-30°C y la temperatura base para la estimación de grados-día o unidades calor para estudios fenológicos es de 10°C. Prefiere suelos franco-limosos, franco-arcillosos y franco-arcillo-limosos, pero también prospera en suelos de textura ligera a media. Su pH óptimo es entre 5.5 y 7.5 (Ruiz *et. al.,* 2013a). Los principales factores que determinan una óptima interrelación planta-ambiente son: a) Fecha de siembra, b) Optima selección del maíz a sembrar (adaptado y rendidor), c) Disponibilidad y cobertura óptima de los requerimientos hídricos del cultivo a través de sus etapas fenológicas; d) Manejo agronómico eficiente y oportuno (Densidad de población, fertilización, control de organismos dañinos), e) Manejo e interpretación de la información meteorológica disponible durante el ciclo del cultivo (Vidal, 2014).

Para el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) la vulnerabilidad es el grado de susceptibilidad e incapacidad de un sistema para contrarrestar la adversidad climática, la cual incluye la variabilidad climática y los eventos extremos. América Latina y el Caribe es vulnerable a fenómenos meteorológicos y climáticos como huracanes, sequias y el fenómeno de El Niño, lo que de manera directa incide en la producción agrícola de la región (BID, 2012). En zonas de temporal con sistemas de producción marginales los rendimientos se verán comprometidos por las variaciones

interanuales de la precipitación resultando en años con rendimientos contrastantes (Vallejo-Nieto *et. al.*, 2011 y Ponvert-Delisles *et. al.*, 2007), señalan a la naturaleza como la proveedora de las desgracias que aquejan a la sociedad; sin embargo, ni los desastres ni las pérdidas en las actividades productivas como la agricultura son responsabilidad de la naturaleza, del mismo modo los autores recomiendan un esquema donde la prevención a través de un modelo de gestión de riesgo multifactorial permita disminuir la vulnerabilidad asociada al riesgo y no al "desastre natural".

Dichas condiciones suelen ser moduladas por eventos atmosféricos de escala sinóptica así como teleconexiones globales como el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENSO en inglés). El ENSO es un importante forzante de variabilidad climática a corto plazo y responsable de alteraciones en el sistema océano-atmósfera, las cuales revelan implicaciones económicas, sociales, ambientales, políticas y académicas (Salinger *et. al.*, 2000; Zebiak *et. al.*, 2014). Este fenómeno se caracteriza por la anomalía de temperatura en la superficie del océano pacífico ecuatorial en la región 3.4 de "El Niño", la fase cálida se le conoce como "Niño" la cual consta de una anomalía positiva mientras que la "Niña" es la fase fría o anomalía negativa, la fase "Neutra" es cuando la anomalía oscila sobre los valores medios 26.8 ± 0.5°C (Latif y Keenlyside, 2009; Maturana *et. al.*, 2004). Existen varios modelos llamados 'Índices' que explican con cierto grado de precisión el comportamiento del ENSO, sin embargo por norma entre los países norteamericanos se recomienda el uso del Índice ONI (Índice Oceánico del Niño) desarrollado por el Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en ingles). El ONI es la media móvil de la anomalía de la temperatura de la superficie del mar en tres meses consecutivos (Guevara-Díaz, 2008). El uso de índices que describen las fases del ENSO y su interacción con la precipitación ha sido ampliamente documentado, por ejemplo en Sudamérica Pinilla y Pinzón (2012), Ramírez-Builes y Jaramillo-Robledo (2009) y Ruiz-Cabarcas y Pabón-Caicedo (2013) reportan disminución de la precipitación en fase Niño y aumentos durante fase Niña. Del mismo modo, el ENSO se ha relacionado con el impacto en los cultivos como es el caso de Monasterio *et. al.* (2011) señalan bajos rendimientos en fase Niña principalmente por un aumento en la precipitación en la fase de floración y llenado de grano en maíz. De igual manera De La Casa y Ovando (2006) encontraron estadísticamente anomalías positivas en el rendimiento

de maíz en fase Niño y negativas en Niña. En México los impactos del ENSO han sido dimensionados por distintos autores, resaltando el trabajo de Adams *et. al.* (2003) que encontraron en años Niño una disminución de la superficie establecida de maíz y un aumento en el precio en contraste con los años Niña donde el precio disminuye a causa de un aumento en la producción. Lo anterior se encuentra íntimamente relacionado con la distribución de la precipitación, siendo esto confirmado por Méndez-González *et. al.* (2007) y Pavia *et. al.* (2006) donde demostraron una teleconexión significativa entre las fases del ENSO y la precipitación mensual.

Para la región productora de maíz en Nayarit, México; no se dispone de antecedentes que dimensionen esta supuesta influencia. El objetivo de esta investigación fue conocer el grado de vulnerabilidad agrícola en la producción del maíz bajo un régimen de temporal.

11.4. Materiales y métodos

La zona de estudio representa la región maicera de temporal en Nayarit, México. Se ubicó en las proximidades de la localidad San José de Mojarras, municipio de Santa María del Oro a una altitud de 940 msnm, siendo el régimen de humedad de temporal estricto con precipitación entre junio y octubre.

Base de datos fenológica. Se utilizó una base de datos con 15 años de registros, desde el ciclo 1998-1999 hasta el 2012-2013. Ésta se constituyó de 344 registros de variedades comerciales y regionales de maíz, de la cual se obtuvieron fecha de siembra, fecha de floración y fecha de cosecha. Para categorizar las variedades según su hábito de crecimiento se utilizó el siguiente criterio: precoz ≤ 57 días a floración, intermedio > 57 y < 62 días a floración y tardío ≥ 62 días a floración.

Índice oceánico de El Niño. Del sitio de internet del Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos se obtuvieron los datos mensuales del índice oceánico de El Niño referentes a la región 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W), los cuales corresponden a la anomalía de la media móvil trimestral (Cuadro

11.1). Los valores se clasificaron en tres fases: Cálida o Niño (anomalía ≥ 0.5°C), Fría o Niña (anomalía ≤ -0.5°C) y Neutro con anomalías entre -0.5°C y 0.5°C (NOAA, 2017).

Cuadro 11.1. Anomalía mensual del índice y fase del ENSO por ciclo de producción.

Temporada	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Fase
1998-1999	-0.2	-0.7	-1.0	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5	Niña
1999-2000	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7	Niña
2000-2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8	Niña
2001-2002	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	Neutro
2002-2003	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3	Niño
2003-2004	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	Neutro
2004-2005	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	Niño
2005-2006	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	Neutro
2006-2007	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.0	Neutro
2007-2008	-0.3	-0.4	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-1.4	Niña
2008-2009	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.5	-0.7	Neutro
2009-2010	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	Niño
2010-2011	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5	Niña
2011-2012	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.0	Niña
2012-2013	0.0	0.1	0.4	0.5	0.6	0.2	-0.3	Neutro

Datos meteorológicos. Se dispuso de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional, estación Cerro Blanco con clave 18005 que se ubica en las coordenadas de latitud norte 21°22'36" y longitud oeste 104°37'06" a una altitud de 965 msnm, la cual se constituyó de registros diarios de temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), temperatura media (Tmed=[Tmax+Tmin]/2) y precipitación. El dato de radiación solar diaria se obtuvo de la base de datos del proyecto "La meteorología superficial y la energía solar" (NASA, 2017).

Variables de estudio. Para la cuantificación meteorológica se consideró el periodo de fecha de siembra (FS) a fecha de cosecha (FC). Las variables se calcularon de la siguiente manera: Precipitación (P)=cantidad de precipitación pluvial acumulada en el periodo. Días húmedos (DH)=representa el número de días con precipitación mayor a 1mm. Evapotranspiración potencial (ET0 en mm/día)= 0.0023*(Tmed + 17.78) Ra (Tmax - Tmin) 0.5; donde: Ra= radiación solar extraterrestre. Grados día de desarrollo

(GDD)= Tmed-Tb; donde: Tb = 10 °C. Rendimiento (Ren) = Pc x Fs x Fh, donde: Pc = Peso de campo, en función de peso directo de grano (sin peso de mazorca ni factor de desgrane) por parcela en función de número de plantas cosechadas con competencia completa. Fs = Factor de superficie, para convertir kg/parcela en kg ha-1: 10 000 m^2/ superficie ocupada por plantas cosechadas. Fh = 100 – porcentaje de humedad del grano a cosecha (14%) = 86.

Gestión de los datos. Se integró una base de datos del hábito de crecimiento, ciclo de producción, rendimiento y variables meteorológicas organizadas por fase del ENSO.

Análisis estadístico. Para identificar las posibles diferencias por fase del ENSO se utilizó un análisis de varianza. Cuando se presentaron diferencias significativas, se realizó una comparación de medias con la prueba de Tukey con un alfa al 0.05% de nivel de confianza mediante el programa estadístico Minitab versión 17 (2013).

Evaluación de la vulnerabilidad. Esta se cuantificó como el porcentaje del diferencial entre el rendimiento potencial (para la región 9.5 $t \cdot ha^{-1}$ (SAGARPA, 2014) y el rendimiento obtenido en los 15 años experimentos.

Bajo la siguiente ecuación:

$$PRO = (RA * 100) / 9.5$$
$$DRE_{pit} = (100 - PRO)$$
$$SDRE = (DRE_p + DRE_i + DRE_t)$$
$$VUL = (DRE_{pit} * 100) / SDRE$$

Dónde:

RA	=	Rendimiento obtenido en los experimentos por ciclo vegetativo fase del ENSO.
PRO	=	Porcentaje de rendimiento obtenido por ciclo vegetativo y fase del ENSO (%)
DRE_{pit}	=	Diferencial de rendimiento esperado para cada tipo de ciclo vegetativo y fase del ENSO (%).
p	=	precoz
i	=	intermedio

$_{t}$ = tardío
SDRE = Suma de los diferenciales de rendimiento esperando de los tres ciclos vegetativos organizados por fase del ENSO.
VUL = Vulnerabilidad del rendimiento (%)

11.5. Resultados y discusión

11.5.1.Influencia del ENSO sobre la meteorología

11.5.1.1. De siembra a floración

El efecto del fenómeno de "El Niño Oscilación del Sur" sobre la meteorología en Santa María del Oro para el periodo de siembra a floración en maíz de temporal en los 15 ciclos analizados, mostró diferencias relevantes en las distintas fases. La "Niña" se caracterizó por condiciones más húmedas de lo normal contrario lo que sucede en la fase "Niño" vinculado a condiciones más secas. Lo anterior coincide con lo encontrado por Ruiz-Cabarcas y Pabón-Caicedo (2013), Pavia *et. al.* (2006) y Moeletsi *et. al.* (2011), donde las fases del ENSO contrastan principalmente en anomalías en precipitación siendo positivas para "Niña" y negativas en "Niño". El análisis de las variables meteorológicas desde siembra hasta floración, distinguiendo la fase del ENSO, se puede observar como la precipitación pluvial mostró diferencias estadísticas entre las tres fases, siendo el episodio Niña el de mayor cantidad acumulada en el periodo (43.6%), equivalente a 200 mm de diferencia con respecto a los años Niño que presentaron la menor acumulación (467.36 mm).

Trabajos como los de (Granados-Ramírez y Sarabia-Rodríguez, 2013) manifiestan que los requerimientos hídricos para maíz de temporal deben ser superiores a los 400 mm a floración, en tanto que Ruiz *et. al.* (1999) y Ruiz *et. al.* (2013a) señalan que el maíz prospera con P mayor a 600 mm acumulados en el ciclo completo. Los resultados del presente trabajo muestran como estos requerimientos son aportados en las distintas fases del ENSO y en los tres ciclos vegetativos tan solo a floración, por lo que en términos de P se puede considerar como un factor no limitante para el desarrollo del cultivo en esta región, a esta etapa fenológica.

En lo que respecta a los días húmedos, los años con fase Niño presentaron la menor cantidad con 30.77 días, mientras que los años Neutro y Niña no presentaron diferencias estadísticas entre sí (mayor a 38 días). La evapotranspiración potencial no mostró diferencias entre años Niño y Neutro (>320.9 mm), sin embargo los años Niña fueron 9 mm menores con respecto a los Niño. Finalmente, no se encontraron diferencias por fase del ENSO en los grados día de desarrollo acumulado siendo el rango encontrado entre 818.75°C y 807.51°C. (Ruiz *et. al.*, 1999) citando a diversos autores señala que el maíz prospera en múltiples condiciones ambientales pero dicha plasticidad es influencia por los hábitos de crecimiento del cultivo, lo cual se constata con lo encontrado en el presente trabajo (Cuadro 11.2).

Cuadro 11.2. Influencia del ENSO sobre la meteorología de siembra a floración.

Variable meteorológica	Fase del ENSO		
	Niño	Neutro	Niña
Precipitación (P)	467.36c	641.60b	671.22a
Días húmedos (DH)	30.77b	38.96a	39.58a
Evapotranspiración potencial (ET_0)	323.01a	320.94a	313.44b
Grados día de desarrollo (GDD)	818.75a	808.75a	807.51a

Medias con la misma literal en renglón no presentan diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Tukey a $p \leq 0.05$.

11.5.1.2. De siembra a cosecha

El efecto del fenómeno de "El Niño Oscilación del Sur" sobre la meteorología en la región productora de maíz de temporal en Nayarit en los 15 ciclos analizados, mostró diferencias relevantes en las distintas fases. La "Niña" se caracterizó por condiciones más húmedas (precipitación acumulada y días húmedos) y una menor acumulación de calor (grados día de desarrollo), contrario lo que sucede en la fase "Niño" caracterizado por condiciones más secas (menor precipitación pluvial) y mayor acumulación de grados día de desarrollo. Lo anterior coincide con lo encontrado por Ruiz-Cabarcas y Pabón-Caicedo (2013), Pavia *et. al.* (2006) y Moeletsi *et. al.* (2011), donde las fases del ENSO contrastan principalmente en anomalías en precipitación siendo positivas para "Niña" y negativas en "Niño". En el análisis de las variables meteorológicas de siembra a cosecha distinguiendo la fase del ENSO se logró identificar como la precipitación mostró diferencias entre fases, siendo los episodios "Niña" los de mayor cantidad acumulada en el periodo (997 mm) lo que equivale a un 28.6% más con respecto a la fase

"Niño" (712 mm). Con referencia a los días húmedos, los años con fase "Niño" presentaron la menor cantidad 50 días, mientras que los años "Neutro" y "Niña" acumularon 60 y 62 días respectivamente (no habiendo diferencias estadísticas entre estos dos últimos). La evapotranspiración potencial no mostró diferencias estadísticas entre las tres fases siendo una fluctuación de apenas 21 mm entre los valores extremos. Finalmente, se identificaron diferencias en los grados día de desarrollo acumulado en años "Niño" de 6.3% mayores a los años "Neutro" y "Niña", fluctuando los valores entre 1887°C y los 2015°C. Ruiz *et. al.* (1999) citando a diversos autores señala que el maíz prospera en múltiples condiciones ambientales pero dicha plasticidad es influencia por los hábitos de crecimiento del cultivo, lo cual se constata en el presente trabajo. Estos resultados coinciden con razas del grupo tropical precoces como Conejo, Zapalote Chico, Ratón y Nal-Tel, descritas por Ruiz *et. al.* (2013b) lo anterior permite especular sobre la plasticidad fenotípica presente en el maíz (amplia adaptación) en razas criollas y la vulnerabilidad de algunos maíces comerciales sobre lo específico de su hábito y ambiente de desarrollo (adaptación estrecha). Mercer y Perales (2010) concluyen que las razas criollas se adaptan mejor a condiciones cambiantes del ambiente gracias a su mayor variación genética, que les confiere esa plasticidad fenotípica de adaptarse a ambientes poco favorables (Tabla 3).

Cuadro 11.3. Influencia del ENSO sobre la meteorología de siembra a cosecha.

Variable meteorológica	Fase del ENSO		
	Niño	Neutro	Niña
Precipitación (P)	712.39c	908.50b	997.50a
Días húmedos (DH)	50.38b	60.69a	62.40a
Evapotranspiración potencial (ET_0)	737.88a	749.61a	758.97a
Grados día de desarrollo (GDD)	2015.80a	1928.18b	1887.80b

Medias con la misma literal en renglón no presentan diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Tukey a $p \leq 0.05$.

11.5.2. El rendimiento de grano de maíz de temporal influenciado por el fenómeno de El Niño

Las tres fases del ENSO influenciaron de manera diferenciada el comportamiento del rendimiento de grano de acuerdo con los diferentes ciclos vegetativos del maíz. Los mejores rendimientos de grano superiores a las 8 $t \cdot ha^{-1}$, fueron obtenidos por las

variedades precoces dentro de las fases "Niño" y "Niña" y en las variedades intermedias en la fase "Niño". El rendimiento más bajo lo obtuvo la variedad precoz en fase "Neutro", siendo en esta misma fase la que mostró los rendimientos más bajos en el ciclo intermedio, mientras que en fase "Niña" las variedades tardías registraron el rendimiento más bajo. La fase con los mejores rendimientos sin distinguir los hábitos de crecimiento vegetativo fue "Niño" con un promedio de rendimiento 7.9 $t \cdot ha^{-1}$ (Cuadro 11.4).

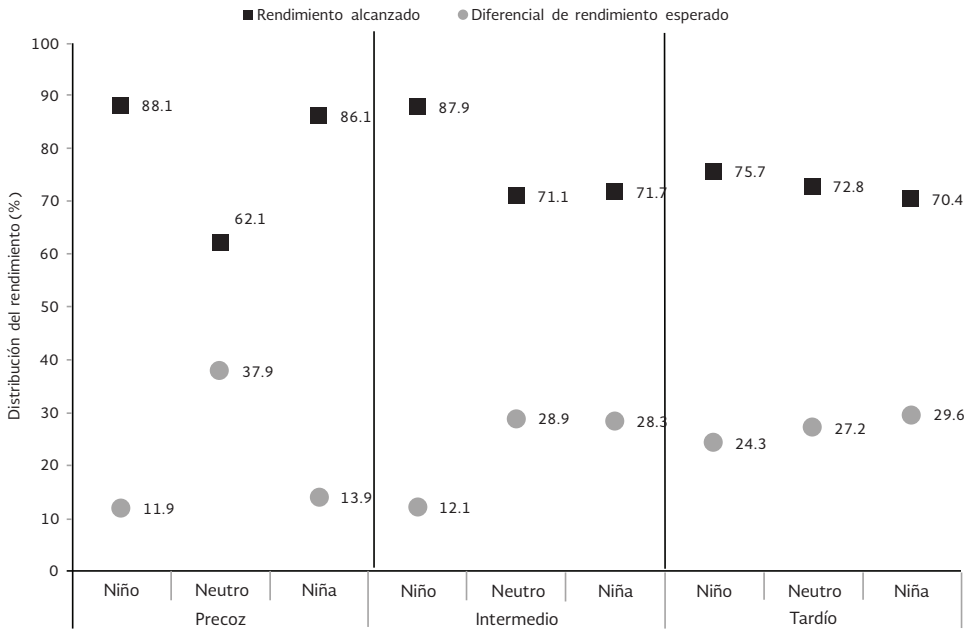
Cuadro 11.4. Influencia del ENSO sobre el rendimiento por ciclo vegetativo.

Fase del ENSO	Rendimiento ($t \cdot ha^{-1}$)		
	Precoz	Intermedio	Tardío
Niño	8.37a	8.35a	7.19b
Neutro	5.90b	6.75a	6.92a
Niña	8.18a	6.81b	6.69b

Medias con la misma literal en renglón no presentan diferencias significativas, de acuerdo con la prueba de Tukey a $p \leq 0.05$.

11.5.3. Rendimiento alcanzado vs Diferencial de rendimiento esperado

En promedio las variedades precoces alcanzaron un 78.8% del potencial de rendimiento (9.5 $t \cdot ha^{-1}$) siendo el porcentaje más alto. Por el contrario, las variedades tardías expresaron un 73% del potencial de rendimiento (más bajo). Sin embargo, las variedades tardías son las que presentan los rendimientos con menor variación en según la fase del ENSO (70.4 – 75.8%). El mayor diferencial de rendimiento se presentó en la variedad precoz fase "Neutro" (37.9%). La fase "Niño" fue la que permitió la mejor expresión del rendimiento potencial entre ciclos vegetativos (84% en promedio). Siendo la fase "Neutro" la que obtuvo el mayor diferencial del rendimiento potencial con un 69% en promedio (Gráfica 11.1).



Gráfica 11.1. Rendimiento del maíz de temporal según fase del ENSO y ciclo vegetativo.

11.6. Caracterización de las fases del ENSO y el rendimiento

La fase "Niño" se caracteriza por un temporal menos húmedo (seco) y más cálido (menos días nublados y más días soleados) lo cual es benéfico para el maíz. En contraste la fase "Niña" presenta el temporal más húmedo con precipitación acumulada promedio cercana a los 1000 mm y los valores más bajos en acumulación de grados día de desarrollo, lo que afecta a las variedades intermedias y tardías. La fase "Neutro" muestra contrastes en las variables meteorológicas lo que hace deficiente el comportamiento del rendimiento. Los resultados coinciden con Monasterio y colaboradores (2011) donde encontraron bajos rendimientos en fase "Niña" principalmente por un aumento en la precipitación en la fase de floración y llenado de grano en maíz (Cuadro 11.5).

Cuadro 11.5. Comportamiento de las variables evaluadas según fase del ENSO.

Fase	Descripción meteorológica	Rendimiento
Niño	Régimen de precipitación más bajo distribuido en la menor cantidad de días húmedos, siendo la evapotranspiración y la acumulación de grados día de desarrollo más alta de las tres fases.	Satisfactorio en dos ciclos vegetativos (Precoz e intermedio)
Neutro	Los valores medios de precipitación y de grados día de desarrollo se presenta en esta fase del ENSO en contraste con los valores de evapotranspiración potencial más baja entre fases.	Deficiente en los tres ciclos vegetativos
Niña	Tanto la precipitación como los días húmedos presentan los valores más altos, mientras que la evapotranspiración y la acumulación de grados día de desarrollo son los más bajos de las tres fases.	Bajo en dos de los tres ciclos vegetativos (Intermedio y tardío)

11.7. La vulnerabilidad del maíz de temporal

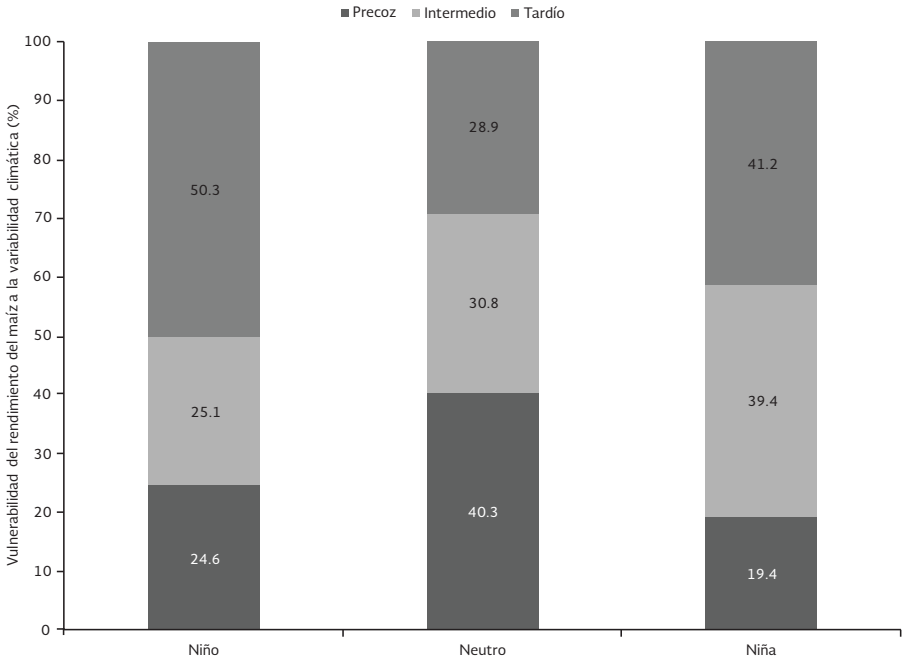
La vulnerabilidad del rendimiento de grano del maíz de temporal a la variabilidad climática mostró claras diferencias por ciclo vegetativo. En la fase "Niño" (temporal caracterizado por menor humedad y mayor calor) las variedades de ciclo precoz e intermedio muestran un nivel de vulnerabilidad bajo. La fase "Neutro" presenta porcentajes de vulnerabilidad mayores al 28.9% siendo las variedades precoces las que sobresalen con 40.3%. En la fase "Niña" las variedades intermedias y tardías son las vulnerables con 39.4 y 41.2% respectivamente. Las variedades tardías sobresalen en fase "Niño" y "Niña" por ser las más vulnerables (Figura 2).

11.8. Conclusiones

La vulnerabilidad que presenta la producción de maíz de temporal en el estado de Nayarit, fue factible de asociarse al evento climático de escala global "El Niño Oscilación del Sur", a través de sus ciclos vegetativos y del rendimiento de grano expresado en cada una de las fases de este fenómeno.

Se identificó la influencia del fenómeno de "El Niño Oscilación del Sur" sobre la meteorología en la región productora de maíz de temporal en Nayarit, México.

Las fases de este fenómeno inciden de manera diferida según el tipo de ciclo vegetativo del maíz establecido en temporal.



Gráfica 11.2. Vulnerabilidad del rendimiento de maíz de temporal por ciclo vegetativo según fase del ENSO.

Los eventos "Niña" se caracterizaron por condiciones predominantemente húmedas en tanto que la fase "Niño" fue significativamente menor en los indicadores relacionados con la humedad.

El rendimiento del maíz de temporal es favorecido por un temporal mejor distribuido entre menos días húmedos ("Niño") que por un temporal muy lluvioso ("Niña") donde el intervalo entre días húmedos es menor y por ende su distribución no es buena.

Las variedades precoces son las menos vulnerables a la variabilidad climática particularmente en fase "Niño". En tanto que la fase del ENSO que más incide en la vulnerabilidad de los tres ciclos vegetativos del maíz es la fase "Neutro".

11.9. Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y a la Universidad Autónoma de Nayarit. Pero sobre

todo a los productores cooperantes que hicieron posible el establecimiento de los experimentos en sus parcelas, sirvan estos resultados para su beneficio.

11.10. Referencias

Adams, R. A., Houston, L. L., McCarl, B. A., Tiscareño-L., M., Matus-G., J. and Weiher, R. F. (2003), "The benefits to Mexican agriculture of an El Niño-southern oscillation (ENSO) early warning system", Netherlands. Agricultural and Forest Meteorology, 115:183-194.

Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) (2017), Consultado en septiembre 2017. https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/

Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) (2017), Consultado en septiembre de 2017. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2012), "El cambio climático y la producción agrícola. Estados Unidos de América", Notas Técnicas. 36 p.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (2011), Base de datos del proyecto global "Recopilación, generación, actualización y análisis de información acerca de la diversidad genética de maíces y sus parientes silvestres en México", Octubre de 2010, México, D. F. http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/proyectoMaices.html

De la Casa, A. C. y Ovando, G. G. (2006), "Influencia de Episodios El Niño-Oscilación Sur (ENOS) Sobre la Precipitación y el Rendimiento de Maíz en la Provincia de Córdoba, Argentina", Chile, Agricultura Técnica, 66(1):80-89.

Food and Agriculture Organization (FAO) (2010), "El cambio climático y sus repercusiones en la producción agrícola, forestal y pesquera en América Latina y El Caribe", 31ª Conferencia regional de la FAO para América Latina y El Caribe, 16 p.

Granados-Ramírez, R. y Sarabia-Rodríguez, A. A. (2013), "Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca", México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 3(4):435-446.

Guevara-Díaz. J. M. (2008), "El abc de los índices usados en la identificación y definición cuantitativa de El Niño - Oscilación del Sur (ENSO)", México, Terra, 35(24):85-140.

Hernández X., E. (1985), "Maize and man in the Greater Southwest", Economic Botany 39(4):416-430.

Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC) (2007), "Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático", IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.

Latif, M. and Keenlyside, N. S. (2009), "El Niño/Southern Oscillation response to global warming", U.S.A. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), 106(49):20578–20583.

Llano, M. P. y Vargas, W. (2011), "Brasil. Relación clima-rendimiento del maíz mediante el uso de un modelo estadístico", XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia.

Maturana, J., Bello, M. y Manley, M. (2004), "Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile", Valparaíso, Chile, 13-27 pp.

Méndez-González, J., Navar-Cháidez, J. J., González-Rodríguez, H. y Treviño-Garza, E. J. (2007), "Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México", México, Ciencia UANL, 3(10):290-298.

Mercer, K. L. and Perales, H. R. (2010), "Evolutionary response of landraces to climate change in centers of crop diversity", U.S.A. Evolutionary Applications, 3(5-6):480-493.

Moeletsi, M. E., Walker, S. y Landman, W. A. (2011), "ENSO and implications on rainfall characteristics with reference to maize production in the Free State Province of South Africa", United Kingdom, Physics and Chemistry of the Earth, 36(14-15):715-726.

Monasterio, P. P., Pierre, F., Barreto, T., Marin, C., Mora, O., Tablante, J., Maturet, W. y Mendoza, C. (2011), "Influencia del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur sobre la precipitación y rendimiento del cultivo de maíz en el municipio Peña, estado Yaracuy, Venezuela", Venezuela, Agronomía Tropical 61(1):59-72.

Muñóz O. A. (2003), "Centli-Maíz. Prehistoria e Historia, diversidad, potencial, origen genético y geográfico, glosario Centli-Maíz", Colegio de Postgraduados, 1ª. Edición, ISBN, 968-839-393-2. 211 pp.

Pavia, E. G., Graef, F. y Reyes, J. (2006), "PDO-ENSO Effects in the climate of Mexico", EE. UU.A. Journal of Climate, 19:6433-6438.

Pinilla, M. C. y Pinzón, C. (2012), "Influencia del ciclo ENOS sobre la precipitación en los municipios de Betulia, San Vicente de Chucurí, Zapatoca y Girón, departamento de Santander, Colombia", España, 8º Congreso Internacional: "Cambio climático: Extremos e impactos", 581-592.

Ponvert-Delisles, R. D., Lau, A. y Balamaseda, C. (2007), "La vulnerabilidad del sector agrícola frente a los desastres. Reflexiones generales", Perú, Zonas Áridas, 11(1):174-194.

Ramírez-Builes, V. H. y Jaramillo-Robledo, A. (2009), "Relación entre el índice océanico de El Niño y la lluvia, en la región andina central de Colombia", Colombia, CENICAFÉ, 60(2):161-172.

Ruiz C. J. A., Medina G. G., González A. I. J., Flores L. H. E., Ramírez O. G., Ortiz T. C., Byerly M. K. F. y Martínez P. R. (2013), "Requerimientos agroecológicos de los cultivos", Libro Técnico No. 3, INIFAP-CIRPAC-C. E. Centro Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México, 564p.

Ruiz-Cabarcas, A. C. y Pabón-Caicedo, J. D. (2013a), "Efecto de los fenómenos de El Niño y La Niña en la precipitación y su impacto en la producción agrícola del departamento del Atlántico (Colombia)", Colombia, Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía, 22(2):35-54.

Ruiz-Corral, J. A., Hernández-Casillas, J. M., Sánchez-González, J. J., Ortega-Corona, A., Ramírez-Ojeda, A., Guerrero-Herrera, M. J., Aragón-Cuevas, F., Vidal-Martínez, V. A. y De-La-Cruz-Larios, L. (2013b), "Ecología y distribución actual y potencial de razas mexicanas de maíz", Libro Técnico Núm. 5, INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México, 149 p.

Ruiz-Corral, J. A., Medina-García, G., González-Acuña, I. J., Ortíz-Trejo, C., Flores-López, H. E., Martínez-Parra, R. A. y Byerly-Murphy, K. F. (1999), "Requerimientos agroecológicos de cultivos", Libro Técnico Núm. 3, Guadalajara, Jalisco, México, 324 p.

Salinger, M. J., Stigter, C. J. and Das, H. P. (2000), "Agrometeorological adaptation strategies to increasing climate variability and climate change", Netherlands, Agricultural and Forest Meteorology, 103:167-184.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2014. Agenda Técnica Agrícola de Nayarit. México, D.F., México. 103 p.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2016), Consultado en septiembre de 2017. http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2016), "Anuario Estadístico de la Producción Agrícola: Maíz de grano en el Estado de Nayarit, Ciclos OI y PV (Riego + Temporal y Temporal)", Consultado: Septiembre 2017. http://www.siap.gob.mx;

Vallejo-Nieto, M. I., Gurri-García, F. D. y Molina-Rosales, D. O. (2011), "Agricultura comercial, tradicional y vulnerabilidad en campesinos", México, Política y Cultura, 36:71-98.

Vidal M. V. A. (2014), "Fenología, Fisiología y Requerimientos Agroclimáticos del Cultivo del Maíz, Curso de Capacitación a Personal Técnico Prestador de Servicios Profesionales en el Cultivo de Maíz", FIRA-DERNAY. Tepic, Nayarit, México. 33p.

Zebiak, S. E., Orlove, B., Muñoz, A. G.; Vaughan, C., Hansen, J., Troy, T., Thomson, M. C., Lustig, A. and Samantha G. (2014), "Investigating El Niño-Southern Oscillation and society relationship", Netherlands, Climatic Change, doi: 10.1002/wcc.294.

DESASTRE Y VULNERABILIDAD: EL CASO DE DOS LOCALIDADES VERACRUZANAS AFECTADAS POR EL HURACÁN KARL Y LA TORMENTA TROPICAL MATTHEW

12

Desastre y vulnerabilidad: el caso de dos localidades veracruzanas afectadas por el huracán Karl y la tormenta tropical Matthew

Ana Cecilia Travieso Bello[1] ; Carlos Manuel Welsh Rodríguez[2] *; Carolina Andrea Ochoa Martínez[3]*

12.1. Resumen

Este trabajo analiza el impacto del huracán Karl y la tormenta tropical Matthew en dos localidades del municipio La Antigua. Además, compara la vulnerabilidad de ambas localidades mediante un índice de vulnerabilidad global, que incluye variables asociadas a la vulnerabilidad técnica, socioeconómica, educativa e institucional. Por último, contrasta la percepción de la población de las dos localidades acerca de los cambios en frecuencia e intensidad de los principales fenómenos hidrometeorológicos. La información se obtuvo a través de una encuesta. Se registraron impactos negativos en la mayoría de las viviendas, destacando las pérdidas de equipos electrodomésticos, muebles y techos, siendo más elevadas en La Antigua. También se registraron pérdidas en los cultivos y el ganado principalmente en Nicolás Blanco y en la infraestructura en La Antigua, así como en las vías de comunicación, destacando la carretera federal. Las afectaciones a la salud fueron comunes, destacaron las infecciones en la piel, vías respiratorias y alteración nerviosa. El índice de vulnerabilidad global es superior al 50 % en ambas localidades, siendo ligeramente mayor en La Antigua. Los tipos

1 Facultad de Economía, Universidad Veracruzana. Av. Xalapa s/n, Col. Obrero Campesino, CP 91020, Xalapa Enríquez, Veracruz, E-mail: atravieso@uv.mx.
2 E-mail: cwelsh@uv.mx.
3 E-mail: caochoa@uv.mx.
* Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad Veracruzana. Calle Francisco J. Moreno 207, Col. Emiliano Zapata, CP 91090, Xalapa Enríquez, Veracruz.

de vulnerabilidades que más contribuyen son: socioeconómica, institucional y educativa. En general, la población percibe un aumento de la frecuencia y sobre todo de la intensidad de los ciclones tropicales, vientos fuertes, lluvias intensas e inundaciones. Esta percepción es mucho mayor en Nicolás Blanco. Los resultados obtenidos contribuyen a la gestión integral del riesgo en estas localidades. La metodología propuesta puede ser aplicada a otras localidades afectadas por los fenómenos estudiados.

Palabras clave: Daños, índice de vulnerabilidad, percepción, La Antigua, Nicolás Blanco

12.2. Introducción

El riesgo se da por la interacción dinámica entre el peligro y la vulnerabilidad; es un proceso de construcción social, donde intervienen condiciones naturales, económicas y sociales, que determinan la organización y estructura de la sociedad, así como la exposición de la población (Narváez *et. al.*, 2009; Lavell, 2010). En este trabajo se consideran varios peligros que se encuentran asociados, estos son los fenómenos hidrometeorológicos siguientes: ciclones tropicales, lluvias intensas e inundaciones.

La vulnerabilidad es la susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador (CD, 2017). Esta ha sido clasificada por Wilches-Chaux (1989) en los siguientes tipos: vulnerabilidad ecológica, física, social, económica, política, institucional, educativa, técnica, ideológica y cultural. Este trabajo aborda principalmente las vulnerabilidades técnica, socioeconómica, educativa e institucional.

El desastre es la materialización del riesgo, resultado de la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores (naturales o antropogénicos) severos y/o extremos, que cuando acontecen en un tiempo y en una zona determinada, causan daños que exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada (CD, 2017), por tanto también es un proceso de construcción social.

A nivel mundial se ha observado un aumento significativo de los fenómenos hidrometeorológicos, en comparación con los geodinámicos (García, 2010). En México, los fenómenos hidrometeorológicos son los que causan mayores daños económicos por concepto de desastres, equivalentes al 43.8 % de los daños totales registrados (Bitrán, 2001). Los principales daños y los más recurrentes en México se asocian a los desastres asociados a ciclones tropicales (Sánchez y Cavazos, 2015), ya que México por su ubicación geográfica es afectado en las dos costas (Pacífico, Golfo de México y Caribe) por un promedio por 26 huracanes anuales. Estos fenómenos detonan lluvias torrenciales, intensas precipitaciones, que a su vez ocasionan inundaciones fluviales, costeras y deslaves de tierra (Brito y Pedrozo, 2015).

Las entidades federativas con mayor propensión a recibir lluvias extremas en invierno y en verano, así como las que más declaratorias de emergencia y de desastre registran anualmente son Tabasco y Veracruz (Sánchez y Cavazos, 2015). En el estado de Veracruz en las últimas décadas han ocurrido inundaciones importantes, destacando las de 1999, 2005 y 2010, asociadas a huracanes, tormentas y ciclones tropicales principalmente. Éstas han ocasionado pérdida de vidas, daños a los bienes, destrucción de cultivos, pérdida de ganado, la inutilización de infraestructura y deterioro de la salud, afectando las actividades cotidianas durante un período superior a la duración de la inundación (Travieso-Bello y Bocardo-Valle, 2011). Esta situación exige la atención inmediata, a través de la gestión integral el riesgo, definida como un proceso transversal al desarrollo, dinámico y holístico, encaminado a integrar un conjunto de acciones para la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos (Narváez *et. al.*, 2009; CD, 2017).

Este trabajo analiza el impacto de huracán Karl y la tormenta tropical Matthew en dos localidades del municipio La Antigua, a través de los daños registrados en la vivienda, las actividades económicas, la salud y las vías de comunicación. Además, compara la vulnerabilidad de ambas localidades mediante la integración de un índice de vulnerabilidad global que incluye variables asociadas a la vulnerabilidad técnica, socioeconómica, educativa e institucional. Por último, contrasta la percepción de la población acerca de los cambios en frecuencia e intensidad de los principales fenómenos hidrometeorológicos, con los daños registrados y la vulnerabilidad. Los resultados obtenidos contribuyen a la gestión integral del riesgo en estas localidades, sentando las

bases para el diseño de políticas públicas encaminadas a la prevención y mitigación de los riesgos por fenómenos hidrometeorológicos extremos. La metodología propuesta puede ser aplicada a otras localidades afectadas por los ciclones tropicales, lluvias intensas e inundaciones.

12.3. Huracán Karl y tormenta tropical Matthew

El huracán Karl fue el número 13 de la temporada 2010 de ciclones tropicales, tuvo su nacimiento el día 9 de septiembre en el arco de las Antillas como un sistema de baja presión, alcanzando la categoría de tormenta tropical el 14 de septiembre (Díaz Peón y Rivera Silva, 2011).

El primer impacto en tierra fue el 15 de septiembre a las 8:10 h en las costa de quintana Roo y cruzando por el sur de Champotón en las últimas horas del día. Durante las primeras horas del día 16 emergió de la sonda de Campeche donde encontró temperaturas superiores a 30 °C intensificado su magnitud a tal grado de convertirse en huracán categoría uno a las 13 horas; seis horas después ya era categoría dos y en las primeras horas del día 17 se intensificó convirtiéndose en huracán categoría tres (vientos entre 180 y 209 km/h) estando ya ubicado a las 7:00 h estaba a 80 km al noreste del puerto de Veracruz impactando entre las 11:00 y 11:40 h el ojo del huracán entre los municipios de La Antigua y el puerto de Veracruz (Díaz Peón y Rivera Silva, 2011), causando grandes pérdidas económicas y de vidas humanas principalmente en las partes bajas de las cuencas hidrológicas Jamapa-Cotaxtla y la Antigua (Pereyra Díaz *et. al.*, 2011).

Los vientos provocaron daños en la zona conurbada destrucciones en construcciones menores, pérdida de energía, así como destrucción significativa de la vegetación. Sin embargo la lluvia no fue tan intensa ni prolongada en la ciudad, pero en el sitio de entrada provocó daños mayores al arrasar zonas agrícolas, desprendimiento de árboles e inundaciones en las comunidades (Palma Grayeb *et. al.*, 2011).

Por su parte, la tormenta tropical Matthew tuvo su origen el 23 de septiembre como la depresión tropical No.15 cerca de la región central del Caribe, localizada a 1 390 km al Sureste de las costas de Chetumal, Quintana Roo, con vientos máximos sostenidos de 55 km/h. Ya a las 16 horas del mismo día se intensificó a tormenta tropical denominándose Matthew, localizándose a 1 260 km al Este-Sureste de Puerto Bravo, Quintana Roo, con vientos máximos sostenidos de 65 km/h, rachas de 85 km/h. Matthew fue otro sistema ciclónico más que tocó tierra en América Central en la temporada de Huracanes 2010, afectando Venezuela, Nicaragua, Honduras, Belice, El Salvador, Guatemala y México. En México ingresó como depresión tropical, pero afectó con lluvias torrenciales, inundaciones y deslaves en zonas montañosas. Sepultó cerca de 300 casas, afectando directamente los estados de Chiapas, Tabasco, Oaxaca y Veracruz. En esta última entidad, sus efectos se combinaron con los causados antes por el huracán Karl lo que empeoro los daños (Conagua, 2012).

12.4. Materiales y métodos

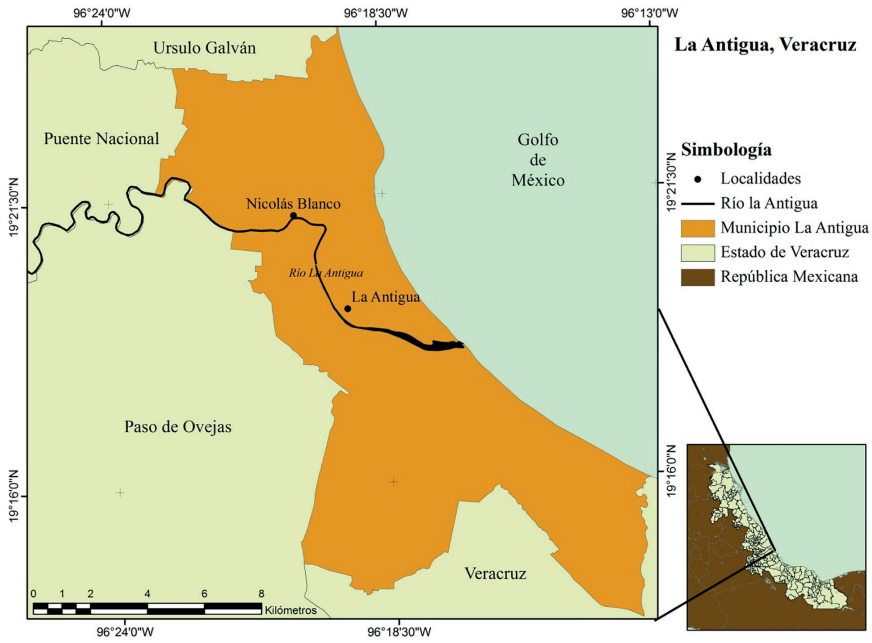
12.4.1.Área de estudio

El municipio La Antigua pertenece al estado de Veracruz, se ubica entre los paralelos 19° 13' y 19° 26' de latitud norte y los meridianos 96° 13' y 96° 24' de longitud oeste. Colinda con el municipio de Úrsulo Galván y el Golfo de México al norte; con el Golfo de México y el municipio de Veracruz al este; con los municipios de Veracruz y Paso de Ovejas al sur; con los municipios de Paso de Ovejas, Puente Nacional y Úrsulo Galván al oeste (Figura 1). Presenta un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, con un rango de temperatura de 24-26°C y precipitación 1 100-1 300 mm. Predominan el uso agrícola (34 %) y los pastizales (34 %); la zona urbana ocupa 3 por ciento del territorio, mientras que las selvas y otros tipos de vegetación solo alcanzan 15 y 11 por ciento, respectivamente (INEGI, 2009). En el año 2010 (INEGI, 2010) el municipio contaba con 25 500 habitantes, distribuidos en 34 localidades, de las cuales solo una era urbana (mayor a 2 500 habitantes).

Para este estudio se seleccionaron las dos localidades rurales más pobladas del municipio, que sufrieron afectaciones por el huracán Karl y la tormenta tropical Matthew,

las cuales son Nicolás Blanco y La Antigua (Figura 1, Cuadro 1). Ambas se ubican en una planicie, sobre depósitos de material fluvial no consolidado, junto al río La Antigua, en la cuenca del mismo nombre. La cobertura vegetal en las márgenes del río y en la cuenca en general, es escasa. Las actividades agropecuarias dominan la cuenca y se extienden hasta el margen del río, donde también se ubican viviendas y comercios. Estas localidades por su ubicación geográfica reciben frecuentemente los impactos de tormentas, ciclones tropicales e inundaciones fluviales.

El río La Antigua nace en la vertiente este de la Sierra Madre Oriental al norte del Pico de Orizaba, con el nombre de río Chichiquila. Se le unen diversos ríos que bajan del Cofre de Perote y cambia su nombre a río Jacomulco o Pescados. Luego continúa de oeste a este; recibiendo por su margen derecha a los ríos Santa María, Paso de Ovejas y San Juan. Posteriormente desembocando en el Golfo de México, formando la barra de la Antigua (Contreras, 2006). Este río se considera de respuesta rápida, debido a que cuando se presentan lluvias importantes en su cuenca, se producen avenidas súbitas que no permiten dar un seguimiento a su evolución, por tanto, no se pueden dar avisos con anticipación de más de 24 horas (SPCEV, 2014).



Gráfica 12.1. Localización del área de estudio.
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2005).

Cuadro 12.1. Características físicas y socioeconómicas de las localidades La Antigua y Nicolás Blanco.

Características física y socioeconómicas	Localidades estudiadas	
	La Antigua	Nicolás Blanco
Altitud (INEGI, 2010)	9 msnm	18 msnm
Altura promedio de la pared del canal del río (observación en campo)	1 m	5 m
Población total (INEGI, 2010)	988	1 092
Viviendas habitadas (INEGI, 2010)	282	315
Población económicamente activa (INEGI, 2010)	419	403
Población ocupada (INEGI, 2010)	426	410
Grado de marginación (Conapo, 2010)	Medio	Bajo

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2010), Conapo (2010) y datos propios obtenidos en campo

Se aplicó un cuestionario de manera directa a personas mayores de 18 años, preferentemente jefes de familia, habitantes de las localidades La Antigua y Nicolás Blanco, municipio La Antigua, que tienen su vivienda a una distancia del río menor a un kilómetro. La muestra se tomó al azar y correspondió al 20 por ciento de las viviendas, sin embargo, se descartaron dos por ciento de los cuestionarios debido a que la información estaba incompleta, quedando 53 en La Antigua y 58 en Nicolás Blanco.

El cuestionario se integró de las siguientes partes: 1) percepción sobre los cambios en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos más importantes para la zona (ciclones tropicales, vientos fuertes, lluvias intensas e inundaciones), 2) impactos del huracán Karl y la tormenta tropical Matthew, 3) Vulnerabilidad.

Se calculó el porcentaje de respuestas para cada localidad y por categorías de las variables correspondientes a los impactos del huracán Karl, la tormenta tropical Matthew y la vulnerabilidad, así como a la percepción sobre los cambios en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos.

Se utilizaron cuatro tipos de vulnerabilidad, las cuales se describen a continuación. La vulnerabilidad técnica considera las técnicas inadecuadas de construcción de viviendas e infraestructura que no les permiten resistir el impacto de los fenómenos peligros, así como la resistencia de los materiales de construcción empleados. La vulnerabi-

lidad social y económica se integró debido a que están estrechamente relacionadas, incluyendo los ingresos insuficientes que dificultan el acceso a los servicios básicos de salud y la posesión de bienes y servicios en la vivienda, así como la capacidad de la familia para prevenir, mitigar y responder a situaciones de desastres.

La vulnerabilidad educativa consideró las limitaciones en el nivel de escolaridad; la atención al pronóstico meteorológico, el conocimiento de la ubicación de los albergues y refugios, planes de contingencia y emergencia; así como la información recibida para prevenir y/o actuar en caso de ciclones, vientos fuertes, lluvias intensas e inundaciones.

Por último, la vulnerabilidad institucional incluyó la inacción del gobierno en la prevención y preparación ante fenómenos hidrometeorológicos, así como en las etapas de auxilio y recuperación del desastre.

Se construyeron cuatro índices de vulnerabilidad, considerando los distintos tipos (técnica socioeconómica, educativa y la institucional), mediante el promedio de los valores de las variables consideradas (Cuadro 2) en las localidades La Antigua y Nicolás Blanco. Posteriormente se calculó la vulnerabilidad global, mediante la sumatoria de las vulnerabilidades técnica, socioeconómica, educativa y la institucional, todas ponderadas por el mismo factor (0.25).

12.5. Resultados y discusión

12.5.1. Impactos del huracán Karl y la tormenta tropical Matthew

El análisis de impacto del huracán Karl y la tormenta tropical Matthew mostró afectaciones en más del 98% de las viviendas en ambas localidades, sin embargo, la pérdida total de la vivienda correspondió a 13.2 y 10.3 % en La Antigua y Nicolás Blanco, respectivamente. Los mayores daños y pérdidas fueron en los equipos electrodomésticos, muebles y techos, siendo superiores en La Antigua (Gráfica 12.2a).

Cuadro 12.2. Variables y criterios utilizados para el cálculo de cada tipo de vulnerabilidad.

Tipo de vulnerabilidad	Variable	Criterio de vulnerabilidad
Técnica	Material del techo de la vivienda	Viviendas con techo de cartón, lámina de plástico, zinc o asbesto, madera, teja, hojas de palma
	Material de las paredes de la vivienda	Viviendas con paredes de cartón, lámina de plástico, zinc o asbesto, madera, teja, hojas de palma
Socioeconómica	Acceso a drenaje en la vivienda	Viviendas sin acceso a drenaje
	Posesión de computadora	No posee computadora
	Posesión de vehículo propio	No posee vehículo
	Acceso a servicios de salud	No cuenta con derechohabiencia a los servicios de salud
	Acciones de la familia antes, durante y después de los fenómenos hidrometeorológicos peligrosos	La familia no realiza acciones antes, durante y después de los fenómenos hidrometeorológicos peligrosos
Educativa	Escolaridad	Escolaridad menor a secundaria terminada
	Información recibida para prevenir y/o actuar en caso de ciclones, vientos fuerte, lluvias intensas e inundaciones	No ha recibido información para prevenir y/o actuar en caso de ciclones, vientos fuerte, lluvias intensas e inundaciones
	Atención al pronóstico meteorológico	No escucha nunca el pronóstico meteorológico
	Conocimiento de la ubicación de albergues	Desconocimiento de la ubicación de albergues
	Conocimiento del plan de contingencia o emergencia	Desconocimiento del plan de contingencia o emergencia
Institucional	Acciones del gobierno de prevención y preparación	El gobierno no realizó acciones de prevención y preparación
	Acciones del gobierno de auxilio y recuperación	El gobierno no realizó acciones de auxilio y recuperación

Fuente: Elaboración propia

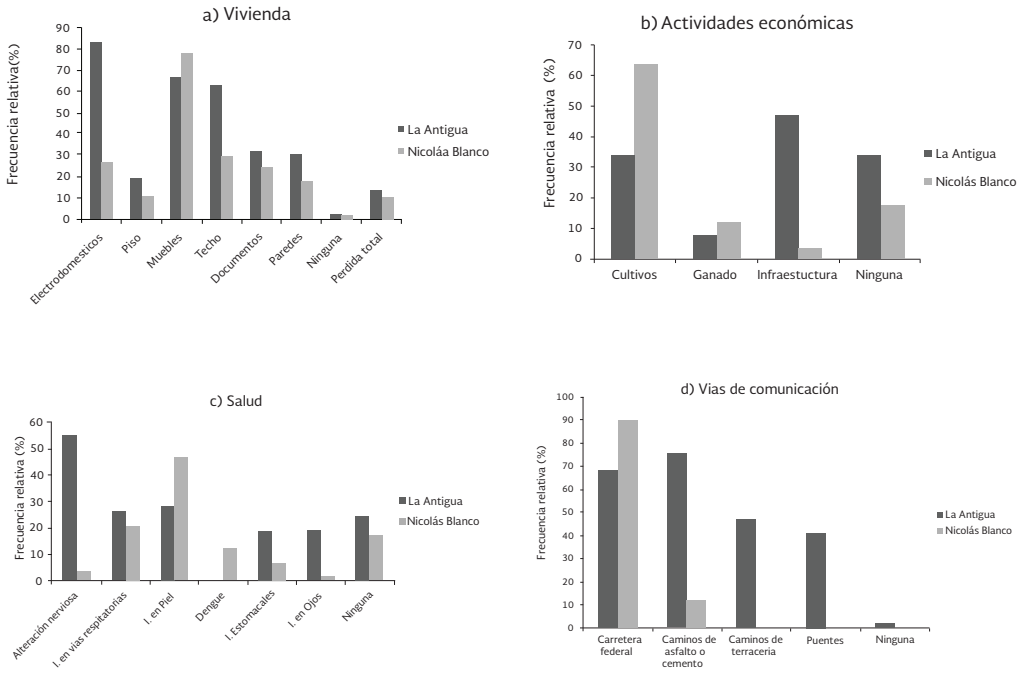
La mayoría de la población tuvo afectaciones asociadas a la actividad económica que desarrolla (La Antigua: 66.0%, Nicolás Blanco: 82.8%). Las pérdidas en cultivos (caña principalmente, en menor medida maíz, frijol y pasto) y ganado fueron mayores en Nicolás Blanco, mientras que las de infraestructura comercial fueron superiores en La Antigua, lo que responde a las actividades económicas que dominan en cada una de las localidades (Gráfica 12.2b).

La mayor parte de la población presentó afectaciones a la salud asociadas a los fenómenos estudiados (La Antigua: 75.5%, Nicolás Blanco: 82.8%). Destacan las afectaciones en la piel y en vías respiratorias en ambas localidades, mientas que la alteración

nerviosa ocupó el primer lugar en La Antigua y fue poco significativa en Nicolás Blanco. El dengue solo se registró en esta última localidad, posiblemente debido a que el proceso de limpieza y saneamiento postdesastre fue más lento (Gráfica 12.2c).

García y Bermúdez (2015) estudiaron el impacto psicológico por inundación en niños de 6 a 12 años de La Antigua, Veracruz, mediante la técnica del dibujo libre. Ellos encontraron que el desastre trajo consigo múltiples reacciones emocionales, cognitivas y físicas. Destacaron el dolor, la tristeza, el miedo, alteraciones del sueño, taquicardias, náuseas, vómito, diarrea, sobresaltos e hiperactividad.

La mayoría de la población registró afectaciones en las vías de comunicación (más de 98 % en ambas localidades), principalmente en la carretera federal. Además, solo se afectaron caminos de terracería y el puente en La Antigua, cabe mencionar que Nicolás Blanco no cuenta con puentes (Gráfica 12.2d). Esta situación ocasionó que ambas localidades quedaran incomunicadas, lo que retrasó la llegada de ayuda del exterior.



Gráfica 12.2. Impacto de Karl y Matthew en diferentes sectores: a) Vivienda, b) Actividades económicas, c) Salud, d) Vías de comunicación.
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo

Por otra parte, la mayoría (La Antigua: 100%, Nicolás Blanco: 86.2%) identificó cambios en el paisaje, principalmente pérdidas de árboles y modificaciones en el río.

12.6. Análisis de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad técnica se integró por las viviendas que presentaron paredes y techos de materiales poco resistentes. Se encontró en ambas localidades que la mayoría de las viviendas cuentan con paredes de tabique, ladrillo o piedra, por lo que la vulnerabilidad de esta variable es baja. En el caso de los techos, el material varía, dominó el concreto sobre las láminas de zinc o asbesto, observándose una mayor vulnerabilidad en La Antigua (Cuadro 12.3). No se registró infraestructura resistente a las inundaciones, ni obras de protección en ninguna de las localidades.

La vulnerabilidad socioeconómica incluyó algunos bienes y servicios con los que cuenta la vivienda, así como el acceso a los servicios de salud y las acciones llevadas a cabo por la familia antes, durante y después de las inundaciones asociadas a Karl y Matthew. Se encontró en ambas localidades que la mayoría de las viviendas no cuentan con acceso a drenaje, la posesión de computadora es muy limitada, mientras que la posesión de vehículos también es baja, siendo esta última menor en Nicolás Blanco. La mayor parte de las familias son derechohabientes de algún servicio de salud. Se identificó una mayor inacción ante la emergencia y el desastre en Nicolás Blanco. En general, en ambas localidades las familias no llevaron a cabo acciones de prevención, se limitaron principalmente a resguardar documentos, tratar de proteger sus bienes y a evacuar (Cuadro 12.3). Esto probablemente está asociado a la vulnerabilidad educativa que se describe a continuación.

La mayoría de los entrevistados en ambas localidades no cuenta con la secundaria terminada, desconocen la ubicación de los albergues, así como los planes de contingencia y emergencia, probablemente porque no han tenido acceso a información para prevenir y actuar en situaciones de emergencia asociadas a fenómenos hidrometeorológicos extremos (Cuadro 12.3). Aunque una buena parte escucha el pronóstico meteorológico, algunos no comprenden la totalidad de la información que se brinda,

limitándose su capacidad de respuesta. Todos estos aspectos integran la vulnerabilidad educativa, que se considera elevada en las dos localidades (Cuadro 12.4).

La vulnerabilidad institucional se analizó con base en las acciones llevadas a cabo por el gobierno antes (prevención y preparación) y después (auxilio y recuperación) del huracán Karl y la tormenta tropical Matthew. En ninguna localidad se registraron acciones preventivas y de preparación para dichos eventos (Cuadro 12.3). El gobierno actuó después del evento para el auxilio y la recuperación en ambas localidades, ofreciendo alimentos, apoyo en las actividades de limpieza, y dinero (vales) principalmente para la obtención de muebles y electrodomésticos. Esto último, coincide con lo que encontraron Sosa y Vázquez (2014) en el municipio La Antigua.

Solo en La Antigua pocos entrevistados (7.55 %) identificaron el inicio de la construcción postdesastre en dicha localidad de obras de protección, como son el muro de contención y el tapete de concreto. Sin embargo, La Antigua registró mayor vulnerabilidad institucional que Nicolás Blanco.

En general, la población manifestó que los apoyos no habían sido distribuidos de forma equitativa, ni en función de las pérdidas y necesidades que presentaba la población afectada. Mencionaron discriminación por pertenecer a un partido político distinto del que estaba en el poder, así como favoritismo hacia los familiares y amigos de las personas encargadas de distribuir los apoyos en las localidades.

Los resultados encontrados en este trabajo coinciden con Sánchez *et. al.* (2015) quienes plantearon que la atención al riesgo de los desastres en México tiene un enfoque correctivo y no preventivo. Además, Maldonado y González (2013) encontraron que pocos pobladores identifican medidas preventivas por parte de las autoridades, las cuales se limitan a avisar oportunamente ante los riesgos de un evento climático, preparar suficientes albergues y áreas de refugio para la población y, posterior al desastre, la entregar apoyos para la recuperación de algunas de sus pertenencias.

Esto no es congruente con la Ley General de Protección Civil (CD, 2017) que plantea en su artículo 10 que la gestión integral de riesgos incluye las fases anticipadas a la

ocurrencia de un agente perturbador, entre las cuales menciona las acciones y mecanismos para la prevención y mitigación de riesgos. Además, las autoridades de protección civil deberán actuar con inmediatez, equidad, profesionalismo, eficacia y eficiencia en la prestación del auxilio y entrega de recursos a la población en caso de emergencia o desastre (Artículo 5).

Cuadro 12.3. Criterios de vulnerabilidad evaluados para las localidades de La Antigua y Nicolás Blanco.

Tipo de vulnerabilidad y criterio VT: Vulnerabilidad Técnica, VS: V. Socioeconómica, VE: V. Educativa, VI: V. Institucional	Valor porcentual	
	La Antigua	Nicolás Blanco
VT: Viviendas con techo de cartón, lámina de plástico, zinc o asbesto, madera, teja, hojas de palma	54.72	31.03
VT: Viviendas con paredes de cartón, lámina de plástico, zinc o asbesto, madera, teja, hojas de palma	5.66	1.72
VS: Viviendas sin acceso a drenaje VS: No posee computadora	96.23 92.45	94.74 91.38
VS: No posee vehículo	52.83	65.52
VS: No cuenta con derechohabiencia a los servicios de salud	11.32	13.79
VS: La familia no realiza acciones antes, durante y después de los fenómenos hidrometeorológicos peligrosos	47.17	84.48
VE: Escolaridad menor a secundaria terminada	64.15	59.65
VE: No ha recibido información para prevenir y/o actuar en caso de ciclones, vientos fuertes, lluvias intensas e inundaciones	64.15	79.31
VE: No escucha el pronóstico meteorológico	1.89	1.72
VE: Desconocimiento de la ubicación de los albergues	50.94	67.24
VE: Desconocimiento de los planes de contingencia y emergencia	96.23	77.59
VI: El gobierno no realiza acciones de prevención y preparación	100	100
VI: El gobierno no realiza acciones de auxilio y recuperación	20.75	13.79

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo.

El índice de vulnerabilidad global mostró un valor ligeramente mayor en La Antigua en comparación con Nicolás Blanco. Los tipos de vulnerabilidades que más contribuyen en las dos localidades son la socioeconómica, la institucional y la educativa (Cuadro 12.4). Esto pudiera relacionarse con la vulnerabilidad ideológica, que alude a la pasividad, fatalismo, presencia de mitos, que limita la posibilidad de enfrentar los problemas (Wilches-Chaux, 1989). En este sentido, Marinero y García (2014) encontraron que los pobladores adultos del municipio de La Antigua, Veracruz, afectados por el huracán Karl en 2010, adjudican los desastres a las fuerzas naturales, espirituales o

religiosas. Por tanto, no reconocen la responsabilidad de las autoridades encargadas de elaborar políticas públicas en la materia, ni la falta de previsión social y personal frente los daños ocasionados por estos fenómenos.

Cuadro 12.4. Índice de vulnerabilidad por tipo y global para las localidades de La Antigua y Nicolás Blanco.

Tipo de vulnerabilidad	Índice de vulnerabilidad	
	La Antigua	Nicolás Blanco
Técnica	30.19	16.38
Socioeconómica	60.00	69.98
Educativa	55.47	57.10
Institucional	60.38	56.90
Global	51.51	50.09

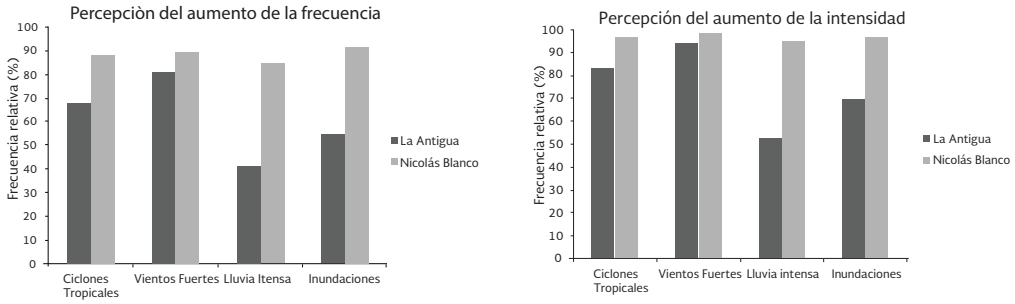
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo

12.7. Percepción sobre los cambios en la frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos

La mayoría de los habitantes de la zona perciben un aumento en la frecuencia de los cuatro fenómenos hidrometeorológicos estudiados, observándose una mayor percepción de dicho aumento en Nicolás Blanco, donde para todos los fenómenos se registró un aumento en la frecuencia mayor a 84 %. En el caso de La Antigua el mayor porcentaje correspondió a vientos fuertes, mientras que en Nicolás Blanco, a las inundaciones (Gráfica 12.3).

La percepción del aumento de la intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos en todos los casos y en ambas localidades, es mayor a la percepción del aumento en la frecuencia; los valores más elevados se registraron en Nicolás Blanco, donde más del 94% de la población percibe un aumento en la intensidad de los cuatro fenómenos. El fenómeno que se percibe ha aumentado en mayor proporción su intensidad son los vientos para ambas localidades (Gráfica 12.3).

La mayor diferencia entre las localidades estudiadas en cuanto a la percepción del aumento de la frecuencia y la intensidad se presentó para las lluvias intensas, siendo mucho más baja en La Antigua (Gráfica 12.3).



Gráfica 12.3. Percepción de la población de las localidades La Antigua y Nicolás Blanco acerca del aumento en la frecuencia y la intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo

Los resultados obtenidos coinciden con los encontrados por Maldonado y González (2013) en tres localidades del centro de Veracruz afectadas frecuentemente por fenómenos hidrometeorológicos extremos (una de ellas, Nicolás Blanco), donde 77 por ciento de los entrevistados reconocen un incremento en la intensidad de los huracanes.

12.8. Conclusiones y recomendaciones

Las principales pérdidas en la vivienda en ambas localidades fueron muebles, electrodomésticos y techos, mientras que en las actividades productivas fue la agricultura, destacando los cultivos de caña. Las principales afectaciones a la salud fueron infecciones en la piel y vías respiratorias, así como alteración nerviosa. Los daños en carreteras y caminos mantuvieron incomunicadas a ambas localidades, lo que retrasó la llegada de apoyos por parte del gobierno.

La vulnerabilidad técnica se presentó principalmente por la presencia de techos de materiales poco resistentes, así como la ausencia de obras de protección y de infraestructura para proteger contra las inundaciones.

Por otra parte, la vulnerabilidad socioeconómica en ambas localidades se debe al limitado acceso a drenaje, computadora y vehículo. Destaca la inacción de las familias ante la emergencia, limitándose a resguardar documentos, tratar de proteger sus bienes y a evacuar. No se registraron acciones preventivas. Esto probablemente se asocie a la vulnerabilidad educativa ocasionada por el bajo nivel escolar, así como el desconocimiento de planes de contingencia y emergencia y de la ubicación de los albergues. Por tanto, se recomienda brindar información y realizar simulacros que preparen a la población para enfrentar las emergencias por fenómenos hidrometeorológicos y disminuir los posibles daños.

Además, el gobierno no implementó acciones preventivas, ni de preparación en ninguna de las localidades, solo actuó después del desastre en las fases de auxilio y recuperación. El apoyo se limitó a alimentos, limpieza y dinero para la obtención de muebles y electrodomésticos, principalmente. Por ello, se sugiere analizar la factibilidad de implementar medidas preventivas estructurales y no estructurales que disminuyan los riesgos por fenómenos hidrometeorológicos extremos.

El índice de vulnerabilidad global en ambas localidades es superior al cincuenta por ciento, siendo ligeramente mayor en La Antigua. Los tipos de vulnerabilidades que más contribuyen son la socioeconómica, la institucional y la educativa.

En general, más del cincuenta por ciento de la población de las dos localidades percibe un aumento en la frecuencia y sobre todo en la intensidad de los ciclones tropicales, los vientos fuertes y las inundaciones. Sin embargo, esto debe contrastarse con los datos climáticos reales de las estaciones meteorológicas y las declaratorias de emergencia y de desastre, registradas para el municipio La Antigua.

Los resultados obtenidos plantean un conjunto de retos tanto para la población como para el gobierno, entre ellos destacan la corresponsabilidad de ambos en la gestión integral del riesgo, la necesidad de información y capacitación en esta materia, así como la implementación de acciones preventivas y el desarrollo de capacidades adaptativas. Estos aspectos pueden transformarse en acciones y estrategias que incidan en las políticas municipales y estatales de protección civil para la gestión integral de

riesgos. Se debe enfatizar en la atención de los aspectos educativos, que pueden contribuir a mejorar la respuesta de la población.

El índice de vulnerabilidad propuesto en este trabajo puede ser aplicado a otras localidades afectadas por los ciclones tropicales, lluvias intensas e inundaciones, sin embargo, se deben considerar los costos asociados al trabajo de campo. La información requerida puede agregarse a los formatos utilizados para el registro de daños.

12.9. Referencias

Bitrán Bitrán, D. (2001). *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99.Secretaría de gobernación y centro nacional de prevención de desastres.* México: CENAPRED.

Brito Castillo, L., & Pedrozo Acuña, A. (2015). Inundaciones, heladas e incendios forestales. En T. Cavazos, *Conviviendo con la naturaleza* (págs. 80-113). Tijuana. B.C., México: ILCSA.

Cámara de Diputados (2017). Ley General de Protección Civil. *Diario Oficial de la Federación,23 de junio de 2017*. México.

CONAPO (Consejo Estatal de Población). (2012). Índice de marginación por localidad 2010. México.

Conagua (Comisión Nacional del Agua (2012). Análisis de las temporadas de huracanes de los años 2009, 2010 y 2011 en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Contreras Espinosa, F. (2006). Lagunas costeras de Veracruz. En P. Moreno Casasola, E. Peresbarbosa Rojas, & A. Travieso Bello, *Estrategia para el manejo costero integral* (págs. 205-228). Xalapa, Veracruz, México: Instituto de Ecología.

García García, G., & Bermúdez Jiménez, F. (2015). Impacto psicológico por inundación en niños de la antigua, Veracruz, México. *RICSH Revista Iberoamericana de las Ciencias Sociales y Humanísticas*, s.p.

García, J. (2010).Marco internacional y discusión de los conceptos de gestión del riesgo y adaptación al cambio climático. En Perú. Ministerio de Economía y Finanzas; Perú. Gobierno Regional de Piura; NU. Estrategia Internacional para la Reducción a Desastres (NU/EIRD); Deutsche Gessellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Edits. Lecciones

Aprendidas de la Gestión del Riesgo en Procesos de Planificación e Inversión para el Desarrollo. 19/22 de julio de 2010. Lima, Perú. Cooperación Alemana al Desarrollo – Agencia de la GIZ en el Perú. pp. 27-29.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2005). Información Topográfica Digital Escala 1: 250 000 serie III. México.Zona de los archivos adjuntos.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, La Antigua, Veracruz de Ignacio de la Llave. México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2010). Censo de Población y Vivienda 2010.Resultados definitivos. México.

Lavell, A. (2010). La integración de la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático en los procesos de inversión pública y planificación a nivel regional y mundial. En: Perú. Ministerio de Economía y Finanzas; Perú. Gobierno Regional de Piura; NU. Estrategia Internacional para la Reducción a Desastres (NU/EIRD); Deutsche Gessellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) edits. Lecciones Aprendidas de la Gestión del Riesgo en Procesos de Planificación e Inversión para el Desarrollo, 19/22 de julio de 2010. Lima. Perú, Cooperación Alemana al Desarrollo – Agencia de la GIZ en el Perú, pp. 30-31.

Luna Díaz Peón, A., & Rivera Silva, D. (2011). Los ciclones tropicales en el estado de Veracruz y sinopsis del huracán Karl. En A. Tejeda Martínez, *Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz, Memoria social y medio físico* (págs. 69-110). México: Editor COVECYT y Universidad Veracruzana.

Maldonado González, A. L., & González Gaudiano, É. J. (2013). De la resiliencia comunitaria a la ciudadanía ambiental, El caso de tres localidades en Veracruz, México. *Integra Educativa*, 13-28.

Marinero Heredia, A., & García Oramas, M. J. (2015). El huracán Karl: concepciones sobre su origen en una comunidad de Veracruz. *Ciencia Ergo Sum*, 19-29.

Narváez, Lizardo, A., & Pérez Ortega, G. (2009). *La Gestión del Riesgo de Desastres, Un enfoque basado en procesos.* Lima, Perú: Comunidad Andina Editorial.

Palma Grayeb, B., Morales Cortez, R., & Díaz Gutiérrez, D. (2011). Actualización de envolventes de probabilidad empírica de impacto de ciclones a cuatro puertos del Golfo de México y la antelación de riesgo. En A. Tejeda Martínez, *Las inundaciones de 2010 en Veracruz, La biósfera, escenarios y herramientas* (págs. 287-303). México: Editor COVECYT y Universidad Veracruzana.

Pereyra Díaz, D., Cervantes Pérez, J., Hoyos Reyes, C., & Agustín Pérez Sesma, J. (2011). Escurrimiento generado por el huracán Karl: Una primera estimación. En A. Tejeda Martínez, *Inundaciones 2010 en el estado de Veracruz* (págs. 152-174). México: Editor COVECYT y Universidad Veracruzana.

Sánchez Rodríguez, R., & Cavazos, T. (2015). Amenazas naturales, sociedad y desastres. En T. Cavazos, *Conviviendo con la naturaleza* (págs. 2-41). Tijuana. B.C., México: ILCSA.

Sánchez Rodríguez, R., Cavazos, T., & Morales Santos, A. (2015). "Plan estratégico nacional para la prevención y la reducción del riesgo a desastres asociados a eventos hidrometeorológicos y climático en México. En T. Cavazos, *Conviviendo con la naturaleza* (págs. 124-143). Tijuana. B.C., México: ILCSA.

Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz. (2014). Recomendaciones y medidas preventivas de protección civil, temporada de lluvias y ciclones tropicales 2014 en el Estado de Veracruz para las autoridades municipales. México.

Sosa, D. M., & Vázquez, V. (2014). Vulnerabilidad diferenciada por género, clase y edad. El impacto del huracán Karl en la Antigua, Veracruz. En D. Soares, G. Millán, & I. Gutiérrez, *Reflexiones y expresiones de la vulnerabilidad social en el sureste de México* (págs. 186-207). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Travieso Bello, A., & Bocardo Valle, A. (2011). Gestión de riesgos por fenómenos naturales: una prioridad para el desarrollo regional sustentable en el estado de Veracruz, México. En A. Sánchez Almanza, & L. León Tadeo, *16° Encuentro Nacional Sobre Desarrollo Regional en México, AMECIDER 2011* (págs. 1-17). México: Asociación Mexicana De Ciencias Para El Desarrollo Regional, A. C.

Wilches Chaux, G. (1989). *Tomado de Desastres, ecologismo y formación profesional: herramientas para la crisis.* Popayán: Servicio Nacional de Aprendizaje.

LA HISTORIA AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA EN EL MANEJO DE RIESGO DE INUNDACIÓN: EL CASO DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

13

La historia ambiental como herramienta en el manejo de riesgo de inundación: el caso de Ensenada, Baja California, México

Carlos Figueroa Beltrán[1]*; Alejandro García Gastelum[2]*

13.1. Resumen

Actualmente, el tema ambiental ha dado paso a una visión de creciente complejidad, que demanda nuevas formas de colaboración e interacción entre las ciencias humanas y las naturales, lo que ha permitido el surgimiento de la historia ambiental, que es la historia de los fenómenos naturales y del ambiente biofísico en su relación con la sociedad. Lo que denominamos medio ambiente es sólo una fracción de la realidad natural, construida o captada por nuestros sentidos. Es por lo tanto una construcción social y su percepción y comprensión se transforma históricamente a partir de los valores, creencias y costumbres de la sociedad. En el caso del riesgo por inundación, el papel de la historia ambiental es crucial. En este trabajo se presenta la manera en que se ha articulado la historia ambiental como aproximación metodológica en el estudio del riesgo por inundación en Ensenada, Baja California, bajo una perspectiva interdisciplinaria que propone la aplicación de un programa de manejo integral del riesgo donde las causas de los desastres sean el eje primordial en la política pública ante los riesgos de origen hidrometeorológico y climático. Las conclusiones muestran que la ausencia de memoria histórica en la población de Ensenada y las fallas institucionales en los tres niveles de gobierno han sido factores

1 E-mail: carlosfigueroa@uabc.edu.mx
2 E-mail: agarcia@uabc.edu.mx
* Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada. Carretera Transpeninsular Ensenada - Tijuana 3917, Zona Playitas, 22860 Ensenada, B.C.

importantes en el aumento de la vulnerabilidad ante los escenarios ambientales actuales.

Palabras clave: historia ambiental, desastres, construcción social, riesgo y vulnerabilidad.

13.2. Introducción

El surgimiento y consolidación de lo que se conoce como historia ambiental en el mundo se encuentra ligado al interés por el tema del deterioro ambiental y a su concepción como uno de los ejes principales del desarrollo económico. Si bien la preocupación sobre las consecuencias de la interacción entre la naturaleza y la sociedad se remonta a los pensadores griegos y romanos, la discusión organizada a nivel internacional se inició con el agudizamiento de la problemática ambiental a partir de la década de los 70.

El hombre, que en tiempos de la agricultura primitiva formaba parte de la naturaleza, en la Edad Media se convierte en su explotador, al desarrollar técnicas agrícolas que cambiaban drásticamente la relación del hombre con la tierra.

A pesar de que el paradigma antropogénico parecía inamovible, las pruebas indiscutibles de que el hombre había operado cambios no deseados en la naturaleza eran evidentes; la deforestación era seguida por las inundaciones y por la erosión del suelo. Adam Smith (1776) en *La Riqueza de las Naciones* sugirió la posibilidad de que la riqueza producida por una nación creciera sin límites y junto con ella, el bienestar de la población.

Durante el siglo XIX, diversos autores a manera de denuncia, señalan el proceder incorrecto del hombre sobre la naturaleza. El desarrollo de la tecnología atómica durante la Segunda Guerra Mundial dejó claro que el hombre se había transformado en una fuerza geológica planetaria, lo que creó una gran preocupación en la comunidad científica por la problemática ecológica, no solo entre naturalistas y biólogos, dando inicio con la discusión abierta sobre el deterioro ambiental. La obra *Los límites del crecimiento* realizada por encargo del Club de Roma (Meadows *et. al.*, 1972) sintetiza la preocupación de los países industrializados por la fragilidad del planeta, para lo que había

que buscar una salida al crecimiento económico que había menoscabado los recursos naturales.

Con esos antecedentes, las Naciones Unidas en 1972 organizó en Estocolmo la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo donde se incluye por primera vez en la agenda política internacional el tema ambiental, resaltando los límites del modelo actual de crecimiento económico y del uso de los recursos naturales. Posteriormente en la década de los ochenta, bajo la presidencia de Gro Brundtland, la Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente publicó un informe denominado "*Nuestro Futuro Común"* o *"Informe Brundtland"*, en el que se propuso oficialmente el concepto de Desarrollo Sustentable como "el desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad para que las futuras generaciones puedan satisfacer sus propias necesidades" (United Nations, 1987). Aquí se reconoce que la pobreza es la mayor causa y efecto de los problemas ambientales y se sostiene que el desarrollo económico y el medio ambiente no necesariamente son incompatibles sino más bien son complementarios.

El punto culminante de este movimiento es el consenso internacional de que el desarrollo sustentable incorpora una perspectiva de largo plazo en el manejo de los recursos naturales, ya no para su "explotación", sino para su "manejo" integral. Asimismo, resalta la necesidad de la solidaridad hacia las actuales y hacia las futuras generaciones.

En la Cumbre de Río de Janeiro por el Medio Ambiente y el Desarrollo organizada en junio de 1992 se planteó el concepto de desarrollo sustentable para el siglo XXI a través de la Agenda 21 (United Nations, 1992) como un Plan de Acción para el Desarrollo Sustentable, basado en recomendaciones enfocadas a la posibilidad de hacer operativo el desarrollo sustentable a través de los gobiernos locales, como ejes rectores de su implementación, con base en la integración, con criterios sostenibles, de las políticas ambientales, económicas y sociales del municipio, y que debe surgir de la participación y toma de decisiones consensuadas entre los representantes políticos, personal técnico municipal, agentes implicados y ciudadanos del municipio para cubrir temas como drenajes, océanos, atmósfera, desertificación, pobreza, residuos radiactivos y tóxicos, biodiversidad y población.

13.3. El surgimiento de la historia ambiental

El estudio de la interacción que tiene lugar entre la especie humana y el ambiente biofísico tiene muy antiguos precursores. Como se ha comentado, la problemática no es nueva aunque sí muy actual. En el ámbito de la historiografía contemporánea, los trabajos de la escuela de los Annales han sido citados como el origen por los principales autores dedicados a los temas ambientales. El libro "La tierra y la evolución humana", publicado en 1922 por Lucien Febvre (1949) es una obra pionera que en aún en la actualidad se encuentra vigente.

El surgimiento de la historia ambiental viene acompañado por Fernand Braudel quien argumentó en contra del determinismo geográfico y en favor del posibilismo, una idea que da a la naturaleza un papel como agente de la historia, pero en interrelación con las actividades humanas. Para Fernand Braudel, discípulo de Febvre los tiempos largos de la naturaleza o "capas de historia lenta" se entrelazaban con las duraciones, algunas completamente breves, de la historia de los eventos humanos (Braudel, 1958). La naturaleza pasaba a ser, entonces, un agente activo de la historia.

El surgimiento formal de la Historia Ambiental se da en el marco de la Cumbre de Estocolmo en 1972, cuando se hacen evidentes las terribles consecuencias que sobre la especie humana tiene el deterioro ambiental. Diversos cuestionamientos surgen desde la perspectiva de la historia ambiental, todos ellos emanados de la relación sociedad–naturaleza: ¿cómo hemos llegado al estado actual de cosas? ¿Han existido sociedades capaces de vivir de manera sustentable? ¿Podremos alcanzar en el mundo el desarrollo sustentable? La búsqueda de estas respuestas ha permitido la articulación cada vez más recurrente de la historia ambiental en el abordaje de problemáticas desde otras áreas del conocimiento bajo un enfoque interdisciplinario.

La *American Society for Environmental History* surge en 1976 como la primera escuela de historiadores ambientales y posteriormente aparece la *European Society of Environmental History*. En América Latina, la *Sociedad Latinoamericana y Caribeña de Historia Ambiental* se forma en 2003.

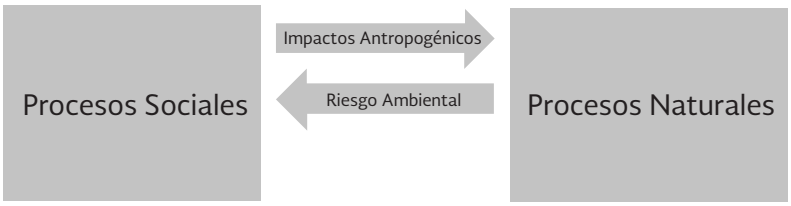
13.4. Aportaciones de la historia ambiental

La historia ambiental penetra en la problemática ambiental desde un abordaje histórico-social que nos compromete en lo ético y en el social, ya que esta perspectiva no sólo enriquece nuestra comprensión del pasado, pero igualmente importante es el hecho de que supone un aporte de ideas para la resolución de los dilemas y conflictos del presente y nos proyecta hacia el futuro, en el marco del desarrollo sustentable. La historia ambiental es la historia de los fenómenos naturales, de plantas y animales en su relación con los grupos humanos. Lo que denominamos medio ambiente es sólo una fracción de la realidad natural, construida o captada por nuestros sentidos. Es por lo tanto una construcción social y en este sentido su percepción y comprensión se transforma históricamente a partir de los valores, creencias y costumbres de la sociedad. Por tanto, la relación que se establezca entre los grupos humanos y los elementos del ambiente circundante como los ríos, montañas, playas, vegetación y fauna estará determinada por la cosmovisión del grupo, de su entrelace histórico con el ambiente.

La historia ambiental se ha ido posicionando como la especialidad histórica de mayor y más rápido crecimiento en los últimos 20 años. Desde su conformación, se ha transformado profundamente, pasando de simples análisis descriptivos a propuestas teórico-metodológicas interdisciplinarias, logrando explicar cada vez mejor la compleja gama de componentes que conforman las relaciones sociedad-naturaleza. Por ello es usual que la investigación de la historia ambiental se lleve a cabo en el marco de proyectos en los que no era común que la historia fuera considerada de alguna utilidad; por ejemplo, en estudios técnicos justificativos para proponer la conservación de ciertos territorios, o en estudios de diagnóstico para la planeación del desarrollo sustentable, y muy recientemente en el manejo del riesgo.

La articulación metodológica de la historia ambiental como herramienta en la planeación y manejo es muy reciente, aunque las referencias a los temas ambientales son antiguas. En la historia aparecen cuando se trata de acontecimientos de corta duración, como pueden ser los eventos naturales, como un terremoto o un fenómeno de origen hidrometeorológico o climático. Pero bajo la perspectiva de la historia

ambiental, con profundidad histórica es posible analizar los eventos de "historia corta" como lo definió Fernand Braudel para la acumulación de impactos negativos y positivos, como también sus efectos concretos sobre la naturaleza y sobre la sociedad. Cuando los eventos catastróficos permiten la construcción de la memoria colectiva en una comunidad, entonces aparece el tiempo largo –*longue durée*- donde la memoria colectiva se convierte en la construcción de la verosimilitud del propio grupo (Le Goff, 1991). Lo anterior se articula bajo una relación de bi-direccionalidad, donde los procesos sociales repercuten en la naturaleza y esta a su vez incide sobre la sociedad, lo que da como resultado el riesgo ambiental (Gráfica 13.1).



Gráfica 13.1. Relación de bi-direccionalidad entre los procesos sociales y naturales

13.5. La historia ambiental en el manejo integral del riesgo ambiental (mira)

En el caso de los eventos de origen natural, estos se transforman en desastre sólo si afecta al ser humano, pero bajo esta premisa los desastres no pueden ser naturales, como lo definió atinadamente Wilches-Chaux (2007), sino que surgen de la interacción con una población vulnerable. La vulnerabilidad representa una vinculación clave entre eventos por amenazas naturales y el estado de desarrollo económico y social de una región o país. Factores como la pobreza, la inequidad social, la corrupción, la calidad de la infraestructura crítica y la degradación ambiental, representan al insumo principal para que se presente el desastre.

Los desastres recurrentes son producto de una construcción social del riesgo, por lo que en ese mismo marco social debe integrarse el manejo del riesgo, a partir del diseño de un programa de *manejo integral del riesgo*, que denominaremos MIRA, el cual

nos permite contar con un modelo integral que se adapta a las dinámicas biofísicas, sociales, culturales, políticas y económicas que se encuentran en constante cambio, que además debe ser participativa y que se adapte dinámicamente a la construcción del riesgo y de su manejo.

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) señala en sus compromisos internacionales hacia la sostenibilidad que la educación es el espacio donde se forman la conciencia, los valores, conocimientos y praxis sociales. Por lo que es indispensable crear la Educación para la Sostenibilidad, en la cual incluir la dimensión de la gestión de riesgos de desastres. Ya que los desastres no son "accidentes", producto de la casualidad, sino que son riesgos carentes de manejo o vulnerabilidades no atendidas, deben verse como problemas ambientales del desarrollo no resueltos, debido a que surgen de procesos socioculturales, políticos, de crecimiento económico y de protección de los recursos naturales.

El MIRA incluye aspectos que el manejo convencional no contiene. Enfatiza en la causa de los desastres, más que en sus efectos, reconociendo el riesgo como un proceso social, histórico, dinámico y diferenciado. La mayoría de especialistas apuntan a que existe una relación entre los modelos de desarrollo y la degradación ambiental con la ocurrencia de desastres. Por ello el MIRA busca el desarrollo y fortalecimiento de capacidades de gobiernos locales y regionales, autoridades ejidales y tradicionales y pobladores, para impulsar la gestión local adaptativa, con un enfoque participativo, informado y descentralizado que permita una integración más efectiva de la problemática ambiental en la política pública a nivel local y regional, como lo establecen los principios de la Agenda 21 de la Cumbre de la Tierra de Rio de 1992.

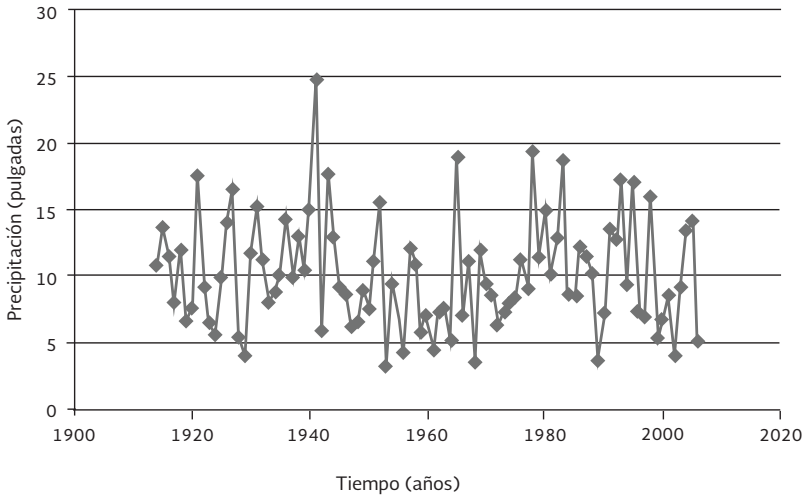
13.6. La historia ambiental en el manejo del riesgo por inundaciones

En el caso concreto del riesgo por inundación, el papel de la historia ambiental es central, ya que la ocurrencia de eventos catastróficos se presenta de manera cíclica con una gran profundidad histórica, que han permitido la formación de registros históricos,

geológicos y ecológicos que nos hablan de los impactos y su intensidad de este fenómeno sobre la sociedad y sobre el medio biofísico.

El fenómeno del cambio climático está relacionado con los desastres, especialmente con las inundaciones, que han registrado un importante aumento en su frecuencia y severidad en décadas recientes. En el 2011 se presentaron 302 desastres que produjeron 300,000 muertos, 206 millones de personas afectadas y se calcula que el coste de los desastres ocurridos en las dos últimas décadas supera los dos mil millones de dólares (Clark, 2012).

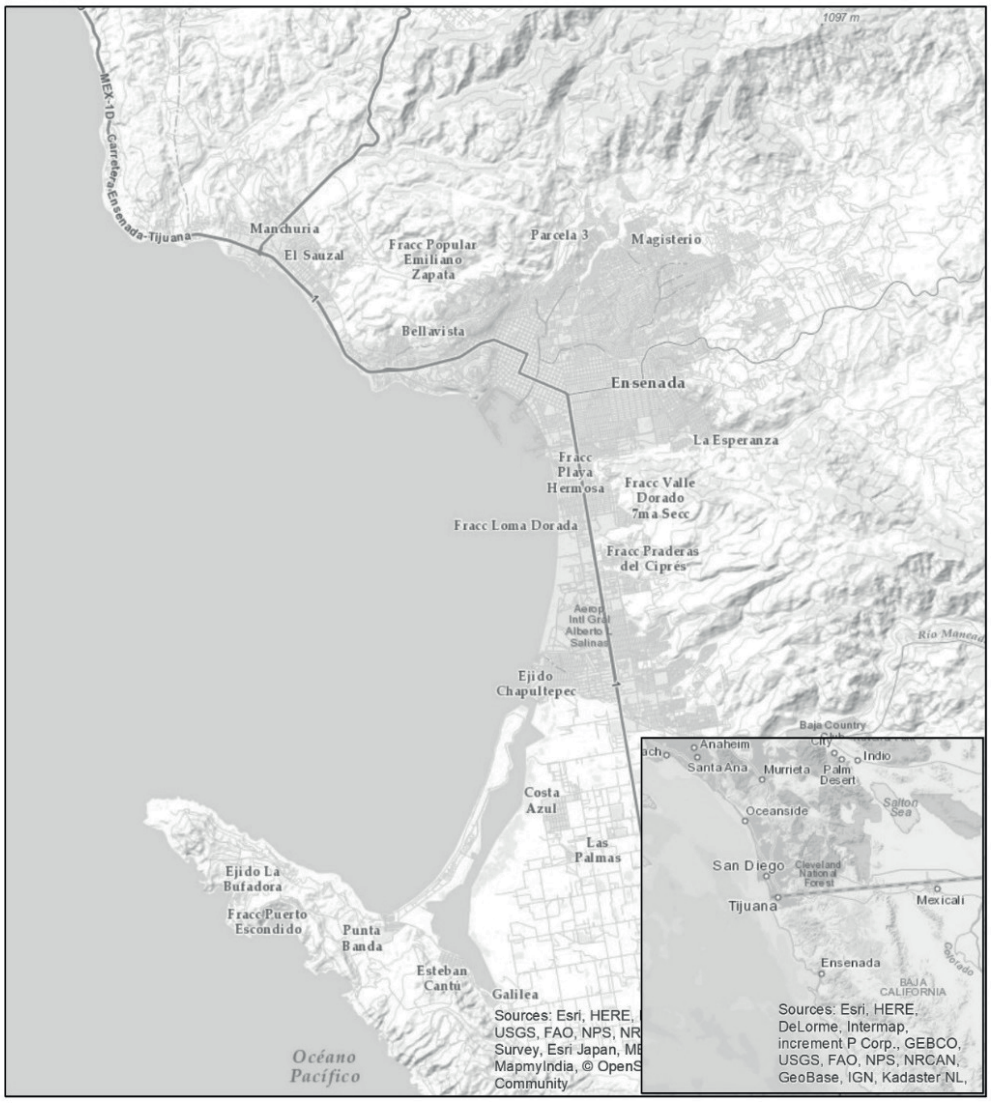
En la región de California-Baja California, los registros históricos de precipitación anual disponibles de 1914 a 2005 muestran una tendencia ascendente, lo que ha generado lluvias torrenciales que se han transformado en desastres en algunos años del siglo pasado (Gráfica 13.2).



Gráfica 13.2. Promedio de precipitación anual de 1914-2005 para la región de San Diego, CA. (FUENTE: NOAA-National Weather Service Forecast Office, en línea).

13.7. Materiales y métodos

En este trabajo se presenta la manera en que se ha articulado la historia ambiental como aproximación metodológica en el estudio del riesgo por inundación en la ciudad de Ensenada bajo una perspectiva interdisciplinaria (Gráfica 13.3).



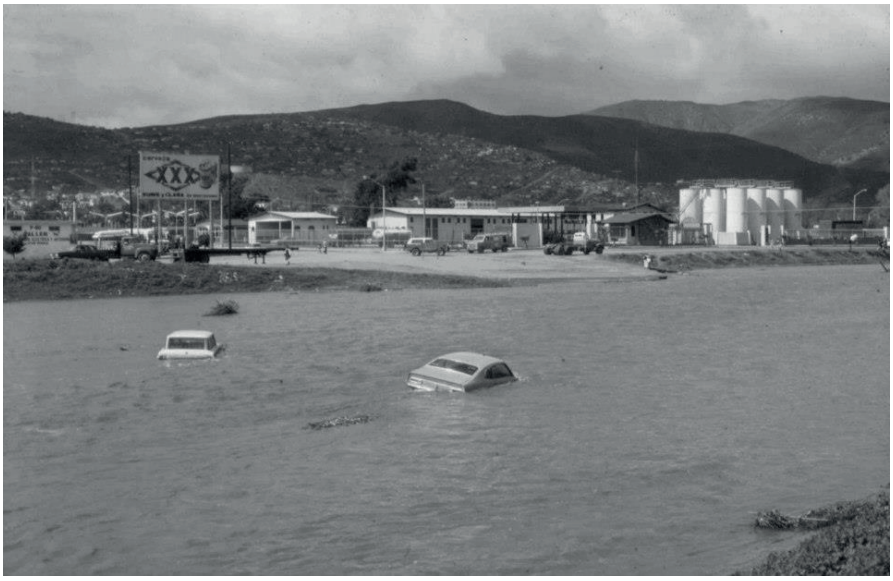
Gráfica 13.3. Mapa de Ensenada en la región fronteriza California-Baja California, elaborado por Alejandro García Gastelum.

Bajo el enfoque del Manejo Integral del Riesgo Ambiental, se llevó a cabo el trabajo de campo para conocer la percepción ambiental sobre el riesgo de inundación en habitantes localizados en una zona de riesgo junto al arroyo El Aguajito, identificada en estudios previos. Es de resaltar, que la mayoría de estudios de riesgo no incorporan la percepción social del riesgo, por lo que es necesario responder al riesgo desde la visión misma de la sociedad y de los grupos vulnerables a partir de la participación social desde la perspectiva local.

Otra fase del estudio consistió en la consulta a la hemeroteca del periódico más antiguo de la localidad para conocer los hechos reportados desde la visión de un medio de comunicación de la época durante las inundaciones en esa zona.

Además, se realizó una búsqueda de los documentos existentes en el Archivo Histórico de Ensenada y se obtuvieron importantes registros orales de personas clave en los pasados eventos de inundación.

Estos registros históricos nos han permitido saber que las inundaciones en el pasado han representado verdaderas catástrofes que han arrojado cuantiosas pérdidas humanas y materiales, como es el caso de la inundación de marzo de 1978 (Gráfica 13.4).



Gráfica 13.4. Inundación de marzo de 1978, Salvador Farreras, 1978, archivo particular.

13.8. Resultados

A pesar de que los registros históricos contenidos en archivos y hemerotecas mencionan que hubo 7 personas fallecidas durante esta inundación, las entrevistas con personas clave apuntan a que en realidad fueron alrededor de 50 las personas fallecidas, lo que lo coloca en el peor desastre en la historia reciente de Ensenada. Una fotografía tomada posteriormente al desbordamiento del arroyo "El Aguajito" muestra

sobre la pared de una vivienda que el nivel de la avalancha de lodo sobrepasó el metro y medio de altura (Gráfica 13.5).

Gráfica 13.5. Se observa el nivel del agua sobre la pared, Salvador Farreras, 1978, archivo particular.

La comparación de nuestros resultados de campo con las gráficas de precipitación, las notas periodísticas, los registros fotográficos y la historia oral nos permiten conocer que a pesar de la magnitud del evento, la memoria histórica se encuentra sólo presente en la gente de edad avanzada, que vivió dicho evento y ha resultado significativo durante toda su vida. Ensenada es una ciudad fronteriza y en las últimas décadas han llegado miles de inmigrantes que desconocen los desastres que han existido en el pasado. Vienen desde zonas empobrecidas del país en búsqueda de empleo y ante la carencia de un lugar donde habitar, se asientan en zonas de riesgo como son los cauces de arroyos y las lomas erosionadas, sin que las autoridades municipales intervengan para prevenir futuros desastres.

Otra zona que presenta alto riesgo de inundación es El Bajío, localizado en el centro de la ciudad. Aquí no se ha buscado una solución al problema ya que los gobiernos locales en turno no lo han abordado desde la perspectiva histórica y que como tal, primero se debe recurrir a la historia ambiental para responder a la pregunta de cómo se generó el problema. Basta con revisar los archivos fotográficos de principios del siglo XX para darse cuenta de que esa zona era una laguna donde desembocaba el río (Gráfica 13.6).

Gráfica 13.6. Antigua desembocadura del río formando una laguna costera, Heberto Peterson, 1919, archivo particular.

Sin embargo, años después, el río fue desviado de su cauce con la intención de desecar el vaso de la laguna y dar paso a la construcción de viviendas y de la infraestructura portuaria que ya se proyectaba ante el vigoroso crecimiento de la ciudad (Gráfica 13.7).

Gráfica 13.7. Al centro se observa la laguna ya desecada y arriba el cauce del río modificado, Heberto Peterson, años sesenta, archivo particular.

Posteriormente, con el agudizamiento de los fenómenos de origen hidrometeorológico y climático, el río buscó su cauce original, lo que ha generado los eventos recurrentes de inundación durante casi un siglo en el centro de la ciudad, sin que exista ningún plan de mitigación a la vista (Gráfica 13.8).

Gráfica 13.8. Recurrentes inundaciones en la zona de la antigua laguna costera, archivo La Jornada B.C., en línea.

13.9. Conclusiones

Los resultados preliminares muestran una preocupante ausencia de memoria histórica en la mayoría de los habitantes ubicados en zonas de riesgo, además de fallas institucionales en los tres niveles de gobierno, en relación a la gestión y manejo del riesgo, incluyendo la aplicación de medidas de prevención y mitigación para futuros escenarios de inundación fluvial.

En el caso de Ensenada, las recurrentes inundaciones son producto de una construcción social del riesgo, asociada a la ausencia de memoria histórica y a la carencia del manejo integral del riesgo por parte de autoridades locales, estatales y federales.

Bajo el enfoque del Manejo Integral de Riesgo Ambiental se puede llegar a un modelo de contingencia participativo en el tema del riesgo de inundación, donde se pueda

responder al riesgo desde la visión de la sociedad y donde la historia ambiental sea una herramienta fundamental para la recuperación de la memoria y que esta a su vez impulse la participación social.

Generalmente, se trabaja en la valoración del riesgo, pero debe integrarse una política del riesgo, a nivel de gestión municipal a largo plazo, como se ha propuesto en la formulación de la Agenda 21 Local.

Es a escala local donde se ve la interacción día a día entre los actores sociales. Por lo tanto, el tema del riesgo debe articularse primero a esta escala, es decir, a nivel individual y vecinal, antes de pensar en la aplicación de medidas a nivel federal o global.

Los problemas de riesgo (proceso) y desastre (producto) no pueden resolverse aisladamente. Intervenir en la vulnerabilidad es clave y debe ser un propósito de la planificación municipal con una visión a largo plazo.

El desarrollo local sostenible sólo será posible si los municipios adoptan una estrategia integral en el manejo del riesgo ambiental, de no ser así, el único escenario que seguiremos será la construcción de los desastres del futuro.

13.10. Agradecimientos

Los autores agradecen a los ciudadanos que dedicaron generosamente su tiempo y paciencia para llevar a cabo las entrevistas. Especial agradecimiento a nuestro recordado y querido colega José Luis Ferman Almada (q.e.p.d.), por sus valiosas aportaciones conceptuales, su apoyo incondicional y por su amistad.

13.11. Referencias

Braudel, Fernand, 1958, "Histoire et Science Sociales: La Longue Durée". En *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, XIII, pp. 725-753.

Clark, Helen, 2012, "La importancia de reducir el riesgo de desastres para fortalecer las naciones". En UNDP, [Portal electrónico], http://www.undp.org/content/undp/es/home/ourperspective/ourperspectivearticles/2012/08/15/building-resilience-the-importance-of-disaster-risk-reduction.html

Febvre, Lucien, 1949, La Terre et l'évolution humaine, Editions Albin Michel.

Le Goff, Jacques, 1991, El orden de la memoria: el tiempo como imaginario. Paidos Ibérica.

Meadows, Donella; Dennis Meadows, Jorgen Randers y William Behrens, 1972, Coords., The Limits of Growht, 2nd Edition, Universe Books, New York.

NOAA-National Weather Service Forecast Office [Página en línea], 2018.

Smith Adam, 1776, The Wealth of Nations. London: Methuen & Co., Ltd., ed. Edwin Cannan, 5th edition.

United Nations [Publicación electrónica], 1987, "Brundtland Report", available from http://conspect.nl/pdf/Our_Common_Future Brundtland_Report_1987.pdf

United Nations [Publicacion electrónica], 1992, "Agenda 21". available from http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf

Wilches-Chaux , Gustavo, [Libro electrónico],2007, "La vulnerabilidad global", En *Los desastres no son naturales,* La Red, disponible en http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/LosDesastresNoSonNaturales-1.0.0.pdf

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOMORFOLÓGICA DE GEOFORMAS KÁRSTICAS EPIGEAS Y AMENAZA DE INUNDACIÓN EN EL ESTADO DE CAMPECHE

14

Caracterización hidrogeomorfológica de geoformas kársticas epigeas y amenaza de inundación en el estado de Campeche

A. Gerardo Palacio Aponte[1]; Óscar Frausto Martínez[2]

14.1. Resumen

El presente trabajo muestra la aplicación de los conceptos y métodos hidrogeomorfológicos en el conocimiento de la movilidad de los flujos de agua superficiales y subsuperficiales y los regímenes de inundación en el Estado de Campeche, México. Se explica como la evolución del relieve kárstico y sus características morfogenéticas, morfométricas, morfológicas y morfopedológicas condicionan, junto con el resto de las variables ambientales, la susceptibilidad biofísica del territorio ante las inundaciones. Para alcanzar este objetivo y con base en el conocimiento geológico-geomorfológico de terrenos kársticos mesiformes tropicales de la península de Yucatán, se aplicaron herramientas en un sistema de información geográfica (SAGA y ArcGis) como el Multi-resolution valley bottom flatness, Curvature y Slope entre otros, para diferenciar las geoformas colectoras de flujos hidrológicos conocidas regionalmente como bajos inundables, de las geoformas dispersoras. Al mismo tiempo, para complementar y verificar objetivamente la delimitación de las fronteras inundables, se aplicaron procesos en percepción remota (ENVI) como el análisis de componentes principales Tasseled cap en donde se puede diferenciar claramente el brillo, el verdor y la humedad para detectar aún en época seca las unidades morfopedológicas satu-

1 Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Industrias No. 101–A, Valle Dorado, San Luis Potosí, S.L.P., 78399, México. alvaropalacioaponte@gmail.com

2 Departamento de Ciencias y Humanidades. Universidad de Quintana Roo. Avenida Andrés Quintana Roo s/n, esq. calle 110 Sur. Col. Maravilla, Cozumel, Quintana Roo, 77600, México. fraustomartinezoscar@gmail.com

radas de humedad. Después de asociar y ponderar las interacciones de las diversas variables y condiciones hidrogeomorfológicas, se establecieron 4 rangos de amenaza potencial relacionados con la susceptibilidad a la inundación en 6248 polígonos. La validación y tipificación de la propuesta se basó en 400 puntos de muestreo aleatorio en la parte centro-sur de Campeche después de la ocurrencia del huracán Isidoro en 2002.

Palabras clave: hidrogeomorfología, bajos inundables, susceptibilidad y amenaza a la inundación.

14.2. Introducción

En prácticamente todo el país, los datos y conocimientos meteorológicos e hidrológicos son parciales y generalmente insuficientes, incluso para un primer diagnóstico y caracterización del funcionamiento de los hidrosistemas. En la mayoría de las ocasiones se tiende a sustituir la insuficiencia de datos con tratamientos estadísticos que pueden enmascarar incluso eventos extremos, de tal modo que las correlaciones se caracterizan por una fuerte dispersión debida, principalmente, a la escasez de estaciones y por lo tanto de registros meteorológicos e hidrométricos. Para evitar esas inconsistencias se requieren series de tiempo largas (de al menos 30 años) con una red de estaciones suficientemente densa que permitan obtener comportamientos promedio anuales y extremos representativos a nivel espacial.

Ante las carencias antes mencionadas una opción es buscar rasgos paisajísticos morfo-funcionales que muestren de forma directa o indirecta las formas de incidencia del agua sobre el territorio. De esta relación surgen los mapas hidrogeomorfológicos cuyo objetivo es mostrar el comportamiento del agua en el espacio geográfico apoyándose en observaciones geomorfológicas significativas (Tricart y Kilian, 1982). El interés de este mapa se centra en el conjunto de procesos morfogenéticos y morfodinámicos que dan origen a un sistema de geoformas, a la distribución relativa de materiales y a las formas biológicas de colonización del territorio asociadas. Para entender el funcionamiento del sistema hidrogeomorfológico en su expresión espacial, se parte

específicamente del concepto de unidades del terreno (Zonneveld, 1989) que son porciones del territorio con homogeneidad relativa tanto en términos funcionales como morfológicos y que son diferenciables entre por límites reconocibles objetivamente.

En un mapa hidrogeomorfológico se muestran las unidades del terreno donde la morfodinámica está regulada fundamentalmente por la movilidad horizontal y vertical del agua superficial y subsuperficial. Igualmente considera el origen, naturaleza y distancia de fuentes de agua hidrodinámicamente interconectadas o aisladas y las evidencias geopedológicas y bióticas que sintetizan el patrón funcional del sistema.

A partir del entendimiento de la hidrodinámica de los subsistemas se puede explicar la diferenciación espacial de la amenaza de inundación como resultado de la susceptibilidad biofísica del terreno. La susceptibilidad (Fuchs, 2009) del terreno estudia la distribución espacial y correlación múltiple de las condiciones naturales del terreno, que predisponen la capacidad de las unidades del terreno para amortiguar o magnificar la incidencia directa de un fenómeno natural (amenaza natural) sobre un territorio específico. Se basa en el conocimiento del potencial destructivo extremo del conjunto de fenómenos ocurridos en el pasado (frecuencia, intensidad y magnitud) y su relación intrínseca con las condiciones naturales o antrópicas locales del terreno.

Para su determinación se aplica el análisis condicional basado en un conjunto de criterios ponderados de susceptibilidad y su expresión territorial sobre unidades del terreno. Este análisis se basa en el Teorema de Bayes, donde el discernimiento de la probabilidad de las causas, se determina a partir de los efectos que han podido ser observados en el pasado. A partir de este principio se establecen correlaciones entre los efectos modificadores o destructivos registrados sistemáticamente y las unidades del terreno o unidades de mapeo homogéneas donde se categorizan las respuestas (impactos) a la amenaza.

Estos principios de orden se aplican para entender la amenaza de inundación en ambientes kársticos mesiformes subtropicales de Campeche, México, donde existe una creciente población aun dispersa, pero una cada vez importante actividad económica agrícola y forestal, además del turismo ecológico. Dentro de la morfología

kárstica, las geoformas kársticas epigeas suelen ser susceptibles de amenaza de inundación según su grado de evolución o madurez, especialmente cuando las dolinas transitan hacia uvalas y poljes que se convierten en bajos inundables. Los bajos inundables son planicies bajas acumulativas resultado de la acumulación sucesiva de residuales producto de la disolución de rocas carbonatadas, y a medida que la evolución kárstica avanza, aumenta la cantidad de depósitos hidromórficos asociados. Como es de esperarse hay una relación directamente proporcional entre la extensión y antigüedad de las planicies residuales con la susceptibilidad a la inundación o inundabilidad del terreno y su probable impacto sobre la población y sus actividades económicas.

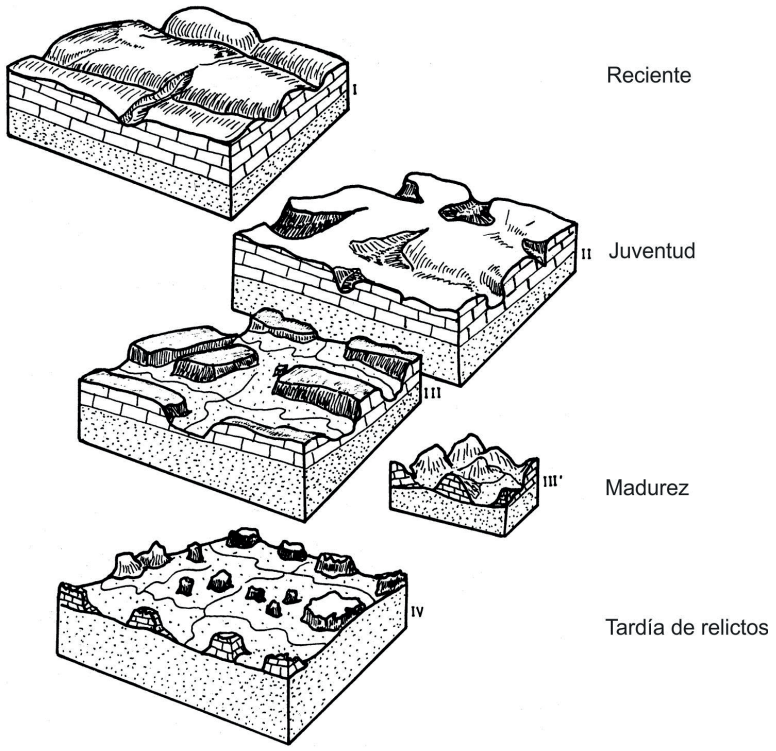
14.3. Antecedentes

14.3.1. Evolución kárstica, hidrogeomorfología y susceptibilidad a la inundación

Los bajos inundables son humedales kársticos resultado de la evolución de geoformas kársticas epigeas (White, 1988) y son conocidos en el sureste mexicano como ak´alches, palabra de origen maya que proviene de los vocablos: *akal*, que significa pantano (Duch, 2005) y ché, árbol o conjunto de árboles. Esta descripción ideográfica es en sí indicativa de las condiciones ambientales donde predominan suelos hidromórficos que permanecen inundados durante la mayor parte del año en ambientes kársticos tropicales. En estos ambientes se encuentran especies vegetales tolerantes a períodos de inundación más o menos prolongados como, por ejemplo: *Haematoxylum campechianum* (palo de Campeche), *Cameraria latifolia* (sak cheechem), *Dalbergia glabra* (muuk), *Erythrina satandleyana* (chak ch´obenché), *Hyperbaena winzerlinwii* (chooch kitam), *Coccoloba reflexiflora* (uva), entre otras (Palacio *et. al.*, 2002). Como dato histórico ambiental, cabe señalar que el palo de Campeche tuvo una explotación intensiva que inició en la segunda mitad del siglo XVIII debido al auge de la industria textil de Inglaterra, Francia y otros países europeos. Este auge provocó un incremento en la demanda de materias primas, especialmente de las tintóreas, induciendo la degradación hasta casi su extinción, incidiendo en la sustentabilidad funcional de muchos de los bajos inundables de Campeche.

Los bajos inundables son planicies bajas acumulativas resultado de la acumulación sucesiva de deluviones y de residuales producto de la disolución de rocas carbonatadas transportadas superficial y subsuperficialmente. A medida que la evolución kárstica avanza, aumenta la cantidad de geoformas relictuales y depósitos asociados. La agresión física y química a las calizas se realiza de forma muy intensa, debido fundamentalmente a la acción pluvial torrencial lineal, la denudación y las resurgencias locales. El aspecto fundamental del karst tropical es la presencia de restos de caliza con pendientes originalmente escarpadas que emergen de una llanura originalmente denudativa y cubierta por residuos de descalcificación. Para la realización de este proceso es necesaria la transformación del carbonato en bicarbonato soluble y la eliminación de este último. Las depresiones o colectores para la mayoría de los autores se han derivado de una red hidrográfica con un régimen de crecidas frecuente, siendo los lomeríos y montículos restos de la disección en los interfluvios. Se espera que este proceso se explique mediante el modelo de evolución kárstica tropical que no es necesariamente lineal, pero que si puede ser replicable en algunas regiones donde no hay interrupciones morfotectónicas o volcánicas. Las planicies originalmente denudativas se transforman gradualmente en planicies acumulativas confinadas hasta convertirse en planicies residuales extendidas (Figura 1). Al mismo tiempo las geoformas positivas con respecto a los niveles de base locales, aparecen entre las etapas evolutivas de juventud y la madurez como altillos y lomeríos bajos con cimas de pendiente plana horizontal, resultado de la erosión diferencial sobre planicies estructurales de exposición reciente a la karstificación. Al aumentar los tiempos de disolución y por tanto las cantidades de residuales de terra rosa, los bordes de las cimas planas tienden a redondearse hasta formar colinas cónicas en altas densidades (etapa de madurez) que posteriormente, en la etapa tardía de relictos, tienden a reducir su altura, convirtiéndose en colinas residuales (Gráfica 14.1) y montículos.

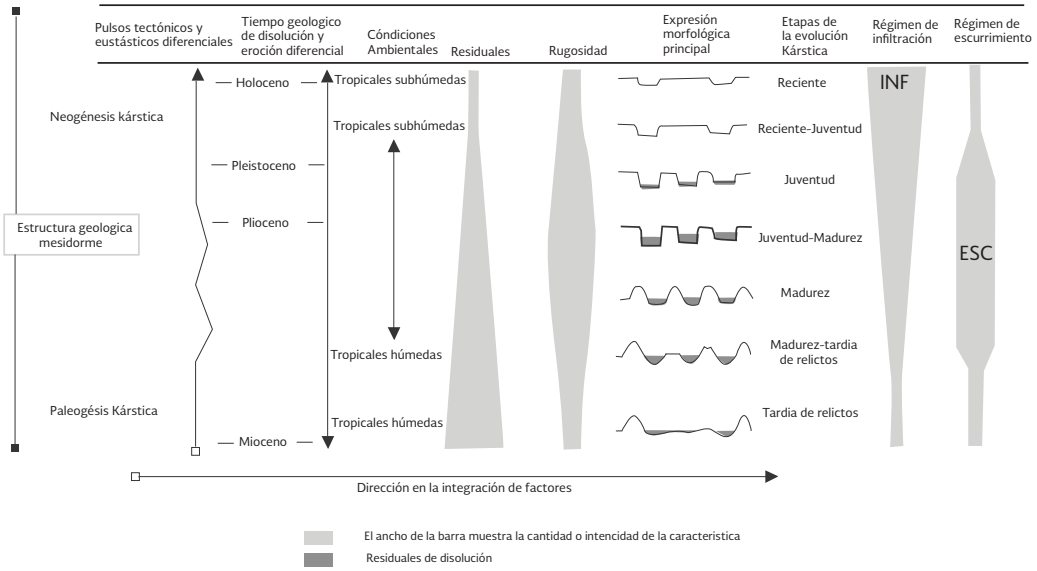
Al mismo tiempo las dolinas con acumulación incipiente de residuales concentradas preferentemente sobre las intersecciones de fallas y fracturas, inician su formación durante la etapa reciente en el cuaternario. Se unen gradualmente en algunas zonas durante la madurez, hasta formar uvalas (coalescencia de dolinas) y posteriormente poljés (depresiones alargadas) en la etapa tardía de relictos.



Gráfica 14.1. Evolución teórica de un karst tropical
Fuente: modificada de Lehmann, 1954

En el diagrama de evolución kárstica en la península de Yucatán (Gráfica 14.2), se señalan las condiciones ambientales tropicales subhúmedas y húmedas (lluvias en verano, temperaturas promedio mensuales superiores a 18° C y humedad relativa siempre arriba del 60%) relacionadas con los grados de evolución, sin embargo, es necesario acotar que su vinculación genética a los tipos de paisaje kárstico no es absoluta y que se indica para caracterizar el entorno natural y explicar algunas correlaciones morfogenéticas y morfodinámicas.

La evolución diferencial del karst en Campeche (Figura2) tiene dos líneas de tiempo: la neogénesis kárstica al norte del Estado y la paleogénesis kárstica del centro y sur del Estado. La parte norte es geológicamente más joven (neógeno), con condiciones de menor humedad (100 mm menos precipitación que en el sur) y relieve reciente, lo que implica menor rugosidad topográfica y menor acumulación de residuales finos. Estas condiciones implican a su vez infiltración alta y escurrimiento acumulado mínimo, condiciones que inhiben la posibilidad de la inundabilidad del terreno. Por otra parte, la



Gráfica 14.2. Evolución del karst tropical en la península de Yucatán.
Fuente: Elaboración propia

parte centro y sur del Estado corresponde con el área basal de origen de la península de Yucatán en donde la exposición de su morfoestructura mesiforme a los procesos de meteorización iniciaron en el mioceno (23 millones de años) cuando emergió la península. Bajo condiciones de mayor humedad, el relieve pierde energía y se empiezan a denudar las geoformas positivas disminuyendo la rugosidad e incrementándose la cantidad de residuales finos, con la consecuente reducción de la infiltración y con el incremento en los volúmenes de escurrimiento captados.

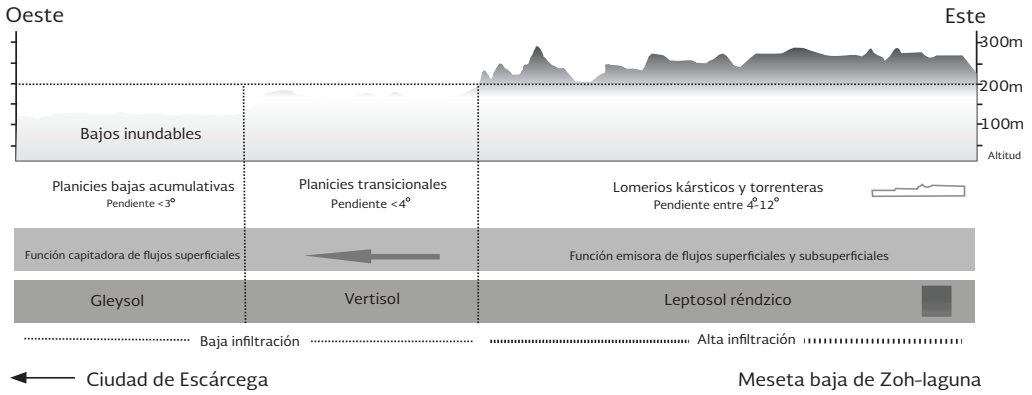
Corbel (1959) encontró, como rangos promedios de denudación kárstica en la Península de Yucatán entre 10 y 40 m^3/año/km^2 (12 para Mérida, Yucatán y 10 para Champotón, Campeche) y como ejemplo extremo contrario para zonas frías con lluvias todo el año, valores entre 240 y 275 m^3/año/km^2 en Francia y Noruega. Estos números muestran que la intensidad de la disolución está asociada a la temperatura ambiente y por tanto del agua, sin embargo, existen referencias de otros autores que indican valores incluso invertidos, lo que en cierta forma demuestra que, aun considerando la variabilidad y precisión de los datos, existen variables concatenadas no ponderadas que inciden en los cambios morfológicos del paisaje kárstico. La correlación directa se presenta entre el arreglo disyuntivo evolucionando hacia la transformación geomórfica del relieve y de todos los factores ambientales y no solo con el clima. Lo que sí es evidente es que en

los países tropicales los procesos de disolución se caracterizan por ejercerse más violentamente en superficie, que, en profundidad, predominando, por tanto, la disolución superficial sobre la subterránea (Corbel, 1959). Esto se debe a que en los países tropicales la saturación de las aguas en CO_3Ca, se ejerce en unas pocas horas, sobre todo en lo que concierne a la última fase del proceso de disolución, mientras que, en los países templados, la saturación se adquiere en más de 50 horas (Mateo, 1981). Igualmente, las lluvias torrenciales y sus efectos erosivos tienen que ver con la intensificación localizada de la disolución. Jennings (1971) señala que una de las peculiaridades del karst tropical es la verticalidad y horizontalidad del relieve, con la minimización de pendientes intermedias. Es conocido el predominio de formas convexas, a menudo con paredes verticales y cimas cónicas y redondas y de superficies con fondo más o menos llano que es justo el que corresponde con los bajos inundables.

14.4. Tipología e intensidad inferida de la susceptibilidad a la inundación

A partir del origen geológico-geomorfológico y ambiental de los bajos inundables en Campeche, se infiere que hidrológicamente se comportan como cuencas endorreicas con bordes semiredondeados y extensiones variables, en donde el agua que escurre torrencialmente por las laderas aledañas y torrenteras, difícilmente encuentra salida directa hacia cuencas vecinas, ríos o mares. El siguiente perfil morfopedológico representativo (Gráfica 14.3) del sur del Estado, muestra en forma gráfica las funciones hidrológicas de las unidades geomorfológicas, los suelos y la movilidad superficial y subsuperficial del agua. La condición morfopedológica en el ambiente, permite explicar la importancia de la posición del suelo en el relieve y la redistribución del agua aportada por las precipitaciones o las resurgencias y viceversa. Esto a través de la tipificación de suelos automórficos, semihidromórficos e hidromórficos. La meseta estructural de Zoh-Laguna ubicada en el centro-este del Estado cumple una función colectora de flujos hidrológicos superficiales y subsuperficiales, mediante una red interconectada entre lomeríos de pendientes convexas y torrenteras con pendientes promedio entre 4° y 12° y suelos automórficos con drenaje libre natural tipo leptosol réndzico, de menos de 25 cm de profundidad. Por otra parte, las planicies bajas acumulativas

del centro-oeste del Estado funcionan como receptáculos de los flujos superficiales y subsuperficiales y han desarrollado horizontes edáficos hidromórficos en donde se han formado minerales secundarios arcillosos tipo illita, montmorillonita, beidelita y otros. Son suelos impermeables tipo gleysol que inhiben la infiltración y por tanto favorecen la inundabilidad y los procesos reductivos de hierro y manganeso.



Gráfica 14.3. Perfil morfopedológico representativo del sur de Campeche.
Fuente: Elaboración propia

Bajo el esquema hidrogeomorfológico anterior y los patrones de evolución kárstica, se pueden establecer condiciones repetibles de susceptibilidad a la inundación según el tipo de bajo inundable. Los bajos y su funcionamiento hidrogeomorfológico regional se pueden tipificar (Cuadro 14.1) en dos grupos originales y cinco subtipos:

Cuadro 14.1. Tipos de bajos susceptibles a la inundación

Tipo de bajo	Características principales y variantes	
§ Aislado	Planicies acumulativas colmatadas de sedimentos deluviales distales y residuales de disolución. Con fronteras sin vínculos hidrológicos hacia geoformas contiguas, formadas sobre dolinas o uvalas aisladas.	
§ Interconectado	Al mismo nivel de base local sin movilidad aparente de flujos.	
	Con diferente nivel de base local. Genera movilidad lenta pero constante de flujos de agua entre bajos.	
	De pendientes marginales abruptas	Resultado de procesos de disolución en estado evolutivo avanzado o por erosión diferencial a través de debilidades estructurales disyuntivas. Mayor capacidad de contención y confinamiento hidrológico
	De pendientes marginales extendidas	Sobre colinas dómicas residuales con torrenteras o canales naturales de desagüe con actividad estacional torrencial. En términos de regímenes de escorrentía e infiltración funcionan temporalmente como cuencas hidrográficas. Menor capacidad de contención y confinamiento hidrológico.

Fuente: Elaboración propia

14.5. Materiales y métodos

14.5.1. Métodos para la zonificación hidrogeomorfológica de la inundabilidad

Para delimitar condiciones territorialmente homogéneas donde dominen escenarios de inundabilidad se identifican primero planicies cóncavas acumulativas menores a 0.5° de inclinación. A partir de este criterio se demarcan zonas de inundabilidad franca areal donde predominan sedimentos finos (limo-arcillosos) producto del transporte distal procedente de las geoformas kársticas positivas circundantes. Sin embargo, este es el límite para ambientes deposicionales que también requieren de una diferenciación de la geometría o curvatura del terreno (cóncava, convexa, recta) en planicies. Se considera como excepción o exclusión a las planicies denudativas altas que se presentan en las divisorias de aguas, que en los ambientes karso-tectónicos tabulares de la región son frecuentes. Se distinguen también los niveles de base locales de las divisorias de aguas a partir de las grandes estructuras kársticas y las altitudes relativas.

Para delimitar el escenario hidrogeomorfológico asociados a la susceptibilidad de inundaciones se siguen los siguientes criterios y procedimientos:

Los fondos de los lechos kárstico-fluviales y planicies kársticas subhorizontales, funcionan como colectores hidrológicos que afectan significativamente el comportamiento del escurrimiento. Diferenciar las zonas bajas de los declives transicionales y colinas circundantes, es el primer paso para delimitar y caracterizar las zonas deposicionales potencialmente acumuladoras de agua con propósitos hidrogeomorfológicos. Los bajos se presentan dentro de un amplio rango de escalas y altitudes, variando en su extensión desde unos pocos metros hasta cientos de kilómetros.

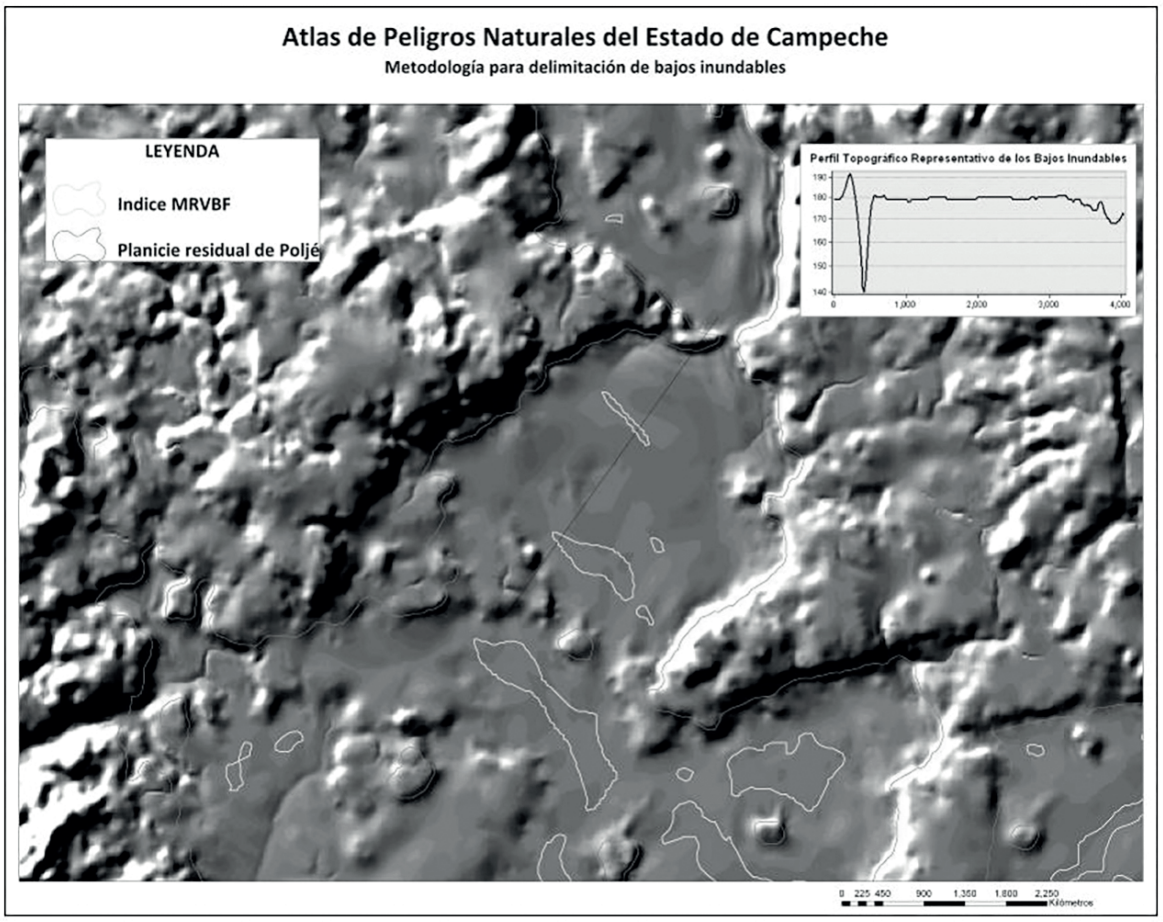
Para delimitar los fondos de las depresiones se aplica el *Indice de Multiresolución del Fondo de los Valles* o Multi-resolution valley bottom flatness (MRVBF) que permite identificar el fondo de los valles mediante la delimitación de llanuras a diferentes niveles altitudinales según sus áreas circundantes y la naturaleza de sus pendientes (Gallant and Dowling, 2003). Los supuestos de este índice son: 1). - los fondos de los

valles son bajos y planos en relación a sus alrededores; 2). - estos fondos se presentan en diferentes niveles topográficos y, 3) los fondos de los grandes valles son mucho más planos que los pequeños (McKergow *et. al* 2003).

Para el cálculo de este índice y la identificación de los fondos se utiliza como insumo un modelo digital de elevación (INEGI, 2013), basándose principalmente en la firma topográfica de las zonas bajas por altitud. Este algoritmo opera a diferentes escalas y combina estos resultados en un índice simple de multi-resolución, clasificando los fondos de las planicies que están asociados a zonas de depositación o hundimiento (Gallant and Dowling, 2003).

De los valores obtenidos con este índice, los menores se consideran resultantes de la erosión mientras que los mayores pueden considerarse como las áreas de depositación. Los valores altos corresponden a zonas de llanuras amplias y planas y presumiblemente áreas con depósitos profundos de sedimentos. Cada incremento de una unidad del índice MRVBF corresponde a la reducción en la mitad de la pendiente y la triplicación de la longitud de la escala (Gallant and Dowling, 2003).

Para llevar a cabo el cálculo del índice MRVBF, se utilizó el software de plataforma libre SAGAGIS (System for an Automated Geo-scientific Analysis), desarrollado por el grupo de trabajo de análisis geosistémico en el departamento de Geografía Física de la Universidad de Goettingen. En una primera etapa es necesario exportar el Modelo digital de elevación de formato de ArcGis 10.1 (Sistema de Información Geográfica) a ASCII para poder realizar los procesos en SAGA. Una vez importado en SAGA se utilizó el módulo *Terrain Analysis/Morphometry/Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness*. En este módulo se ajustó únicamente el valor del umbral de la pendiente *Inital Thresold for Slope*, a 2 m. Este parámetro permite ajustar el modelo a las diferencias en el relieve. De tal manera que, en los pasajes inclinados cercanos al umbral, solamente se agregan a estos. Mientras que, en las zonas planas, casi todos los vecinos sin elevación (celdas) pueden corresponder a celdas de flujo (Wichmann y Becht, 2003). Al final se eliminan los polígonos con valores bajos de índice MRVBF, se eliminan polígonos menores a 1ha y se reconstruye la topología de los polígonos (Gráfica 14.4). Los procesos originales del modelado hidrogeomorfológico fueron elaborados originalmente para el Atlas de peligros naturales del estado de Campeche (Posada *et. al*. 2013)

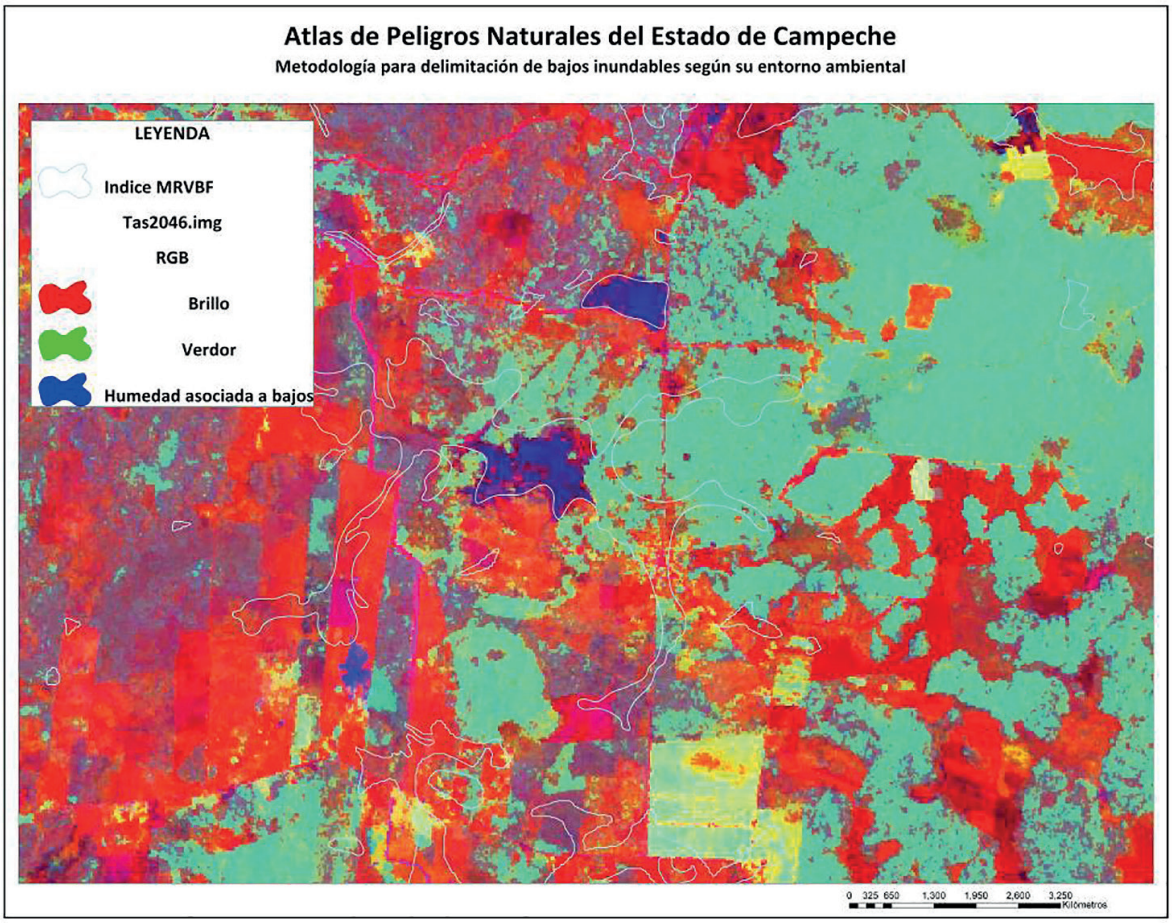


Gráfica 14.4. Resultado gráfico de la aplicación del índice MRVBF (líneas claras) y su comparación con límites morfológicos asociados a un poljé en Balamkú, Campeche.
Fuente: Elaboración propia con base MDE. Inegi.

Utilizando como criterio rector el índice anterior y con el fin de verificar la validez de los resultados en términos morfométricos, morfológicos y ambientales se aplicaron métodos complementarios.

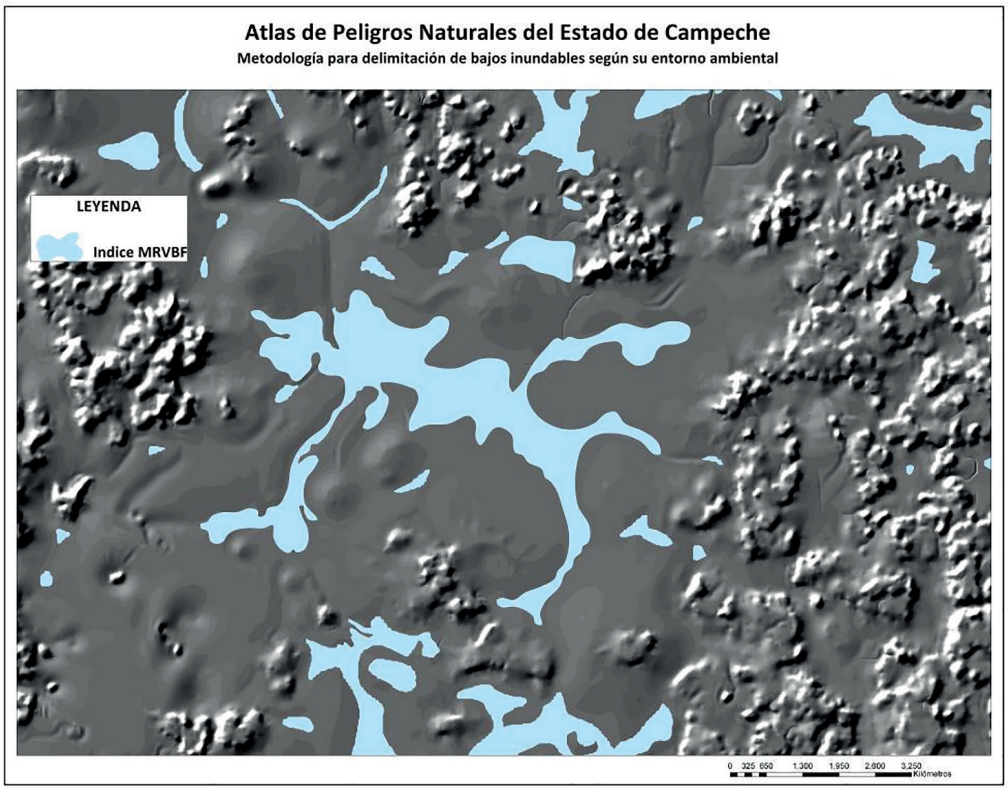
El primer proceso complementario, fue seleccionar en ArcGis 10.1 a partir del MDT, los polígonos con menos de 0.5 grados de inclinación con la herramienta *slope*. Posteriormente para la geometría de las planicies bajas inundables, se aplica el comando *curvature* dentro de la extensión *Spatial Analyst Tools/Surface (ArcGis)*. El objetivo es identificar los valores asociados a concavidad reclasificando el grid. Finalmente, como criterio ambiental indicador, pero de carácter sintético, se utilizan imágenes multiespectrales de alta resolución Landsat TM y ETM+, detectando mediante la banda del

infrarrojo medio, áreas húmedas incluso durante la época seca. Se aplica un subproceso denominado *Tasseled cap* en el procesador de imágenes ENVI 4.8 (para detectar brillo, verdor y humedad, diferenciando suelos saturados de humedad de coberturas urbanas o de suelos desnudos (brillo) y cobertura vegetal densa (verdor). Los mayores valores de reflectancia en el infrarrojo medio corresponden a suelos húmedos. A mayor concentración de humedad mayor proporción de energía es absorbida y consecuentemente en menor proporción es reflejada. Para suelos producto de acumulaciones distales, arcillosos con una humedad entre el 30% y 40% el *Tasseled cap* ofrece resultados confiables correspondientes con la realidad (Gráfica 14.5).



Gráfica 14.5. Comparación entre las fronteras del índice MRVBF y el Tasseled cap aplicada a la región norte de los Chenes, Campeche.
Fuente: Elaboración propia con base Imagen Landsat TM.

Debido a la complejidad geomorfológica e hidrológica de los terrenos kársticos, un karst desnudo en estructuras tabulares deprimidas, no necesariamente acumula agua. Puede funcionar incluso como ponora o sima kárstica, es decir, como una oquedad que permite filtraciones profundas incluso para flujos torrenciales. Para discriminar las condiciones en las que el fondo del bajo es colector estático y no dinámico, es que se aplica el proceso anterior, de manera que se verifique la condición de susceptibilidad a las inundaciones según su respuesta ambiental y radiométrica. De esta manera las fronteras originales son modificadas para la delimitación final de los polígonos (Gráfica 14.6).



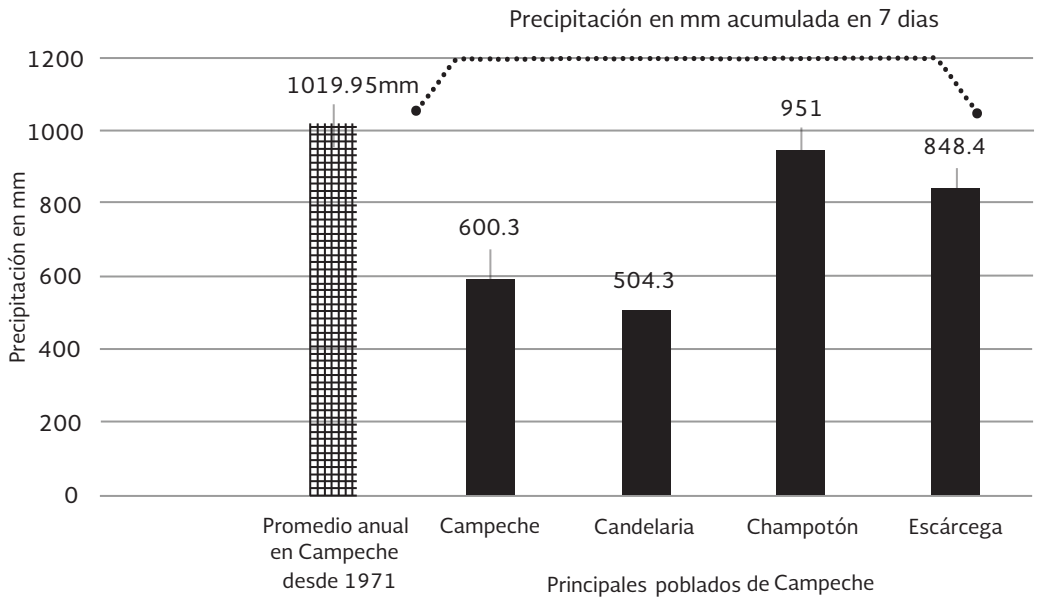
Gráfica 14.6. Índice MRVBF modificado en las fronteras y extensión de sus polígonos según las respuestas radiométricas del Tasseled cap.
Fuente: Elaboración propia con base MDE.Inegi.

Para integrar la información parcial, se delimitan zonas de inundación franca por condición hidrogeomorfológica y se diferencian de áreas susceptibles a inundaciones en sus ámbitos circundantes. Las coincidencias previamente diferenciadas y ponderadas que impliquen mayor susceptibilidad a la inundación, permitirán en principio diferenciar unidades del terreno con iguales respuestas ambientales ante la presencia de inundaciones.

14.6. Resultados

Se delimitaron 6248 polígonos en condición de bajo inundable con diferentes rangos de susceptibilidad a la inundación, ponderando los patrones evolutivos del karst, la energía y altitudes relativas del relieve, la condición morfopedológica de saturación por agua, la permanencia de la inundabilidad aún en época seca, la capacidad de contención potencial de flujos de agua acumulados, la conectividad entre geoformas kársticas epigeas y su validación ante un caso extraordinario de precipitaciones estacionales. Su buscó establecer rangos de susceptibilidad a la inundación para contribuir al cálculo probabilístico del riesgo potencial de inundaciones necesariamente asociado a modelos hidrológicos complejos. Su conceptualización en ambientes kársticos con altísima fragmentación territorial y funcional es sumamente compleja y requiere modelos conceptuales robustos. Estos modelos basan sus abstracciones de la realidad en el cálculo, con datos disponibles, de la probabilidad estadística de que un conjunto de eventos o un evento hidrometeorológico extremo se pueda repetir en el futuro, lo que implica de forma inherente un alto nivel de incertidumbre relacionado con la ocurrencia misma de los fenómenos y la disponibilidad de los datos.

Ante la complejidad e importancia del tema de las inundaciones y para el caso del estado de Campeche donde los datos meteorológicos hacia el interior de la península son escasos, fue necesario recuperar la información documentada del huracán Isidoro como fenómeno hidrometeorológico extremo representativo de las máximas condiciones de inundabilidad registradas históricamente. Durante el año 2002 el huracán Isidoro (categoría 3) afectó en su trayectoria a la península de Yucatán, sin embargo, en realidad llegó al Estado de Campeche como tormenta tropical (vientos entre 66 y 118 km/h), trayendo consigo dos comportamientos extremos: precipitaciones extraordinarias y una permanencia estacionaria de 7 días en su trayectoria rumbo al Golfo de México. En la siguiente figura (Figura7) podemos apreciar la precipitación promedio anual desde 1971 con 1019.95 mm y la acumulada durante una semana en las ciudades más importantes del Estado como Campeche con 600 mm, Candelaria con 504 mm, Champotón con 951mm y Escárcega con 848 mm.



Gráfica 14.7. Precipitación promedio anual y acumulada en 7 días durante el huracán Isidoro en Campeche.
Fuente: Rivera-Arriaga et. al., 2004

En todos los casos la precipitación rebasó la mitad promedio anual y en particular Champotón casi acumula el total anual en solo 7 días. Un fenómeno como éste tiene la posibilidad estadística de ocurrir cada 75 años, sin embargo, es un antecedente potencial de efectos desastrosos (Figura8) que debe considerarse en la gestión prospectiva del riesgo, precisando que el riesgo y la incertidumbre son rasgos inherentes a la frecuencia de ocurrencia.

El cálculo de los daños ocasionados por el huracán Isidoro, lo realizó el Comité de Evaluación de daños que coordinó la Secretaría Estatal de Desarrollo Social, estimándose en $1'430,521,866 de pesos en los sectores productivos del Estado. El sector más dañado fue el de desarrollo rural que resintió pérdidas por 792 millones 79 mil 562 pesos principalmente en el subsector agrícola (Rivera-Arriaga *et. al.*, 2004).

Este es el primer referente documentado de daños por huracanes no costeros y no pesqueros y por inundaciones hacia el interior en Campeche. Los daños provocados a las actividades agrícolas, ganaderas, forestales y apícolas presentan una afectación extraordinaria por su relación intrínseca con la productividad ecológica y la sus-

Gráfica 14.8. Fotos de los bajos inundables afectados por el huracán Isidoro.
Fuente: Universidad Autónoma de Yucatán
Centro de Investigaciones Regionales "Dr. Hideyo Noguchi"

tentabilidad ambiental de estas actividades. Aunque la mayor parte de la población se encuentra dispersa en el territorio, las actividades económicas son cada vez más importantes y concentradas en ambientes con disponibilidad de humedad edáfica, áreas que justo coinciden con los bajos inundables. En las zonas delimitadas con susceptibilidad alta se pudieron verificar en 400 puntos en campo, inundaciones de hasta 5 metros en los bajos interconectados y menores de 1 metro en los bajos aislados, ambos con permanencia de tirante de entre 4 y 7 días.

Tradicionalmente se estudian las inundaciones por desborde fluvial, pero las inundaciones localizadas y súbitas son generalmente poco estudiadas, aun cuando pueden ocasionar efectos destructivos sinérgicos importantes, sobre todo en bajos inundables extensos interconectados. Estas inundaciones por su naturaleza son especialmente sensibles y variables en su balance hidrodinámico, la introducción de cualquier nueva cobertura u obra hidráulica local, puede cambiar notoriamente los patrones de

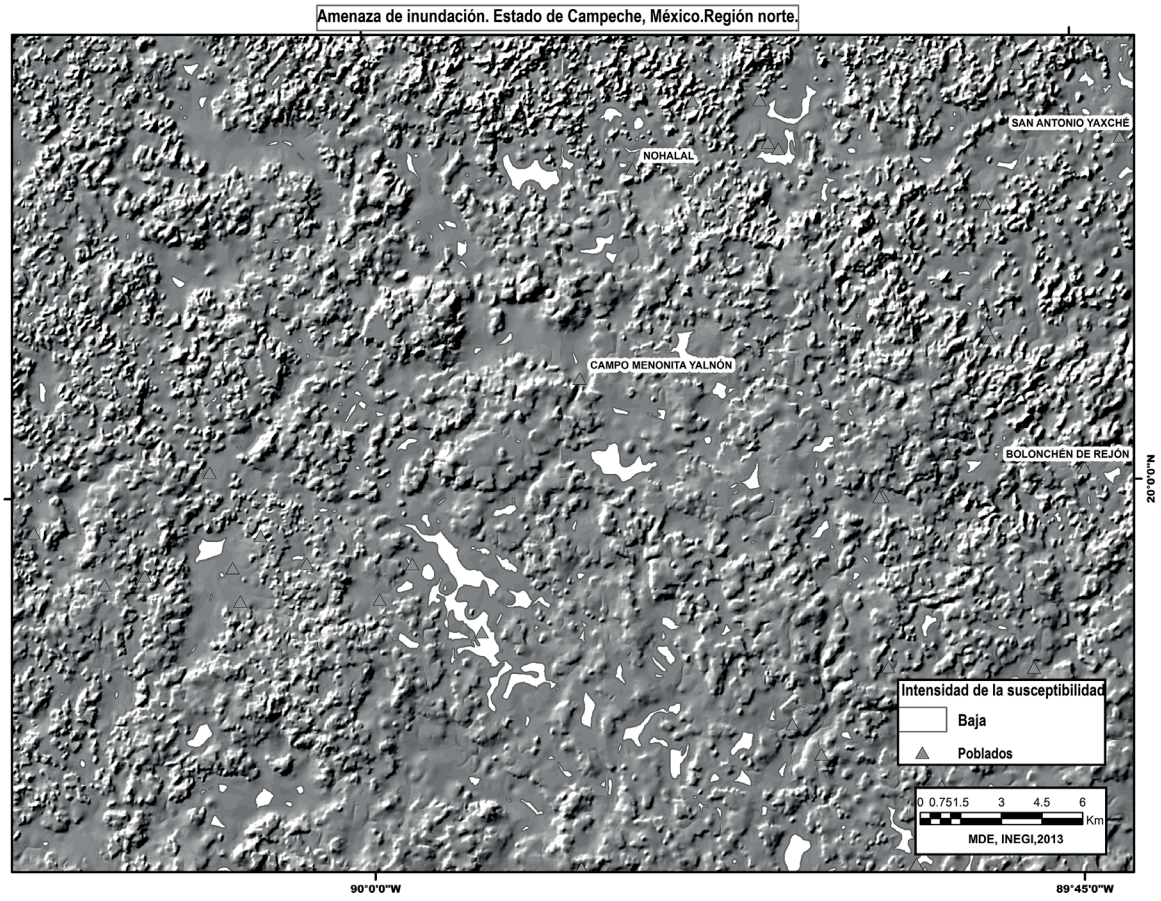
inundabilidad. Es por esto que la susceptibilidad biofísica del territorio es igualmente importante que los modelos predictivos de orden hidrometeorológico en la construcción de los probables escenarios de riesgo.

En cuanto al entendimiento de la vulnerabilidad social deben considerarse algunos aspectos, como el papel que asumen las comunidades sobre su propia vulnerabilidad y el papel que asumen la comunidad de científicos y autoridades competentes de los tres órdenes de gobierno. Es sintomático, por ejemplo, que hasta hoy no exista registro histórico de afectaciones por inundaciones locales; que se desconozca con datos actualizados, detalles del crecimiento específico de poblados y de las actividades económicas que podrían estar expuestas. El aislamiento y la marginación de las poblaciones rurales dispersas, limita la construcción de conocimiento tendencial de los fenómenos y sus efectos, así como la posibilidad de difundir en tiempo real la amenaza por inundaciones.

La intensidad diferencial de la amenaza de inundación, el riesgo potencial y el pronóstico en tiempo real, no son del conocimiento generalizado de la población local, sin embargo, para Campeche este fenómeno tierra adentro, todavía puede considerarse dentro de la gestión prospectiva y el presente documento pudiera contribuir a la reducción de efectos destructivos o modificadores en el futuro.

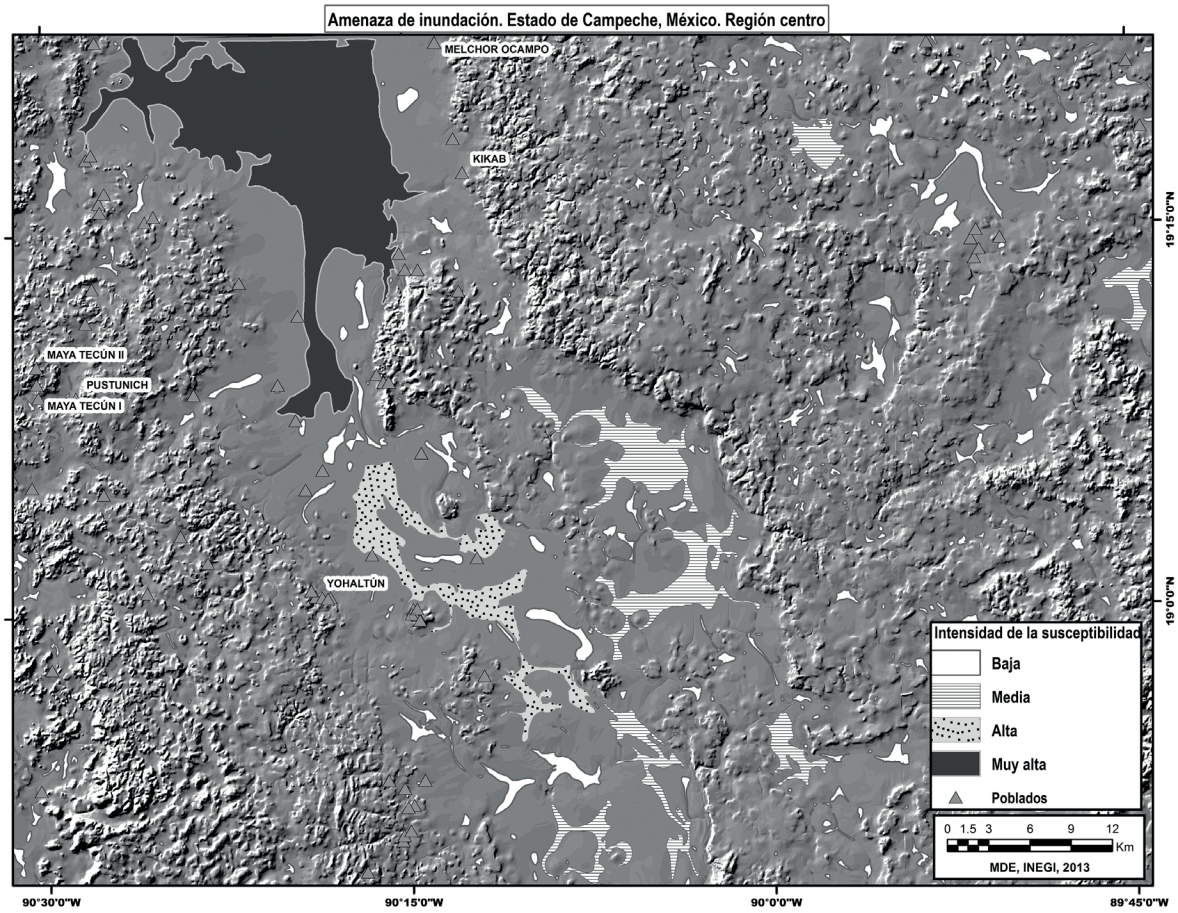
Los resultados del análisis espacial de la susceptibilidad las inundaciones se resumen en tres regiones: norte, centro y sur, con cuatro rangos de susceptibilidad a la inundación que van desde baja y media hasta alta y muy alta susceptibilidad. A la baja susceptibilidad corresponden 2137 polígonos de alta dispersión en bajos aislados; con susceptibilidad media 1458 polígonos con mayor integración entre dolinas y uvalas; 1363 polígonos con susceptibilidad alta en bajos interconectados y con susceptibilidad muy alta 1290 polígonos que representan la más alta amenaza potencial para cualquier tipo de asentamiento humano y actividad económica En la región norte (Figura9) predominan los bajos aislados confinados con baja susceptibilidad a la inundación, debido a la juventud en la evolución morfológica del karst, al predominio de la infiltración y la poca acumulación de residuales distales de disolución. Solo en la parte suroeste se presenta el control estructural del valle de Yohaltún con orientación nor-

te-sur en donde los fondos cóncavos con orientación norte-sur se prolongan entre la región de neogénesis y paleogénesis kársticas y se presentan muy altas intensidades de susceptibilidad.



Gráfica 14.9. Susceptibilidad a la inundación región Norte de Campeche.
Fuente: Elaboración propia

La región Centro (Figura10) presenta susceptibilidades altas y muy altas por el considerable incremento de bajos interconectados compuestos por uvalas y poljes. Incluye la parte centro y sur del valle de Yohaltún y la región conocida como los Chenes. En estas zonas existen importantes extensiones con cultivos de caña de azúcar, soja y cultivos perennes como frutales y algunas especies forestales como la teka.

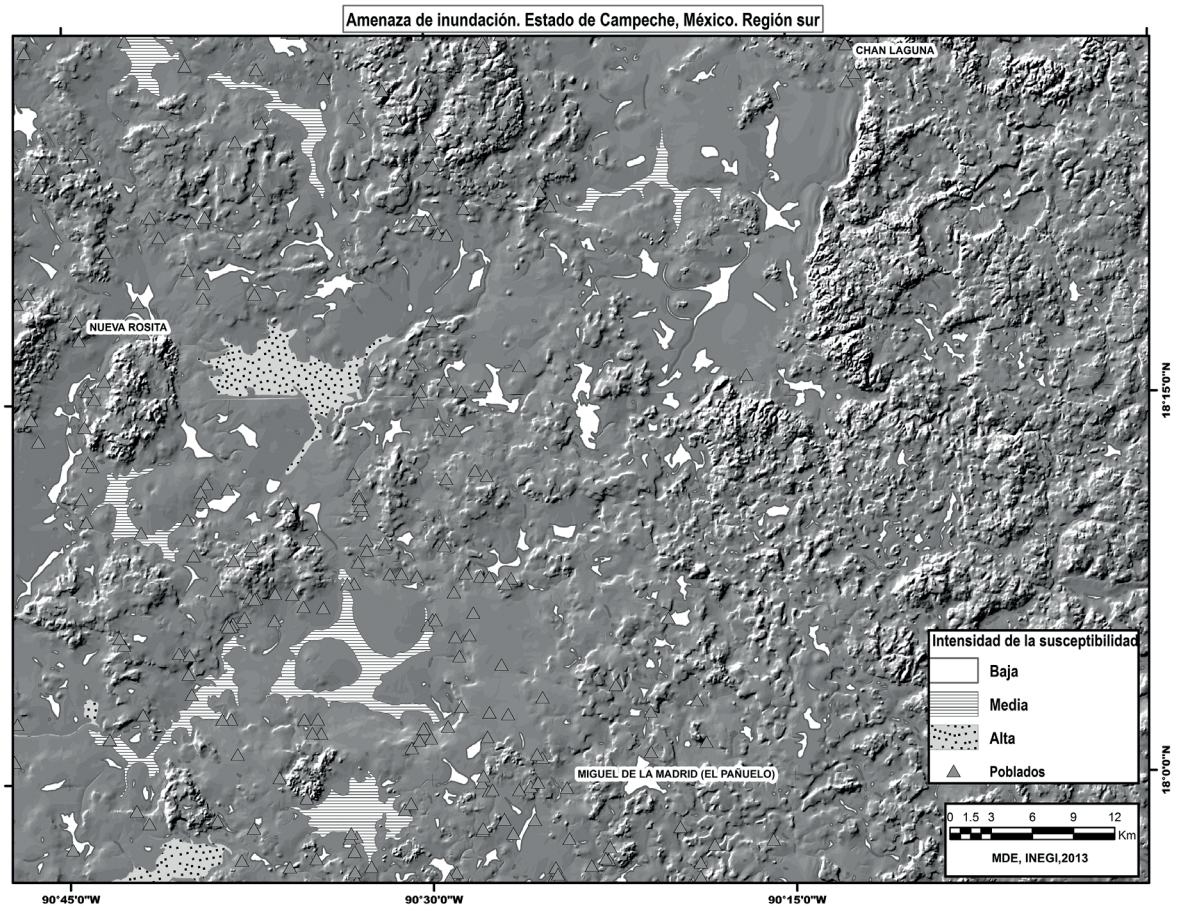


Gráfica 14.10. Susceptibilidad a la inundación región centro de Campeche.
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la parte Sur (Figura 11) aunque todavía presenta zonas con alta y muy alta susceptibilidad a la inundación también muestra controles erosivo-denudativos de orden kárstico-fluvial, donde el río Candelaria incide verticalmente formando valles semiciegos.

14.7. Conclusiones para la prevención de riesgos y desastres

Para contextualizar correctamente las inundaciones y sus efectos destructivos y/o modificadores bajo condiciones ambientales específicas, es necesario primero considerar algunas falsas concepciones o ideas que según Pielke (1999) son frecuentes:



Gráfica 14.11. Susceptibilidad a la inundación región sur de Campeche.
Fuente: Elaboración propia

- Sabemos cosas equivocadas sobre la naturaleza del problema:
  Falacia 1: La frecuencia de las inundaciones se conoce bien.
  Falacia 2: Los daños por inundaciones en los últimos años no tienen precedentes debido al calentamiento global.
  Falacia 3: Los diques previenen daños.
  Falacia 4: Los pronósticos de inundación están universalmente disponibles.
- Sabemos lo suficiente acerca de cómo, por qué y con qué intensidad se debe actuar:
  Falacia 5: La vulnerabilidad social a las inundaciones se entiende bien.
  Falacia 6: Los datos sobre las víctimas de inundaciones son un indicador de riesgo de inundación.

Falacia 7: Los datos sobre los daños por inundación son un indicador de riesgo de inundación.

- Sabemos lo suficiente sobre lo que podría hacerse.
  Falacia 8: El conocimiento conduce a la acción.Falacia 9: El problema de las inundaciones puede ser afrontado sin el liderazgo y el apoyo de los gobiernos federales.

Estas ideas y concepciones giran en torno la incertidumbre del comportamiento probable de la amenaza y el riesgo asociado. En el caso de la amenaza de inundación se puede definir con mayor certidumbre la magnitud espacial o cobertura de probable afectación, que la predicción temporal y la intensidad específica. Es decir, ante la opción pragmática de elegir certidumbre asociada con las posibilidades físico-geográficas que condicionan o detonan una amenaza y la probabilidad extraordinaria o aleatoria de la ocurrencia, siempre será mejor optar por la primera.

El conocer los niveles de susceptibilidad a la inundación, permite tener un primer marco territorial para la gestión preventiva en la reducción de riesgo y una herramienta de planeación. El registro histórico de fenómenos extremos y sus efectos, así como la respuesta diferencial del terreno permiten orientar la toma de decisiones sobre la ubicación asertiva de asentamientos humanos y las actividades económicas. La probabilidad de que un evento hidrometeorológico se repita con efectos similares es baja e incluso improbable pero la susceptibilidad mantiene patrones territoriales predecibles. El objetivo al final será siempre evitar la acumulación histórica de la vulnerabilidad, reducir el riesgo potencial y darle resiliencia y calidad de vida a los grupos humanos en su entorno ambiental inmediato.

14.8. Referencias

Corbel, J., (1959), "Les karst du Yucatán et de la Floride", *Bullettin Ass. Géogr. de France*, no. 282-(3), pp. 2-14.

Duch, J. (2005), "La nomenclatura maya de los suelos: una aproximación a su diversidad y significado en el sur del Estado de Yucatán", *Revista de Geografía Agrícola*, vol. 43, pp. 57-74.

Fuchs S. (2009), "Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria -paradigms of vulnerability revisited", *Natural Hazards and Earth System Sciences,* vol.9, pp.337–352.

Gallant, J. C., and T. I. Dowling (2003), "A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas", *Water Resources Research*, vol. 39, no.12, pp. 1-14.

INEGI (2010). *Localidades de la República Mexicana*, Obtenido de Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010. Editado por Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática, México.

INEGI (2013), Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), 15 m de resolución, Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática, México.

Jennings J. N. (1971), *Karst, an Introduction to Systematic Geomorphology*, Volume 7, The M.I.T. Press, Australia.

Lehmann, H. (1954), "Der tropische KegelKarst and den Grossen Antillen". *Erdkunde*, vol. 8, no. 2, pp.130-139.

Mateo Rodríguez J. (1981), Morfología Cársica, Facultad de Geografía, Universidad de la Habana, Cuba.

McKergow L. A., J. C. Gallan and T. I. Dowling (2003), *Modelling wetland extent using terrain indices, Lake Taupo*, CSIRO Land and Water, Australia.

Palacio Aponte A. G., Noriega R. y Zamora P. (2002), "Caracterización ecológica del paisaje conocido como bajos inundables. El caso del Área Natural Protegida Balamkín, Campeche", Investigaciones *Geográficas*, vol. 49. pp. 57-73.

Pielke Roger A. Jr. (1999), "Nine Fallacies of Floods", *Climatic Change*, vol. 42, pp. 413–438.

Posada Vanegas G., B.E. Vega Serratos, y R. Silva Casarín (eds.) (2013), *Peligros Naturales en el Estado de Campeche. Cuantificación y Protección Civil*, Universidad Autónoma de Campeche, CENECAM-Gobierno del Estado de Campeche, CENAPRED, México.

Rivera-Arriaga, E., G. Palacio Aponte, G. Villalobos Zapata, R. Silva Casarín y P. Salles Rivera-Arriaga, E., Afonso de Almeida (2004), *Evaluación de Daños en las Zonas Costeras de la Península de Yucatán por el Huracán "Isidoro", Desarrollo de Propuestas de Investigación y Mitigación en Manejo Integrado de Recursos Costeros*, Sección Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, México.

Tricart Jean y Jean Kilian (1982), *La eco-geografía y la ordenación del medio natural. Barcelona*, Anagrama, España.

White B. W. (1988), *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*, Oxford Univesity Press, New York.

Wichmann V. and Becht, M. (2003), "Modelling of geomorphic processes in an Alpine catchment". *Department of Physical Geography, University of Goettingen, Germany*.

Zonneveld Isaak S. (1989), "The land unit - A fundamental concept in landscape ecology, and its applications", Landscape *Ecology,* vol. 3, no. 2, pp. 67-86.

EL RIESGO DE INUNDACIÓN SUSCRITO A LOS CAMBIOS DE USOS DE SUELO DE CUENCAS PERIURBANAS

15

El riesgo de inundación suscrito a los cambios de usos de suelo de cuencas periurbanas

Daniel González Correa[1*]; Rocío Becerril-Piña[2**]; Carlos A. Mastchi-Loza[3**]; Mónica Cervantes Jiménez[4**]; Aurelio Guevara Escobar[5**]; Ma. de Lourdes Romo Aguilar[6]; Enrique González Sosa[7**]

El aumento de la población y la migración hacia los centros urbanos ha generado cambios en los usos del suelo y en la urbanización del planeta, de manera que para el año 2050, el 70 % la población mundial habitará en zonas urbanas, fundamentalmente en áreas periurbanas. Tales cambios favorecen un incremento en el escurrimiento y un aumento en el riesgo de inundación. En este trabajo se analizó el efecto de los cambios de uso de suelo en dos cuencas periurbanas en el norte de la ciudad de Querétaro (San José y Amazcala). El análisis de cambio de uso de suelo fue llevado a cabo con imágenes satelitales. Los resultados mostraron que en la microcuenca de San José, en 1986 el 17.8 % (4.9 km^2) estaba ocupado por áreas urbanas, 14.1% (3.8 km^2) por matorral y en su mayoría por selva baja 68.1% (18.7 km^2). En 2001 la urbanización paso a 25.7 % (7.1 km^2), el matorral a 26.87% (7.4 km^2) y la selva baja a 46.9% (12.9 km^2). Para el año de 2015, la urbanización abarco 41.26% (11.4 km^2) y se redujeron las áreas de matorral y selva baja a 19.18% (5.3 km^2) y 39.46% (10.9 km^2), respectivamente. La microcuenca de Amazcala en los últimos treinta años presentó un incremento de 4 % en el desarrollo

1 E-mail: danielglz@gmail.com
2 E-mail: rbecerrilp@uaemex.mx
3 E-mail: mastachi@uaemex.mx
4 E-mail: monica.cervantes@uaq.mx
5 E-mail: guevara@uaq.mx
6 El Colegio de la Frontera Norte, sede Juárez. Av. Insurgentes No. 3708, Col. Los Nogales CP 32350 Cd. Juárez, Chihuahua. E-mail: lromo@colef.mx
7 Autor de correspondencia: egs@uaq.mx
* Universidad Autónoma de Querétaro. CU DEPFI. Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, 76010 Santiago de Querétaro, Querétaro
** Universidad Autónoma del Estado de México. CIRA. Carr. Toluca-Atlacomulco Km 14.5 Unidad San Cayetano. Toluca, Estado de México.

urbano. La superficie de las áreas de cultivo pasó de 23.4% y 31.58%, y la selva baja caducifolia aumento de 65% a 76 %. Mediante el modelo Shetran fueron obtenidos los hidrogramas de salida teniendo en cuenta los cambios de usos de suelo. Con el modelo calibrado para el año 2015, fueron modelados los escenarios de 1986 y 2001 y 2015 para compararlos con el estado actual, con un tamaño de pixel de 300x300 m. Con el propósito de percatarse cuáles podrían ser los impactos posible por los cambios de uso de suelo en el riesgo de inundación en condiciones de lluvia similares, al 2015, fueron estimados los hidrogramas y en los diferentes componentes del balance hidrológico (infiltración, escurrimiento y evapotranspiración) para el año 2050. Los resultados evidenciaron un aumento el gasto pico, en más de 3 veces, manifestando un incremento en el riesgo de inundación. Así mismo, el incremento del gasto pico puede estar relacionado con la perdida de matorral y pasto. El primero porque interviene en la intercepción y el segundo en el retardo de los escurrimientos.

Palabras clave: cambios de usos de suelo, modelación hidrológica, inundaciones

15.1. Introducción

El crecimiento de la población y la migración hacia las áreas urbanas en el último siglo ha provocado cambios significativos en los usos del suelo a lo largo de todo el planeta, de forma que la proyección, por parte de la ONU, para el 2050 indica una concentración del 70% de la población mundial en áreas urbanas (Engelman, 2009:22). La expansión de la urbanización inevitablemente conduce a la pérdida de áreas naturales y de zonas agrícolas sobre la periferia de centros urbanos (Mejía y Moglen, 2010:1), denominadas por áreas periurbanas. Las áreas periurbanas son referidas como zonas con una mezcla de áreas urbanas-tierras de cultivo-coberturas naturales. En el contexto del riesgo de inundación, las áreas urbanas y periurbanas presentan diferente respuesta hidrológica, debido a los cambios o pérdida de la cobertura vegetal y/o por incremento de la infraestructura urbana formada por elementos quasimpermeable, los cuales reducen la infiltración en el suelo, mientras que la introducción de drenaje artificial remplaza la traza y geometría de los senderos naturales por donde escurre el agua (Miller *et. al.*, 2014:60). Esta combinación generalmente tiene efectos importantes en la respuesta hidrológica,

tales como: una respuesta rápida de los escurrimientos y aumento de los volúmenes del flujo de ríos (Hawley y Bledsoe, 2011:69), que pueden ser incluso catastrófica. La necesidad de una buena comprensión de las alteraciones de la respuesta hidrológica producida por los cambios del uso de suelo, para establecer políticas públicas y planes de desarrollo sustentables, son necesarios estudios que tomen en cuenta los efectos de los cambios de uso de suelo para tomar decisiones de prevención científicamente soportados. De este modo, para asegurar la eficacia de las estrategias políticas es importante caracterizar la distribución espacial de los usos de suelo y sus efectos en el riesgo de inundaciones, tanto en zonas urbanas como periurbanas. Además, integrar las nuevas interacciones hidrológicas a partir de los cambios de uso del suelo-cobertura vegetal y los efectos del cambio climático. Actualmente existen avances significativos en la valoración de inundaciones, tanto en la medición, clasificación y análisis con sensores remotos para la predicción en áreas urbanas y periurbanas, así como con tecnologías de imágenes de alta y media resolución con modelos de lluvia-escurrimiento. Sin embargo, es fundamental seleccionar el modelo hidrológico que pueda representar en forma pertinente la contribución de las zonas periurbanas, permeables e impermeables originadas por el cambio de uso de suelo. La modelación de futuros escenarios aumenta y mejora el conocimiento las alteraciones de las condiciones de superficie, por los cambios de varios aspectos del ciclo hidrológico regional (Neupane y Kumar, 2015:419), principalmente el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal. Por consiguiente, el objetivo de este trabajo fue establecer a través de la modelación una valoración de los efectos de cambios de uso de suelo en las denominadas cuencas periurbanas antes de pasar a la metropolización, lo cual lleva a una respuesta hidrológica diferente a la respuesta que ocurre en cuencas urbanas.

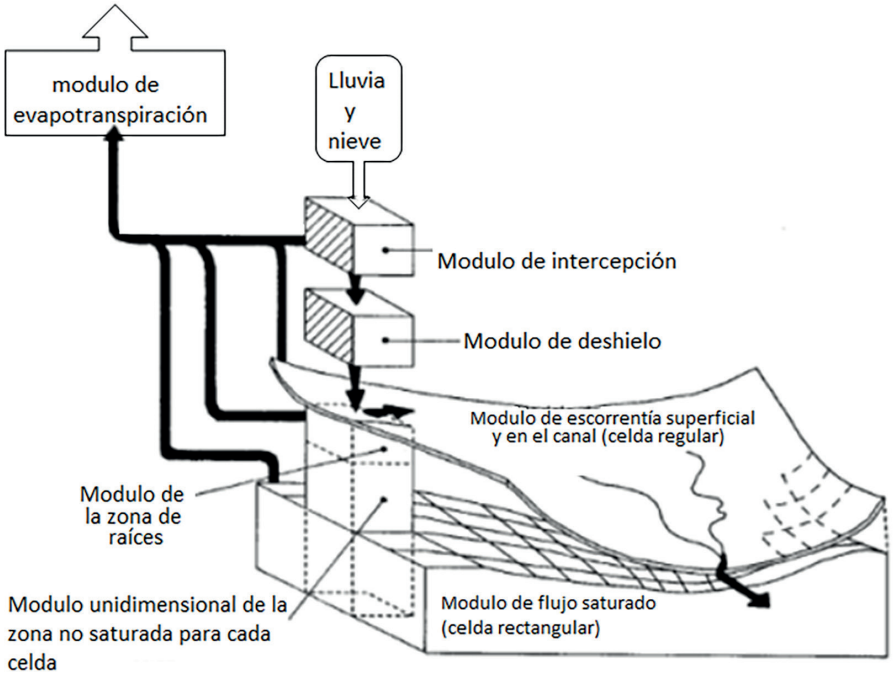
15.2. Marco teórico, modelo Shetran

SHETRAN es un modelo de base física, distribuido, determinístico, diseñado para simular el flujo de agua, transporte de sedimentos y transporte de contaminantes a escala de cuenca (Ewen y Parkin, 2000:250). SHETRAN simula con gran detalle todos los componentes del ciclo hidrológico, posee una fuerte base física, con lo cual los parámetros surgidos de la aplicación serían extrapolables a cuencas con caracterís-

ticas similares. Razón por la cual, la aplicación del modelo suele utilizarse para lugares donde son carentes o insuficientes las mediciones (Villa *et. al.*, 2014:2). Las variables de entrada o forcing (en inglés) del modelo son: la precipitación, evaporación de referencia medida o calculada, la precipitación neta que llega a la superficie que es calculada teniendo en cuenta la intercepción y evaporación debida al dosel de la vegetación.

Son calculadas las tasas de evaporación de la vegetación, del suelo y los cuerpos de agua. El volumen infiltrado es evaluado, a partir de cantidad de la precipitación neta o el escurrimiento de las aguas superficiales, ya que modela la conexión entre celdas. Los flujos de la zona saturada son calculados para un acuífero anisotrópico, libre y heterogéneo. El escurrimiento superficial se genera por el exceso de infiltración o por el exceso en los mecanismos de saturación (respuesta Hortoniana). Otro aspecto importante es que el modelo es de libre acceso y es un referente para la modelación hidrológica en el Reino Unido.

15.3. Materiales y métodos



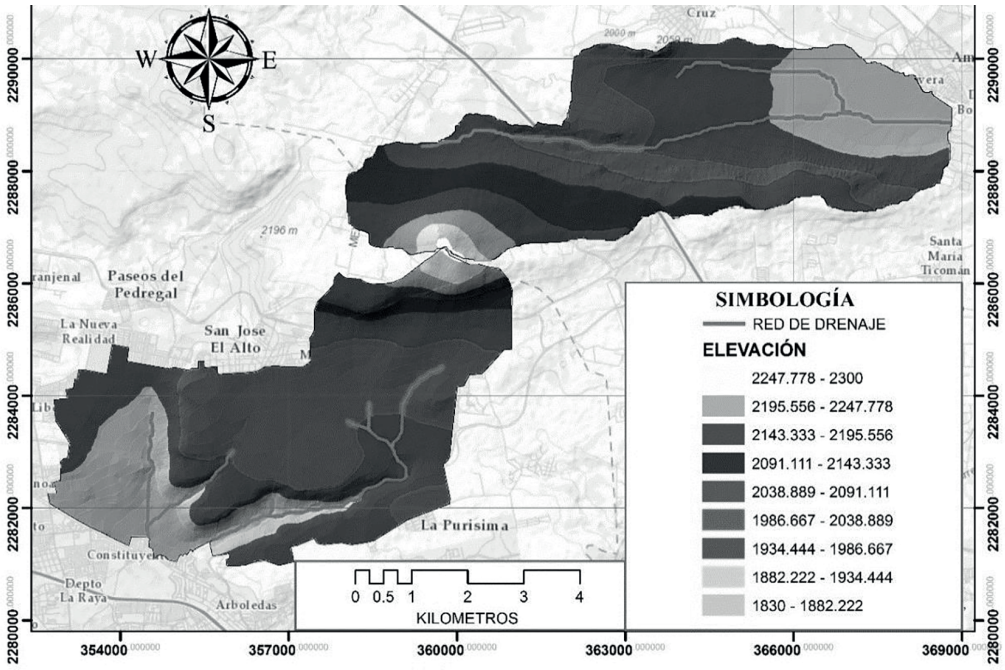
Gráfica 15.1. Esquema de los componentes principales de SHETRAN.
Fuente: (Ewen y Parkin, 2000:252).

15.3.1.Descripción de la zona de estudio

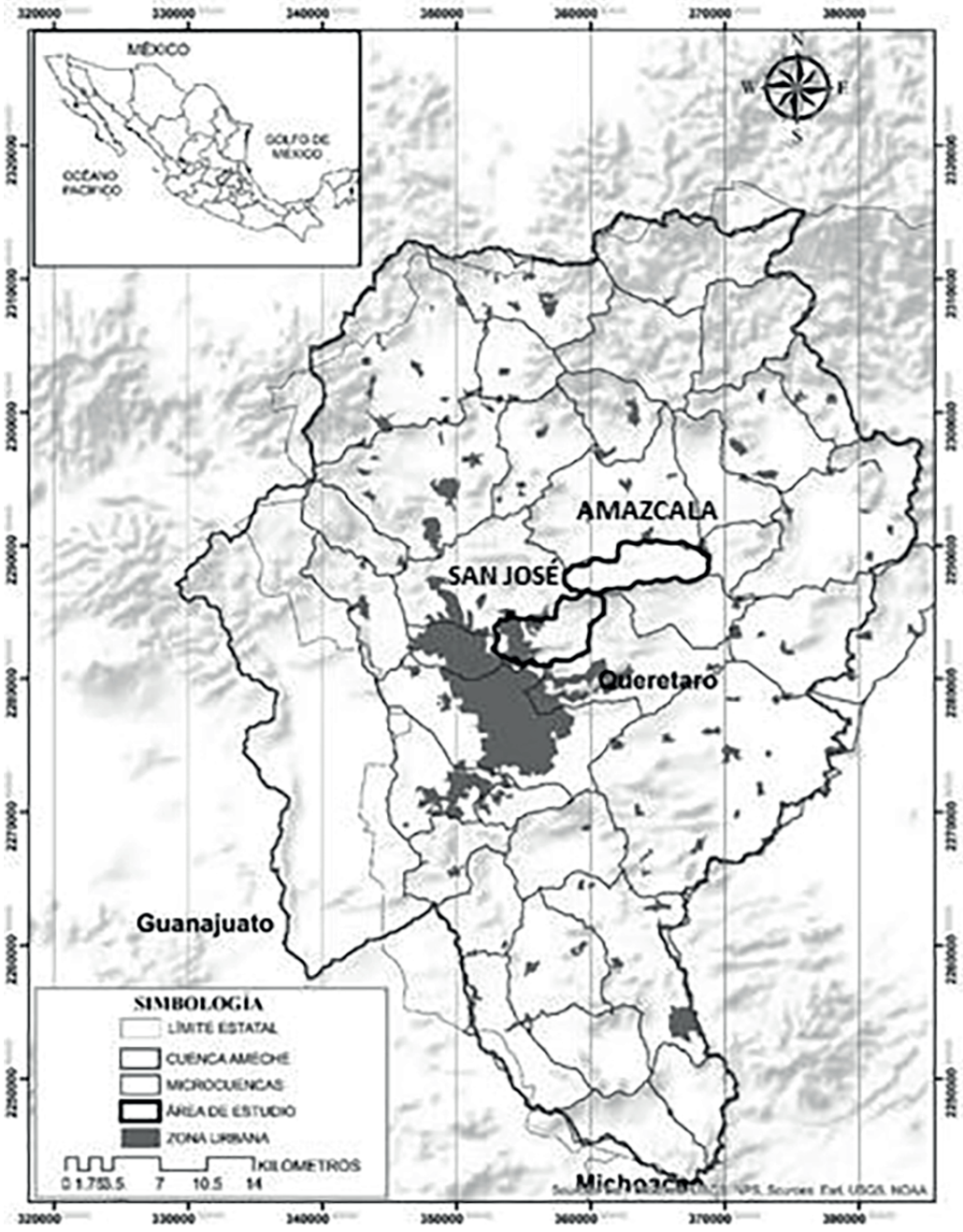
Las microcuencas San José y Amazcala son de áreas similares y colindantes entre ellas, pero contrastantes en su superficie urbanizada (45% vs 5%) respecto su área total (27 km^2). La cobertura vegetal y edafología también son similares (Gráfica 15.2). Las microcuencas están situadas al noreste de la ciudad de Querétaro y pertenecen a la región hidrológica Lerma – Santiago y la cuenca del Río Laja, en la parte central de México y las dos microcuencas drenan hacia al Río Querétaro (Gráfica 15.3). La urbanización de la ciudad de Querétaro actualmente agrupa a los municipios de Querétaro, El Marqués, Corregidora y Huimilpan, lo cual ha generado cambios súbitos de uso de suelo y un crecimiento de las zonas periurbanas, por las necesidades boyantes del crecimiento industrial y económico del altiplano de México, (INEGI, 2015).

En la Gráfica 15.4 es mostrado el comportamiento del crecimiento de la población en Querétaro, el cual tiende a ser de forma exponencial a partir de 1940.

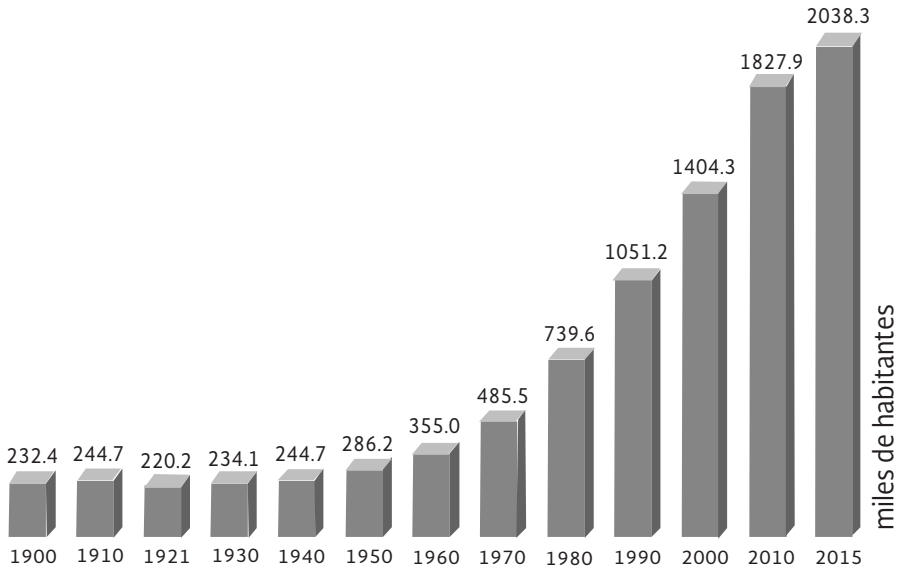
Igualmente puede observarse que durante el periodo de 1910-1940 el crecimiento fue prácticamente constante, a pesar de la tasa negativa (-10 %), durante los años



Gráfica 15.2. Modelo digital de elevaciones de las microcuencas de estudio. González (2015).



Gráfica 15.3. Mapa de ubicación de las microcuencas Amazcala y San José, dentro de la cuenca del Río Querétaro, en el estado de Querétaro.



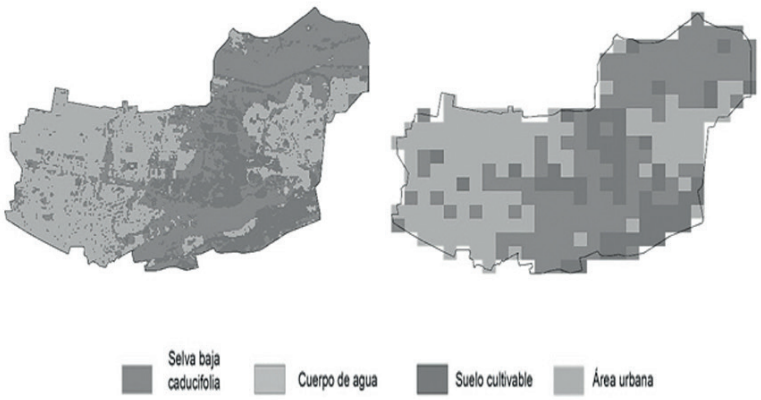
Gráfica 15.4. Crecimiento demográfico en el estado de Querétaro. Fuente: (INEGI, 2015).

1910-1921 ocasionada por la lucha armada de la Revolución Mexicana

15.4. Evaluación de los cambios de uso del suelo

Con base en el análisis de imágenes satelitales LANDSAT 8, la cobertura vegetal de las cuencas de San José y Amazcala, fue clasificada para identificar el cambio de uso del suelo de un periodo de 30 años. Las imágenes Landsat fueron obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), con espaciamientos aproximados de 15 años (1986, 2001 y 2015) a fin de diferenciar los cambios sustantivos en la superficie de ambas cuencas. El uso del suelo se clasificó usando las bandas 3, 4, y 5 de las imágenes satelitales con resolución de 30 m por pixel. La clasificación (supervisada) se efectúo con el paquete Arcmap (10.1), especificando las categorías siguientes: vegetación (selva baja caducifolia), matorrales, agrícola, cuerpos de agua y zona urbana.

Es importante mencionar que debido a las restricciones del modelo SHETRAN en su ver-



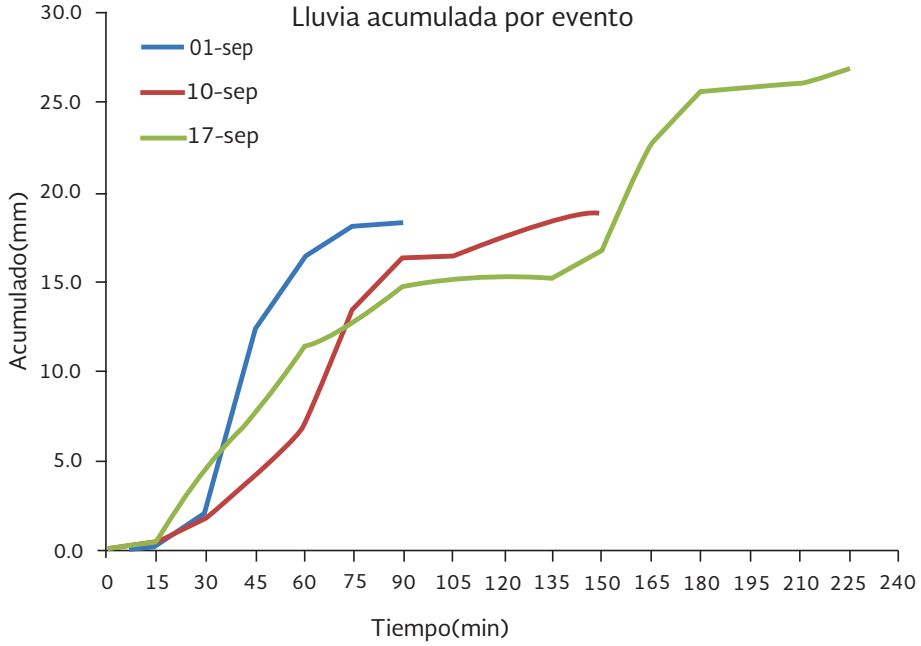
Gráfica 15.5. Usos de suelo en la microcuenca San José, resoluciones: a) 30 m y b) 300 m.

sión libre (4.4.1) de 36 filas y 36 columnas fue necesario ajustar el cambio de la resolución del tamaño de los pixeles de 30 a 300 m. En la Gráfica 15.5 se ilustra el ajuste de tamaño de los pixeles y puede destacarse que globalmente no hay diferencias significativas.

15.5. La precipitación y el escurrimiento en las cuencas

La precipitación se registró en intervalos de 10 minutos. Para la microcuenca de San José en la estación del tipo (VANTAGE PRO 2 PLUS) situada en la Universidad Tecnológica de Querétaro (UTEQ)- Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (CEA) que transmite en tiempo real. En Amazcala se instaló una estación automatizada (Vaisala, modelo WXT510. La precipitación acumulada en Amazcala durante el periodo del 8 de junio al 21 de diciembre, fue de 620.5 mm superior la media anual, de 550 mm. en la cuenca del río Querétaro. En el caso de la microcuenca San José la lluvia acumulada fue 355.1 mm. Para el estudio solo fueron escogidos tres eventos de lluvia de septiembre de 2015 mismos que fueron usados para la calibración de la modelo.

Los eventos son mostrados en la Gráfica 15.6. Con el propósito calibrar el gasto pico producto de la modelación se le dio seguimiento a la evolución del nivel del agua y al tiempo en el cual alcanzó el nivel máximo, mediante fotografías a las marcas de referencia del agua: en la salida de la cuencas. El gasto pico también fue calculado con la ecuación de Manning bajo la hipótesis de flujo uniforme y permanente, midiendo únicamente la pendiente de fondo en un tramo suficientemente recto y la geometría de la sección a la salida de las cuencas. Ya que actualmente las secciones de los cauces se encuentran revistadas y son de sección prismática bien definida, lo cual apoya el criterio antes señalado. El gasto máximo con la ecuación de Manning resulto de 96.5 m^3s^{-1} para San José y de 25 m^3 s^{-1} para Amazcala. Los gastos en la cuenca de San José, para los eventos del 1, y 10 y 17 de septiembre fueron 16.68 m^3s^{-1}, 18.73 m^3s^{-1} y 21.7 m^3s^{-1}, respectivamente. Gastos del orden 17% y 28%, inferiores al máximo, respectivamente. Es importante destacar la dificultad que represento trasladarse a la sección de control, no siempre fue posible llegar a la salida de la microcuenca a observar la marca de los niveles máximos agua. Además, que las observaciones ocurrieron durante la noche y la turbulencia era importante para distinguir un nivel preciso del agua. Lo cual podría incidir en incertidumbres sobre el gasto real asociado a los tres eventos de septiembre de 2015.



Gráfica 15.6. Lluvia acumulada para los tres eventos- 1, 10 y 17 septiembre 2015.

15.6. Análisis de sensibilidad de parámetros

Para solventar la carencia y la imprecisión de algunos parámetros requeridos por el modelo SHETRAN, además de reducir la incertidumbre de los escurrimientos, se efectúo un análisis de sensibilidad de ciertos parámetros. El análisis fue realizado para parámetros tomados de la literatura, los cuales son resumidos en el Cuadro 15.1. Diferentes simulaciones fueron realizadas para identificar la sensibilidad a cambios en 50% del valor medio del parametro. En cada corrida fue modificado el valor medio de un solo un parámetro, conservando los valores de los otros parámetros. En los Cuadros 2 y 3 son mostrados los resultados del análisis de sensibilidad para la modelación del evento del 11 de septiembre, en la cuenca de San José. En la última columna se presenta la diferencia en porcentaje entre el gasto pico simulado con el valor medio del parámetro y el gasto pico para el valor modificado de cada parámetro. Los resultados del análisis de sensibilidad expusieron que la relación EA/EP (Evaporación actual entre Evapotranspiración potencial) es el parámetro más sensible, dado que influencia en el gasto pico de los tres eventos observados, sin importar el tipo de uso de suelo. Los parámetros con menor influencia fueron la retención de la lluvia (intercepción): el almacenamiento de dosel, índice de área foliar. Los parámetros propios del suelo: profundidad de la zona radical, profundidad del estrato de suelo, contenido de agua saturado y contenido de agua residual, provocaron cambios mínimos en el gasto máximo (Cuadro 15.2 y Cuadro 15.3).

Cuadro 15.1. Valores medios de los parámetros por uso de suelo, para una resolución de pixel de 300 x 300m.

Descripción del parámetro	Selva baja caducifolia	Matorral	Área urbana	Cultivos
Capacidad de almacenamiento del dosel (mm)	1.5	1.1	0.5	0.8
Índice de área foliar (adimensional)	1.8	0.8	0.01	1.5
Profundidad radical (m)	0.7	0.3	0.005	0.4
Relación EA/EP	0.15	0.1	0.001	0.18

Fuente: González (2015)

Cuadro 15.2. Análisis de sensibilidad comparando el gasto máximo del evento del 1 de septiembre de 2015 en la microcuenca San José.

Uso del suelo	Relación Evaporación Actual/ Evaporación Potencial	Gasto máximo (m^3/s)	Diferencia
	(AE/EP)		
Selva baja caducifolia	0.05	48.67	3.70%
Selva baja caducifolia	0.5	24.28	-48.30%
Matorral	0.05	33.45	-28.70%
Matorral	0.5	47.11	0.40%
Área urbana	0.2	44.95	-4.20%
Área urbana	0.5	21.23	-54.80%
	Almacenamiento de dosel (mm)		
	S		
Selva baja caducifolia	2.25	45.67	-2.70%
Selva baja caducifolia	0.75	48.08	2.50%
Matorral	1.65	46.75	-0.40%
Matorral	0.55	47.09	0.40%
Área urbana	0.75	46.91	0.00%
Área urbana	0.25	47.01	0.20%
	Índice de área foliar (adimensional)		|
	LAI		
Selva baja caducifolia	2.7	46.92	0. 0%
Selva baja caducifolia	0.9	47.49	1.20%
Matorral	1.2	46.77	-0.30%
Matorral	0.4	47.22	0.60%
Área urbana	0.2	46.97	0.10%
Área urbana	0.5	46.89	-0.10%
	Profundidad de raíz (cm)		
	Z raíz		
Selva baja caducifolia	90	48.39	3.10%
Selva baja caducifolia	30	45.96	-2.00%
Matorral	10	47.22	0.60%
Matorral	70	46.2	-1.50%
Área urbana		48.08	2.50%
Área urbana		45.96	-2.00%

Cuadro 15.3. Análisis de sensibilidad comparando el gasto máximo del evento del 1 de septiembre de 2015 en la microcuenca San José

SUELO		Valor	Gasto máximo (m^3/s)	Diferencia
Profundidad del estrato de suelo (m)	Z	2	46.76	-0.30%
Contenido de agua saturado (%)	θs	47.9	46.98	0.10%
Contenido residual de agua (%)	θr	5.6	46.64	-0.60%
Profundidad del estrato de suelo (m)	Z	3	46.74	-0.40%
Contenido de agua saturado (%)	θs	52.9	46.82	-0.20%
Contenido residual de agua (%)	θr	21.6	47.24	0.70%

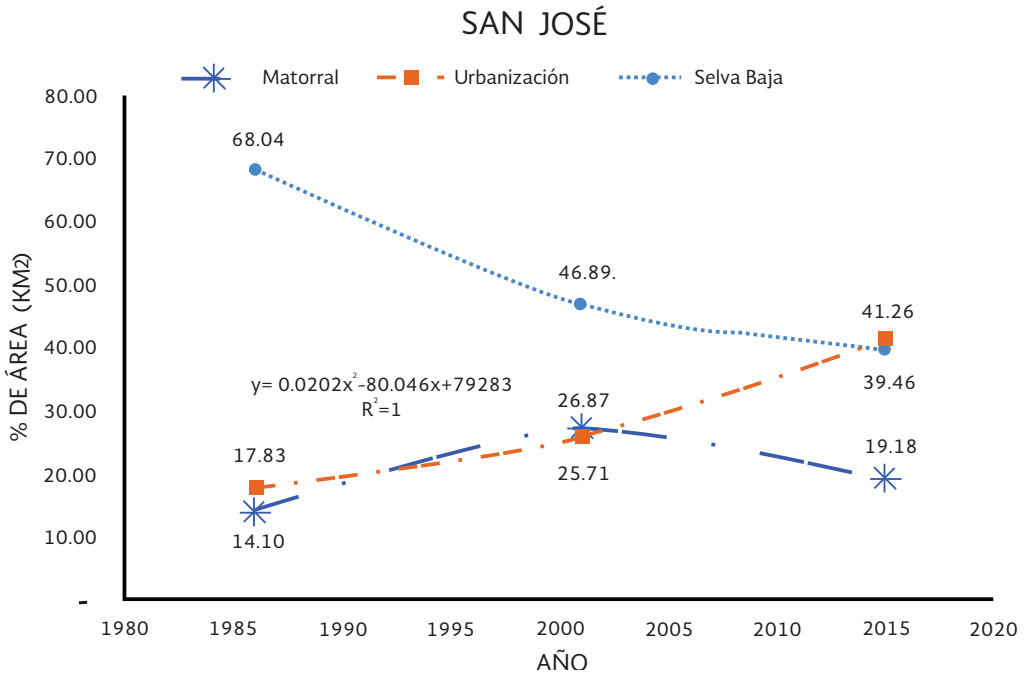
15.7. Simulación de escenarios futuros

A fin mejora el conocimiento las alteraciones de las condiciones de superficie en condiciones futuras y establecer una comparación con los resultados de la modelación descrita en los párrafos anteriores, teniendo como referente los del año 2015, se procedió a investigar la posible respuesta ante eventos de mayor magnitud y valorar el riesgo de inundación, construyendo escenarios para el año 2050 conservando las tendencias de cambios de uso de suelo mostradas en la Gráfica 15.7 y Gráfica 15.8, con precipitaciones de diferentes periodos de retorno. Es conveniente destacar que fue seleccionado el año 2050, teniendo en cuenta las proyecciones de INEGI, donde establece que el 70% de la población habitará en zonas urbanas, lo cual coincide con la tendencia de crecimiento observada en la imagen de Google Earth, donde el 69.5% de urbanización se concentrará dentro de la microcuenca de San José para el año 2050. Igualmente, la tendencia urbanización en la microcuenca de Amazcala percibida en la imagen de Google Earth, deja ver la posibilidad de un crecimiento significativo de la urbanización en la parte alta, al oeste y norte de la cuenca, como puede observarse en la Gráfica 15.7. Las características de las precipitaciones (intensidad, duración y periodo de retorno) fueron tomadas de la publicación para el estado de Querétaro por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT).

15.8. Resultados y discusión

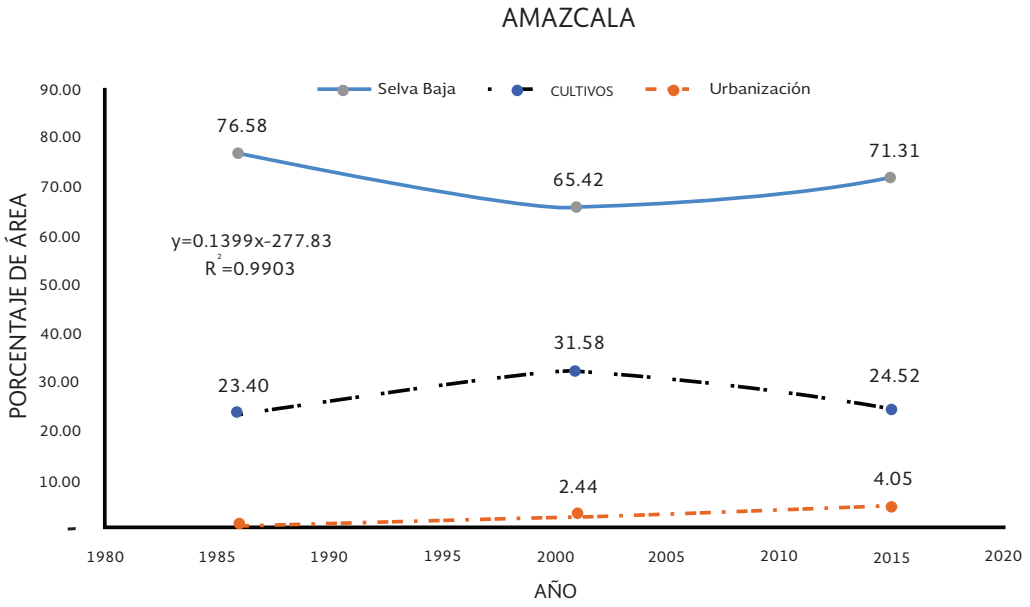
15.8.1. Tendencia de los cambios de uso de suelo

En ambas cuencas la tendencia de cambios de uso del suelo fue especificada comparando las diferencias encontradas en las imágenes satelitales de 1998, 2001 y 2015. En la microcuenca San José (Gráfica 15.5) el crecimiento de la mancha urbana en 30 años resulto el más revelador, pasando de 17% a 41%, concentrándose en la parte media-baja y salida de la microcuenca. Probablemente debido a las ventajas de la topografía, ya que representa menos dificultad para la urbanización. En consecuencia del detrimento de pérdida de áreas vegetadas, las cuales favorecen la regulación y disminución de los escurrimientos. En cuanto a la repartición de los cambios de uso del suelo en Amazcala (Gráfica 15.7) no son alarmantes hasta el 2015, la tendencia de cambio es moderada.



Gráfica 15.7. Evolución del cambio en la cobertura vegetal en la microcuenca San José

Tocante a la superficie de cultivos, destaca un cambio del 23.4% a 31.58%. La selva baja caducifolia presenta una ligera disminución del cuatro por ciento, paso del 76% y 71%, atribuido a los recientes desarrollos urbanos, principalmente al denominado Zibatá, situado en la parte alta al sur de la microcuenca de Amazcala, como puede verse en la Gráfica 15.8.



Gráfica 15.8. Evolución del cambio en la cobertura vegetal en la microcuenca Amazcala

15.9. Importancia de la resolución tamaño de pixel en la modelación hidrológica

Uno de los principales aspectos de los modelos hidrológicos de parámetros distribuido es la capacidad de resolución numérica en función del tamaño del pixel. Además no siempre la información contenida en las imágenes satelitales es de la misma resolución espacial, lo cual también dificulta la integración de la información a un solo tamaño de pixel. En este contexto, debido a que el modelo Shetran en su versión libre (4.4.1) está limitado a una matriz de 36 filas y 36 columnas, fue necesario el cambio de la resolución del tamaño de los pixeles de 15x15 m (CEM 2.0, INEGI) a 300x300

m (Shetran), para evaluar su influencia en la modelación, ya que afecta la distribución espacial de los usos del suelo. Para identificar el efecto del tamaño del pixel fue comparado los usos del suelo con tres tamaños 15, 125 y 300 m. La comparación mostro una afectación importante en la clasificación de los cuerpos de agua con un tamaño de pixel de 125 x 125 m, y para las demás áreas se comporta de manera similar. Las consecuencias en la modelación fueron analizadas en la cuenca de San José, con pixel de 125 x 125 m y de 300 x 300 m para los tres eventos de precipitación elegidos y manteniendo los valores de los parámetros considerados para la modelación de los gastos pico (Cuadro 15.4). Como puede verse en el Cuadro 15.4, con el pixel a 125 x 125 m el gasto pico resulta similar al gasto observado. Pero al cambiar a resolución de 300 x 300 m el gasto pico es sobreestimando en 10%, probablemente a que la nueva superficie del pixel se incrementa y agrupa mayoritariamente el uso del suelo dominante dentro del pixel, cuando en realidad el pixel podría estar fragmentado con diversas combinaciones de uso de suelo (mosaico).

Para tomar en cuenta el efecto de la resolución del pixel, dado que era imperativo trabajar con una resolución de 300x300 m, y por la limitante del modelo, se decidió ajustar únicamente el parámetro de evapotranspiración para ponderar la influencia del tamaño del pixel, por ser el parámetro mayormente sensible, como se muestra en el Cuadro 15.4.

Cuadro 15.4. Comparacion de gasto pico bajo diferentes tamaños de pixel en la Microcuenca San José.

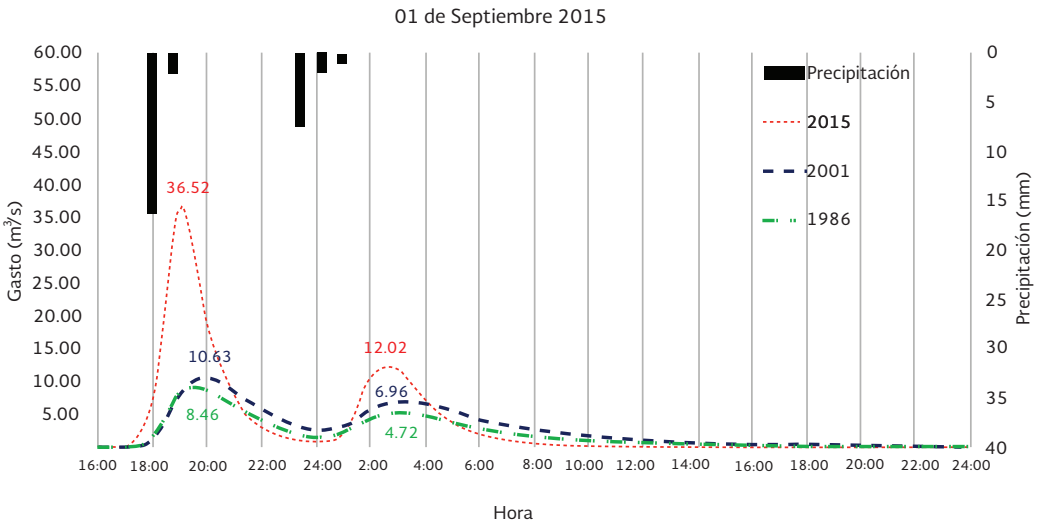
	Gasto pico (m^3/s)				
Evento	**Observado**	**Modelado 125 x 125 m**	**Diferencia**	**Modelado 300 x 300 m**	**Diferencia**
01-sep	16.68	16.47	0.21 (-1.21 %)	17.88	1.2 (+7.19 %)
10-sep	18.73	17.95	0.78 (-4.16 %)	17.10	1.63 (-8.7 %)
17-sep	21.7	20.94	0.76 (-3.5 %)	23.85	2.15 (+9.9 %)

15.10. Modelación de escenarios retrospectivos con los eventos del 01, 10 y 17 de septiembre de 2015

Una vez investigada la influencia de la resolución del tamaño de pixel y calibrados los parámetros del modelo para las condiciones actuales de ambas cuencas, se procedió explorar la respuesta hidrológica de las cuencas cuando éstas estuvieran expuestas a precipitaciones semejantes a los eventos del 1, 10 y 17 de septiembre de 2015. Principalmente para establecer una retrospectiva de los cambios significativos en la repartición de los componentes del balance hidrológico, esencialmente para valorar sus efectos en el riesgo de inundación, suscrito en los cambios de uso del suelo. A continuación son mostrados los resultados de modelación los escenarios de cambios de uso de suelo para 1986 y 2001, con los mismos valores de los parámetros de la simulación de 2015.

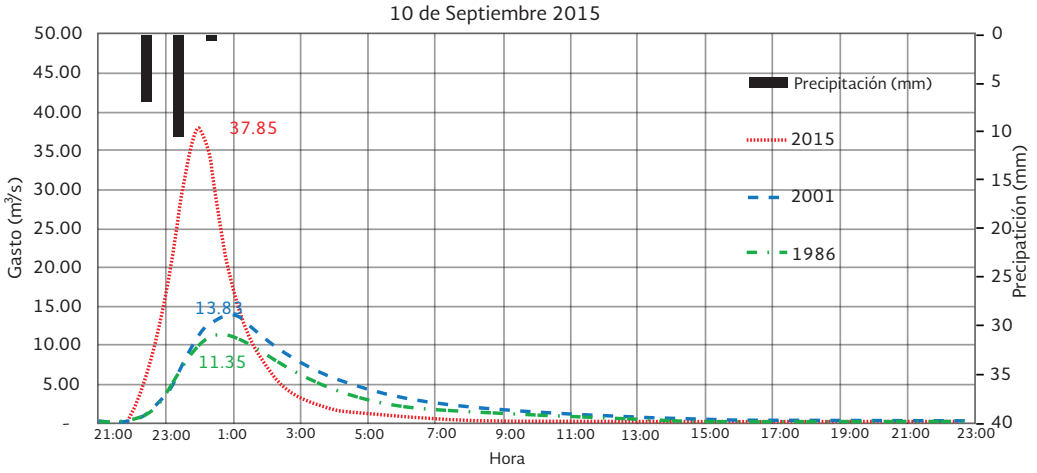
15.11. Reconstrucción del escenario 1986 y 2001 en la microcuenca San José

En la Gráfica 15.9 son expuestos los resultados generados con el evento del 1 de septiembre de 2015 y teniendo en cuenta la repartición de uso del suelo en 1986, 2001 y 2015, en donde puede notarse un incremento en el gasto pico, para el periodo de 1986-2001, de 25.65% (8.46 m^3s^{-1} –10.63 m^3s^{-1}) y de 3.4 veces (10.63 m^3s^{-1}-36.52 m^3s^{-1}) entre 2001-2015, mismo que representa un aporte adicional de 1.9 m^3s^{-1} por año. En cambio el incremento anual del gasto del periodo 1986-2001 es de apenas 0.18 m^3s^{-1}, posiblemente porque el crecimiento urbano aún era fragmentado, colaborando con un volumen de infiltración que favorecía una mejor regulación de los escurrimientos. Por otra parte, también puede observarse en la Gráfica 15.9, como los tiempos de concentración del gasto pico también cambian en correspondencia con los cambios de uso de suelo, principalmente por los cambios de suelo de matorral a urbano.



Gráfica 15.9. Simulación del evento del 1 de septiembre 2015 para los usos de suelo de 2015, 2001 y 1986 en la microcuenca San José.

Igualmente ocurre en la parte de la recesión los hidrogramas de 1986 y 2001. Sin embargo, respecto al 2015, la respuesta es tenue. En la Gráfica 15.10 son comparados los resultados de la modelación del evento del 10 de septiembre. Puede verse que el gasto pico es de 11.35 m^3s^{-1} (40% menos al observado en 2015, 18.75 m^3s^{-1}), inferior en 36.5% al generado en 2001, de 37.85 m^3s^{-1}.



Gráfica 15.10. Simulación del evento del 10 de septiembre 2015 para los usos de suelo de 2015, 2001 y 1986 en la microcuenca San José.

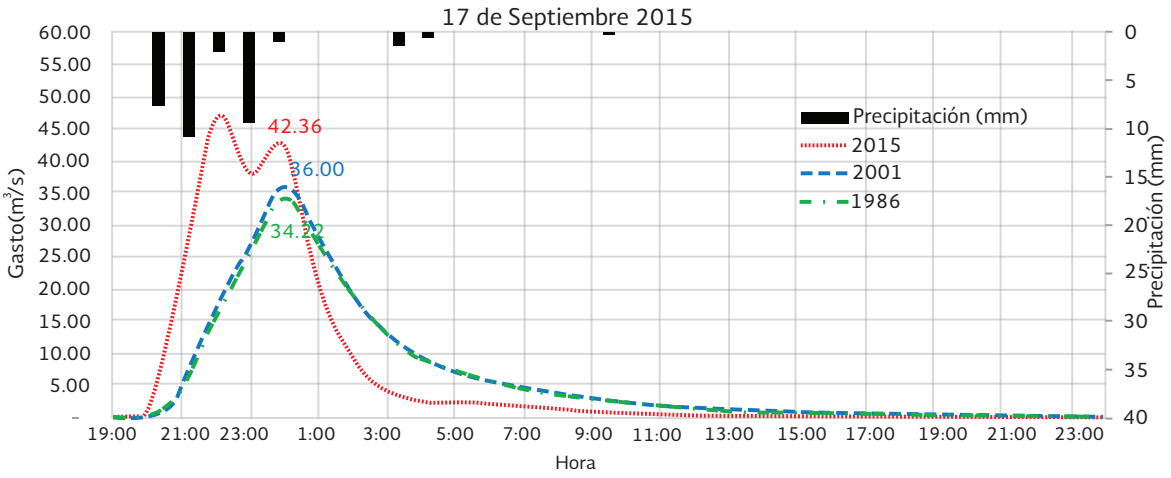
También podemos vislumbrar como los tiempos de respuesta son menores en proporción a la tasa de cambio de uso de suelo urbano, es decir en respuesta a la impermeabilización de la superficie provocada por la urbanización, incrementando el volumen y la velocidad de desalojamiento del escurrimiento en la cuenca. En la Gráfica 15.12 son mostrados los hidrogramas producto de la modelación del evento del 17 de septiembre de 2015. Puede verse un gasto pico similar para los años 1986 y 2001, levemente un incremento del 5.2% en el gasto pico (34,2 1 m^3s^{-1}-36.0 m^3s^{-1}), en correspondencia con los cambios hallados de uso del suelo en ese periodo. Cabe indicar que el hidrograma para el año base de 2015, fue bimodal, dos picos máximos en respuesta al evento de lluvia (46.0 m^3s^{-1} y 42,36 1 m^3s^{1}), con un lapso sin lluvia de 30 min, para después reanudarse la lluvia por media hora. El crecimiento del gasto anual entre los dos periodos fue 0.12 m^3s^{-1} y de 0. 66 m^3s^{-1}, para los periodos 1986-2001 y 2001-2015, respectivamente. Está respuesta debe estar asociada con el bajo desarrollo de la mancha urbana, salvo a la salida de la cuenca.

15.12. Reconstrucción del escenario 1986 y 2015 en la microcuenca Amazcala

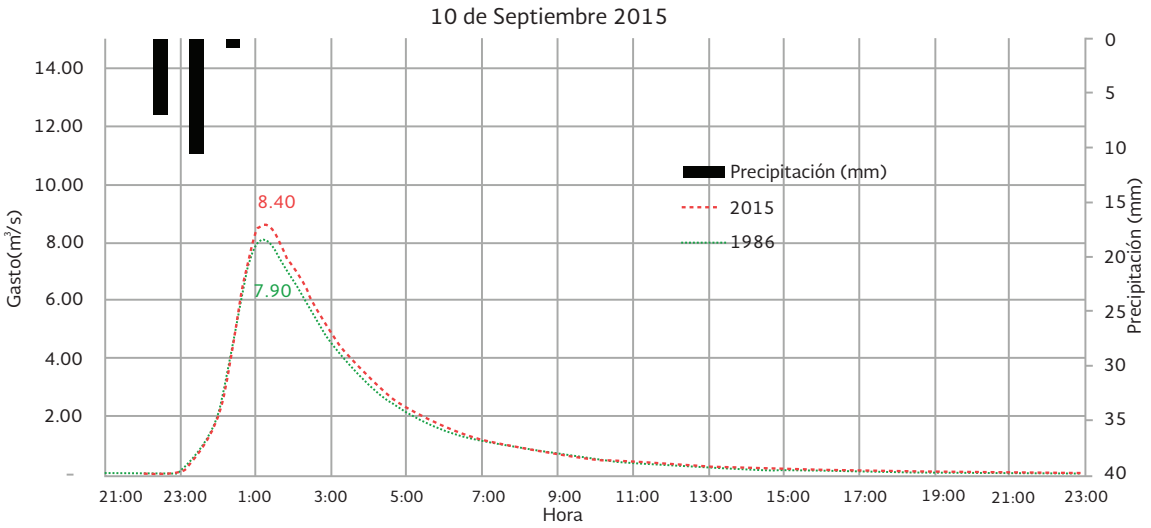
En Amazcala a pesar que no fue posible verificar el gasto pico como en la cuenca de San José a causa de que la alcantarilla de salida estaba completamente azolvada cuando se llevó a cabo la visita del sitio, fue realizada la modelación para el periodo 1986-2015, porque como se mostró anteriormente, en el periodo 1986-2001, la urbanización en la cuenca fue imperceptible.

En términos generales las simulaciones mostraron respuestas prácticamente idénticas, como puede observarse en la Gráfica 15.11 y Gráfica 15.13.

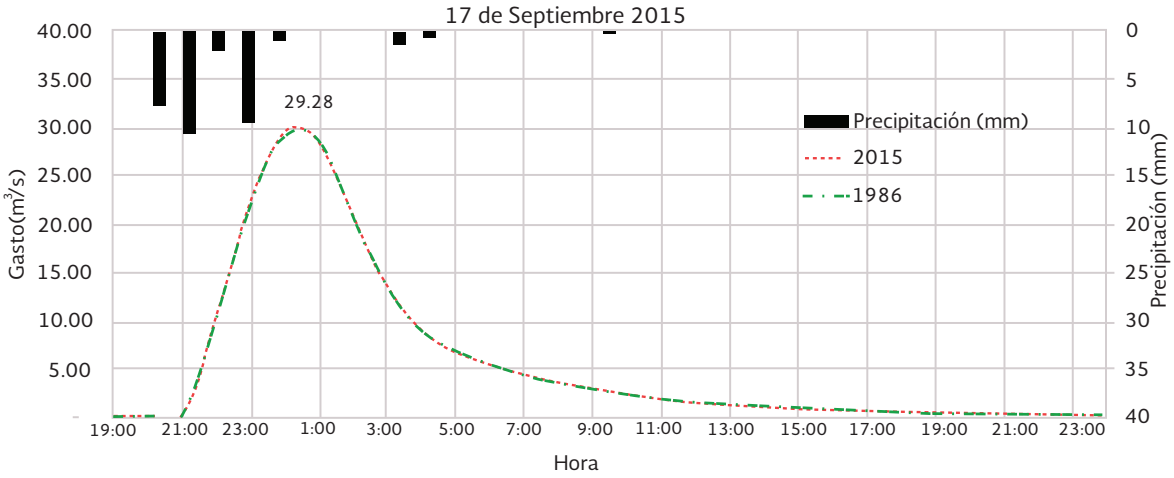
Las diferencias para los gasto pico generados por evento fueron: del 12% para el 1 de septiembre, del 6% para el evento del 7 de septiembre y nulo para el último evento. En contexto general para los tres eventos, no hay cambios significativos en el riesgo de inundación atribuidos a cambios de uso del suelo, por el crecimiento de urbanización para esta microcuenca.



Gráfica 15.11. Simulación del evento del 17 de septiembre 2015 para los usos de suelo de 2015, 2001 y 1986 en la microcuenca San José.



Gráfica 15.12. Simulación del evento del 10 de septiembre para los usos de suelo de 1986-2015 en la microcuenca Amazcala.

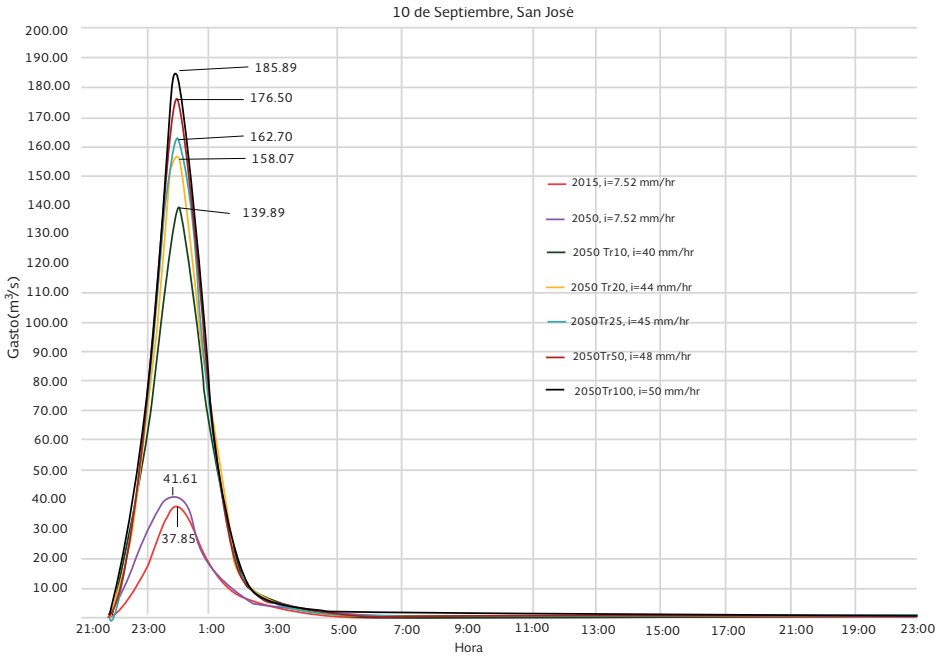


Gráfica 15.13. Simulación del evento del 17 de septiembre para los usos de suelo de 2015 y 1986 en la microcuenca Amazcala.

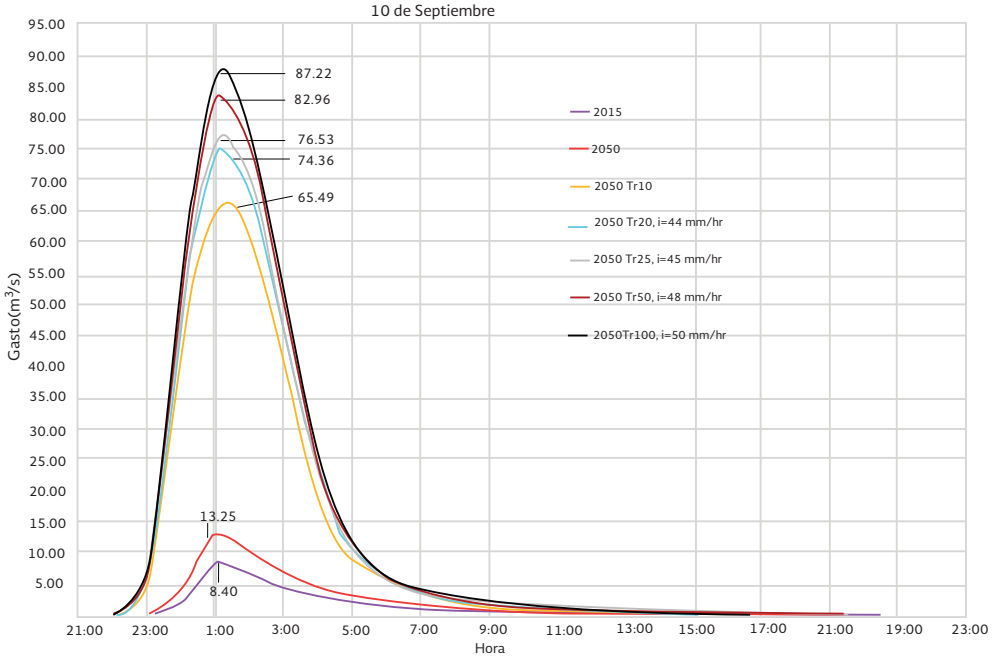
15.13. El escenario en 2050 de las cuencas periurbanas de San José y Amazacala

Para San José el escenario en 2050, plantea la parte alta totalmente urbanizada y la zona oeste con un 26 % de urbanización. En la Gráfica 15.14 y Gráfica 15.15, son mostrados los hidrogramas generados con intensidades de 7.52, 40, 44, 45 y 50 mm h^{-1} y periodos de retorno: 10, 20, 25, 50 y 100 años. Puede observarse que en 2050, la misma lluvia del 10 de septiembre 2015, el gasto pico se incrementa en 10% con tiempos menores en el pico y la recesión. Por otro lado, el gasto pico aumenta entre 4,91(185.59 m^3s^{-1}) y 3.69 (139.89 m^3s^{-1}) veces, en comparación del pico asociado al evento del 10 de septiembre (37.85 m^3s^{-1}).

Lo cual nos deja ver que la tendencia de cambio de uso de suelo intensifica el riesgo de inundación, porque las magnitudes asociadas al hidrograma son magnificadas en su contexto general: volumen y tiempo de respuesta y de igual manera rebasan la capacidad hidráulica máxima a la salida de la cuenca, de 96.5 m^3s^{-1}. En la Gráfica 15.15 son mostrados los hidrogramas de la cuenca de Amazcala para el 2050, donde puede verse, un crecimiento del gasto pico del 63% (13.25 m^3s^{-1}), con relación a los 8.40 m^3s^{-1} de 2015.



Gráfica 15.14. Respuesta para la urbanización de 2050 con la lluvia medida en 2015 e intensidades con duración de 60 min y periodos de retorno de 10, 20, 25, 50 y 100 años en la microcuenca San José



Gráfica 15.15. Respuesta para la urbanización de 2050 con la lluvia medida en 2015 e intensidades con duración de 60 min y periodos de retorno de 10, 20, 25, 50 y 100 años en la microcuenca Amazcala

De igual forma acontece con las precipitaciones con periodos de retorno de 10 y 100 años, el gasto pico se incrementa de 6.7 a 9 veces, comparativamente con el gasto de 2015 (8.40 m^3s^{-1}). Integrando los resultados de la modelación puede identificarse la proporción entre el volumen que escurre y el incremento de área urbanizada para los periodos 1986-2001, 2001-2015 y 2015-2050. En el Cuadro 15.5 son mostrados los aportes específicos por unidad de área asociados a los cambios de uso del suelo, siendo el periodo 2001-2015 el más significativo para los tres eventos estudiados. De acuerdo al Cuadro 15.5, el incremento de la urbanización de 27,000 m^3/km^2 produce 27 l/m^2 en 15 años. Aunque la comparación de gastos específicos para en Amazcala no es presentada aquí, es digno de destacar que el incremento de la urbanización de 10,000 m^3/km^2 ocasiona un aporte de 10.0 l/m^2 en 15 años, poco menos de la mitad que genera la urbanización en San José.

15.14. Conclusiones y recomendaciones

La expansión de la urbanización no solo modifica la repartición de los componentes del balance hídrico, sino que favorecen el riesgo de inundación. Los cambios de uso de suelo y la expansión de la zona urbana de Querétaro han provocado la evolución de las zonas periurbanas, así denominadas por contener áreas con usos mixtos, rural y urbano. En las dos cuencas de estudio, San José y Amazcala, con características contrastantes y superficies similares, la superficie urbanizada durante el periodo de 1986-2015 creció un 132% y 4%, respectivamente. Tomando en cuenta dichos cambios de uso del suelo y tres eventos registrados en septiembre de 2015, la modelación de los escurrimientos pone de manifiesto un mayor riesgo de inundación para la cuenca de San José. El gasto pico modelado para el año 1986, condiciones de base de la valoración de los cambios de uso del suelo, los resultados exponen un aumento del 25.65% para el periodo de 1986-2001 y de 143% entre 2001-2015, lo cual representa un aporte adicional de 1 m^3s^{-1} por año. Concerniente a la cuenca de Amazcala, solo fue simulado el efecto de los cambios de uso de suelo para el periodo de 1986 -2015 ya que entre 1986-2001, no hubo cambios significativos de usos de suelo. El incremento del gasto pico entre 1986 y 2015 fue el 6%, para el caso de los eventos del 1 y 10 de septiembre y para el evento del 17 de septiembre el gasto pico fue similar, de 29.28

Gráfica 15.16. Polígonos de posible avance de la mancha urbana San José (imagen superior) y Amazcala (imagen inferior).

Cuadro 15.5. Resumen de incremento del escurrimiento por km² para la microcuenca San José

Microcuenca San José					
Evento	Periodo	Δ Área(km²)	Δ Volumen (m³)	Δ (m³/km²)	l/m²
01-sep	1986-2001	2.17	87,386.00	40,270.05	40.27
	2001-2015	4.28	190,748.00	44,567.29	44.56
	2015-2050	8.09	125,826.00	15,553.28	15.53
10-sep	1986-2001	2.17	44,735.00	20,615.21	20.61
	2001-2015	4.28	156,849.00	36,646.96	36.64
	2015-2050	8.09	63,274.00	7,821.26	7.82
17-sep	1986-2001	2.17	31,821.00	14,664.06	14.66
	2001-2015	4.28	238,079.00	55,625.93	55.62
	2015-2050	8.09	48,906.00	6,045.24	6.04
		Promedio	109,736.00	26,867.70	26.86

m^3, resultados que reflejan el reducido cambio de uso de suelo en la cuenca durante ese periodo. En contexto general para los tres eventos, no hay cambios significativos en el riesgo de inundación atribuidos a cambios de uso del suelo para la microcuenca de Amazcala. La simulación de escenarios futuros, con base la tendencia de la urbanización de la zona periurbana, muestra un panorama de repercusiones significativas en la parte baja de ambas microcuencas, y una recurrencia en el riesgo de inundación en las zonas cercanas a cuencas periurbanas y futuras zonas en la zona metropolitana (Gráfica 15.16). En consecuencia es necesaria la inclusión de los cambios de usos de suelo en la modelación, para apreciar las evidencias sobre la expansión de la urbanización y que acentúa el riesgo de inundación, para ser tomadas en cuenta en la gestión y planeación de la infraestructura urbana, así como en los planes de prevención y contingencia antes el riesgo de inundaciones ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos.

15.15. Referencias

Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., ... Michel, K., 2013, Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France, Journal of Hydrology, 485, 5–23.

Engelman Robert. 2009. *Population, Nature, and What Women Want* (Island Press).

Ewen, J., Parkin, G., & O'Connell, P. E., 2000, SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system, Journal of hydrologic engineering, *5*(3), 250-258.

González Correa D. 2015. Estudio y modelación de los escurrimientos generados por el cambio de uso de suelo en la zona metropolitana de Querétaro. Tesis. Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Hawley, R. J., y Bledsoe, B. P., 2011, How do flow peaks and durations change in suburbanizing semi-arid watersheds? A southern California case study, Journal of Hydrology, 405 (1-2), 69–82.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015, Censos y conteos de población y vivienda, encuesta intercensal 2015, en http://www.beta.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=22.

Mejía, A. I., y Moglen, G. E., 2010, Spatial distribution of imperviousness and the space-time variability of rainfall, runoff generation, and routing, Water Resources Research, 46, 1–14.

Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., y Dearden, R., 2014, Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover, Journal of Hydrology, 515, 59–70.

Neupane, R. P., y Kumar, S., 2015, Estimating the effects of potential climate and land use changes on hydrologic processes of a large agriculture dominated watershed, Journal of Hydrology, 529, 418-429.

Villa Alvarado, C. J., Delgadillo-Ruiz, E., Mastachi-Loza, C. A., González-Sosa, E., y Norma Maricela, R. S., 2014, A physically based runoff model analysis of the Querétaro river basin, Journal of Applied Mathematics, 2014.

LA PROBLEMÁTICA DE LAS CASAS ANGLO-CARIBEÑAS EN CHETUMAL, QUINTANA ROO, FRENTE A LAS AMENAZAS CLIMÁTICAS

16

La problemática de las casas anglo-caribeñas en Chetumal, Quintana Roo, frente a las amenazas climáticas

Joel Francis Audefroy[1]*; Bertha Nelly Cabrera Sánchez[2]*; Edith Montesinos Pedro[3]*

16.1. Resumen

La ciudad de Chetumal, Quintana Roo tiene poco más de un siglo, fue fundada en 1898, y ha sido expuesta a varios eventos hidrometeorológicos a lo largo de su historia. Las casas de madera de estilo colonial y anglo-caribeño se encuentran en peligro de desaparición debido a varios factores tales como la fuerte presión sobre el suelo urbano, la falta de interés para su conservación, la carencia de documentación y registros completos; la falta de trabajo de investigación para su restauración, así como el deterioro paulatino por los eventos hidrometeorológicos como huracanes y lluvias tropicales. Ademas esta expuesta a varios fenómenos como hundimientos por el tipo de suelo, que antes era formado por manglares, inundaciones por la localización de su centro urbano casi al nivel del mar. Existen actualmente en Chetumal, alrededor de unas 140 casas de madera, y apenas unas 27 se encuentran en buen estado. Asimismo existen algunos casos de alteraciones (ampliación, abandono, reconstrucción). El último huracán Janet azotó la ciudad en 1955 y destruyó buena parte de este patrimonio arquitectónico.

Palabras claves: Chetumal, casas de madera, patrimonio, vivienda anglo caribeña, huracanes.

1 Autor de correspondencia: takatitakite@gmail.com.
2 E-mail: nema_67@yahoo.com.mx
3 E-mail:: edijo1303@hotmail.com
* Instituto Politécnico Nacional. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Tecamachalco. Av. Fuente de los Leones Nº 28, Tecamachalco, Estado de México.

16.2. Introducción

La ciudad de Chetumal en Quintana Roo, no está considerada como un destino turístico, sin embargo, es visitada por turismo local e internacional. Es un lugar de paso, que tiene un valor patrimonial arquitectónico invaluable por sus casas de madera que todavía, a pesar de los huracanes existen, pero muchas de ellas están en peligro de desaparecer algunas por incendio de las mismas, por su falta de mantenimiento y por el desinterés de la municipalidad al respecto.

El patrimonio edificado de Chetumal es un patrimonio histórico que se ha desarrollado a lo largo del siglo XX, pues la ciudad nació en 1898. Chetumal no es la única ciudad costera de la península de Yucatán que presenta casas de madera. Entre otros sitios, están los pueblos pesqueros de San Felipe, Río Lagartos, El Cuyo y Las Coloradas en el Estado de Yucatán. Lo que hace el interés particular de Chetumal es su arquitectura de madera de estilo anglo-caribeño que no tiene ningún otro pueblo costero de la Península.

Estas casas son el testigo histórico de la ciudad y podrían ser un símbolo para la ciudad. La problemática radica en el estado actual de estas viviendas que están no solamente en peligro de desaparecer por su falta de mantenimiento, sino también por las amenazas de los huracanes.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el proceso histórico de la construcción de las casas Anglo-Caribeñas en Chetumal del principio del siglo XX e identificar los riesgos hidrometeorológicos en la ciudad de Chetumal, a los cuales estan sometidas estas casas anglo-caribeñas. Asimismo, se presenta un analisis del estado actual físico de las casas de madera y se proponen algunas medidas a tomar ante la potencial desaparición de este patrimonio construido frente a las amenazas climáticas.

Esta investigación descansa sobre la hipótesis que las casas caribeñas han sido resistentes a huracanes, a pesar del huracán Janet que afectó en 1955 a la ciudad de Chetumal, que responden a los procesos constructivos locales, utilizando materiales tradicionales locales tales como la madera. Se desarrolló inicialmente, de forma expli-

cativa y descriptiva un registro de las casas de madera que se encuentran en el primer cuadro de la Ciudad, tratando de entender los procesos constructivos implementados en las casas de madera.

Formalmente la investigación se desarrolla en tres etapas. En una primera etapa, la investigación es documental a partir de fuentes bibliográficas diversas y consulta de bases de datos históricos. En una segunda etapa se llevó a cabo un trabajo de campo en marzo del 2017 para el acopio de la información básica relativa a las casas de madera, donde se realizaron cedulas de observación de las casas de madera. En una tercera etapa se procesaron los resultados del trabajo de campo y bibliográfico para poder presentar algunas propuestas de Gestión Integral del Riesgo.

16.3. La historia de la población de Payo Obispo.(Chetumal).

La originalidad de la conformación de la zona urbana de Payo Obispo radica en una fecha relativamente reciente de su creación 1898, en medio de manglares. El 22 de enero de 1898 llegó la embarcación el "Pontón Chetumal"[4] a la bahía del mismo nombre y se fija el ancla a unos trescientos metros de la costa mexicana. Fue Othón Pompeyo Blanco, oficial de la Armada Mexicana, quien viajó a estos lugares para establecer una aduana en la desembocadura del Río Hondo, frontera natural con Belice y así poner fin al contrabando de maderas tropicales que existían en esta zona y al mismo tiempo, ayudar como intermediario a la "pacificación" de los mayas rebeldes que actuaban de ambos lados del Río Hondo. La famosa "guerra de las castas" que había empezado en 1847, terminó con el último enfrentamiento entre las tropas federales y los mayas en el año de 1901. En 1904 se dio oficialmente terminada la guerra de las castas.

4 Pontón Chetumal fue una embarcación mexicana construida en Nueva Orleans, Estados Unidos en 1898, con la encomienda de realizar vigilancia y servir como cuartel, se ubicó en la desembocadura del Río Hondo en la frontera de México y Belice.

En este fin del Siglo XIX, el gobierno mexicano buscaba establecer un centro de control al borde de la frontera entre México y la Colonia Británica (el entonces Honduras Británico). De ahí surgió la idea de crear un centro de población en la orilla de la bahía de Chetumal donde desemboca el Río Hondo, frontera natural con el actual Belice. Es así que surgió la población de Payo Obispo[5].

Cabe señalar que en esta época los primeros pobladores eran totalmente carentes de servicios y de suministros por lo que la vida de los primeros pobladores transcurrió en una situación de gran precariedad. Los productos de consumo indispensables tales como ropa, calzado, y granos provenían de la población más cercana de Corozal en el Honduras Británico (Belice). La comunicación con el resto del país era posible enviando correo con pequeñas embarcaciones en algunos puertos de Guatemala, Honduras, o hasta la ciudad de Progreso en Yucatán. Es decir que desde el principio Payo Obispo recibió influencias del Honduras Británico a través de sus productos importados.

En 1900 se fundó el puerto de Xcalak, como estrategia adicional para controlar la frontera con el Honduras Británico, Xcalak está localizado en la extrema punta que termina la bahía de Payo Obispo. A partir de la fundación de Xcalak, se construyó un puerto, el primer astillero del Caribe mexicano con el objetivo de apoyar a la campaña militar de ocupación de la zona para suspender el suministro de armas a los mayas de la Guerra de las Castas.

El poblado de Payo Obispo se mantuvo entre 1902 y 1922 con cinco vialidades de Sur a Norte y de siete de Este a Oeste según lo muestra la Gráfica 16.1.

Cabe destacar que las primeras casas fueron techadas con Palma Tasiste (*Acoelorrhaphe wrighti*) y palma de Guano (*Sabal yapa*) y posteriormente de madera con techo de láminas de zinc. La historia local dio como origen a este tipo de arquitectura un origen inglés, llamado de estilo "anglo-caribeño" que cubriría las principales vías de la

5 *El nombre de Payo Obispo, aunque incierto, tiene varios supuestos orígenes. Sin embargo, el más difundido gira en torno a que el nombre se da en honor de Fray Payo Enríquez, obispo de Guatemala y posteriormente virrey de la Nueva España, quien visitó la zona en la época colonial. Al menos ésta es una de las versiones que tienen mayor aceptación (Rafael I. Romero Mayo y Jazmín Benítez López, 2014).*

Gráfica 16.1. Ubicación del área urbana de Payo Obispo, Quintana Roo en 1902. Fuente: Archivo General del Estado de Quintana Roo.

ciudad desde su inicio. La historia local menciona que "Valeriano Córdova, un sastre de apenas 20 años, hijo de Manuela A. de Córdova, vecina de Corozal, el que traerá desarmada de Sarteneja, en Honduras Británico, la primera casa de madera que se instalará en la esquina de la calle 22 de marzo (actual Carmen Ochoa de Merino) con Héroes, aproximadamente en 1901" (Herrera, 2006, p. 164). Este tipo de viviendas se caracterizan por paredes construidas con tablones de madera machihembrados (sistema de tablas ensambladas con bordes rebajados) y cubiertas de lámina de zinc. El cronista de la ciudad, Ignacio (Herrera, 2003, p. 154) menciona que las casas de madera fueron construidas desde 1898 hasta 1970. La primera colonia conocida como "casitas" (Venustiano Carranza) constaba de 250 casas de madera machimbrada y con techo de láminas de zinc.

Un plano del año de 1922 muestra que veinte años después, la ciudad no había cambiado mucho, observamos las mismas calles y avenidas.

Las condiciones de crecimiento de Payo Obispo en veinte años no habían sido significativas, lo que puede explicarse a partir del hecho de que el Gobierno Federal "desapareciera" y posteriormente restituyera el Territorio de Quintana Roo (Romero, 2014, p. 129).

Las condiciones políticas y sociales en México se complicaron con el asesinato del presidente Francisco I. Madero y su vicepresidente José María Pino Suarez en febrero de 1913. Luego el levantamiento en armas del ejercito dirigido por Venustiano Carranza. Estos acontecimientos generaron condiciones desfavorables para Quintana Roo sobre todo para los latifundistas que vieron sus intereses amenazados y lograron influir en el poder central para que se emitiera un decreto mediante el cual el territorio de Quintana Roo fuera restituido a Yucatán. Después de varios sucesos, el Presidente Carranza derogó el Decreto de 1913, expidiendo un nuevo ordenamiento que determinó que Quintana Roo volviese a constituirse en territorio federal. Finalmente hacia 1915, Payo Obispo se convirtió en la capital del territorio de Quintana Roo, en sustitución de Santa Cruz de Bravo.

A partir de entonces, la población comenzó a crecer y su desarrollo se acompañó de nuevas actividades económicas, aparte de las actividades tradicionales como la explotación del chicle. De ahí empezaron las actividades de importación (ver Cuadro 16.1).

Cuadro 16.1. Población a través de la historia en Payo Obispo, Quintana Roo (1902 a 2015)

Años	Población
1902	170 hab. (Payo Obispo) Fuente: Higuera, 2010
1904	248 hab. (Payo Obispo)
1910	2,112 hab. (Payo Obispo)
1921	1,773 hab. (Payo Obispo)
1930	2,790 hab. (Payo Obispo)
1940	4,672 hab. (Chetumal)
1950	7,247 hab. (Chetumal)
1960	12,855 hab. (Chetumal)
1970	23,685 hab. (Chetumal)
1980	56,709 hab. (Chetumal)
2010	244, 553 hab. (Othón P. Blanco)
2013	228,190 hab. (Othón P. Blanco)
2015	240,019 hab. (Othón P. Blanco)

Fuente: Dirección General de Estadística 1910 y 1921, INEGI 2010, 2015. Censos de Población.

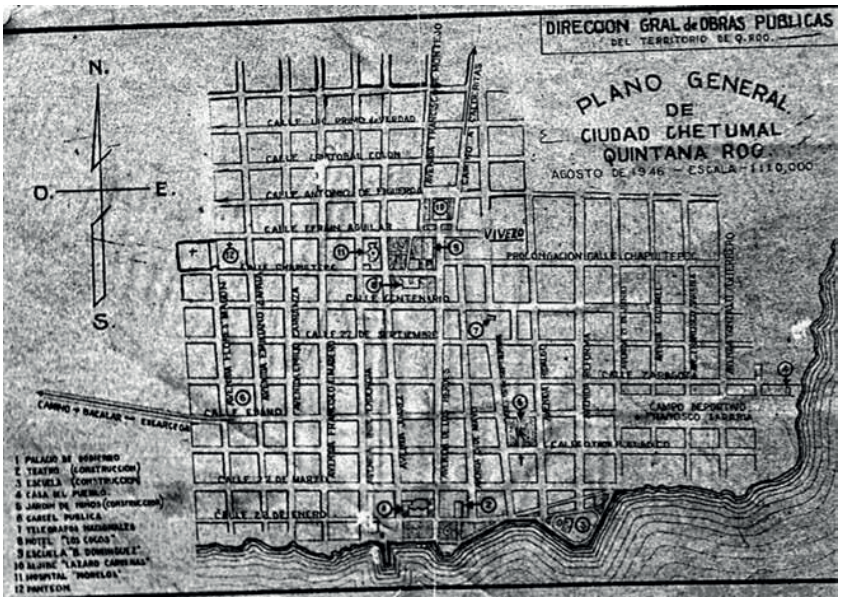
Sin embargo, a partir del año de 1910 la población tuvo un decremento asociado tal vez a la desaparición temporal de Quintana Roo. Cabe mencionar que a pesar de los

numerosos campamentos chicleros en la ribera del Río Hondo, Payo Obispo no creció en su traza durante mucho tiempo. Los habitantes carecían de agua potable y vivían en condiciones de insalubridad que facilitaba la proliferación de enfermedades tropicales como el paludismo. Es por esta razón que los habitantes empezaron a fabricar lo que llaman el "Curvato" un tanque hecho de madera para recuperar el agua de lluvia de los techos sobre el nivel del terreno. (Ver Gráfica 16.2)

Gráfica 16.2. Casa Anglo-Caribeña. Uso del Curvato. 2017. Foto: Joel Audefroy, Noviembre del 2017

El último auge chiclero y maderero en la zona (Municipio Othon P. Blanco) se dio en el periodo entre 1930 y 1950, y se acompañó de un crecimiento poblacional, que pasó de 2,790 habitantes en 1930 a 7,247 habitantes en 1950. Este crecimiento se prolongo de forma sostenida hasta después del año de 1974 cuando Quintana Roo fue decretada Estado Libre y Soberano.

Hasta 1940, Chetumal había tenido un crecimiento lento en la zona poniente, con la creación de nuevas calles y avenidas como se puede observar en la Gráfica 16.3:



Gráfica 16.3. Mapa de Chetumal, Quintana Roo. México. 1946. Fuente: Archivo General del Estado de Quintana Roo.

Después del huracán Janet en 1955, Chetumal quedó prácticamente destruida, en condiciones precarias y con una economía en crisis debido a que la producción forestal bajo a raíz de la destrucción de la masa forestal de la región sur que quedó en el suelo por el huracán. Este desastre provocó la emigración de una población que se quedó prácticamente sin trabajo. La infraestructura estatal era casi nula. Este desastre fue el inicio de construcciones de materiales con bloques y concreto y contribuyó a la desaparición de las casas de madera Anglo-Caribeñas.

En los años 1970, para incentivar la migración hacia Chetumal se inició un proceso de colonización dirigido impulsado por el Estado. Fue un plan de poblamiento a partir de un proyecto agroindustrial ribereño con la comunidad de Álvaro Obregón y se establecieron nuevas zonas ejidales y de infraestructura.

En 1972, un Decreto Presidencial transformó la actividad comercial de Chetumal. Se otorgaba permiso para fungir como zona libre con el argumento que las actividades económicas requerían de la libre importación de bienes para impulsar el aprovechamiento de las riquezas naturales especialmente las pesqueras y turísticas. Hoy en día solo queda una pequeña zona franca en la frontera con Belice.

En 1974, Quintana Roo se estableció como nueva entidad federativa con Chetumal como ciudad Capital a través de un Decreto Presidencial. Casi simultáneamente se creó el proyecto turístico de Cancún, Quintana Roo, México, que la colocó como un destino turístico internacional y capital económica.

A partir de los años 70's, la ciudad vivió un crecimiento poblacional importante, pasó de 23,685 habitantes en 1970 a 56,709 habitantes en 1980. La ciudad creció en la zona norte que es más alta que la zona centro cerca de la bahía, para protegerse de las eventuales inundaciones provocadas por los huracanes. La combinación de las actividades administrativas de la capital del Estado con las actividades económicas debidas a la zona libre ha permitido un desarrollo creciente, a pesar de la escasez de suministros y su aislamiento geográfico respecto a los grandes centros de aprovisionamiento regional y nacional.

16.4. Los riesgos hidrometeorológicos en una ciudad costera: Huracanes, inundaciones y hundimientos.

16.4.1. Los huracanes en Chetumal

De junio a noviembre los huracanes son una amenaza para los habitantes de la costa de Quintana Roo y han aprendido a estar alerta para prevenir los potenciales desastres. Han aprendido a salvaguardar sus pertenencias y contar con estrategias de evacuación en albergues en caso de que el aviso de tormenta tropical se transforme en alerta de huracán. Los huracanes son imprevisibles en sus trayectorias que varían de un año al otro y se forman generalmente en el verano en el Atlántico oriental y en el Mar Caribe. Los huracanes Janet (1955), Carmen (1974), Roxana (1995) y Dean (2007) son algunos de los fenómenos que mayor impacto han tenido en la ciudad de Chetumal, dejando inundaciones y encharcamientos y obligando a evacuar a la población de la zona baja de la ciudad.

Los huracanes son un fenómeno recurrente en Quintana Roo y son parte de la historia ciclónica de Chetumal como se puede ver en el Cuadro 16.2.

Cuadro 16.2. Huracanes y tormentas tropicales. Estado de Quintana Roo. 1916-2014

Huracán	Lugar de entrada a tierra	Categoría	Periodo	Vientos máximo (Km/h.)
S/n	Xcalak y Payo Obispo		20 de octubre 1916	
S/n	Chetumal		12 de Noviembre 1942	
Hilda	Bahía de Ascensión		16 septiembre 1955	
Janet	Chetumal	Categoría 5	27 septiembre 1955	275 km/h
Beulah	Cozumel	Categoria 5	5-22 septiembre 1967	260 Km/h
Carmen	Chetumal	Categoría 2	2 de septiembre 1974	160 km/h
Gilberto		Categoría 4	13 septiembre 1988	375 km/h
Roxane	Tulum	Categoría 3	7 al 21 de octubre 1995	185 km/h
Dolly	Felipe Carillo Puerto	Categoría 1	18 al 25 de agosto 1996	125 km/h
Keith	La Unión	Categoría 1	28 septiembre al 6 de octubre 2000	140 km/h
Emily	Cozumel y Playa del Carmen	Categoría 5	10 al 21 de julio 2005	269 km/h
Wilma	Cozumel y Puerto Morelos	Categoría 5	15 al 28 de octubre 2005	324 km/h
Dean	Mahahual	Categoría 5	13 al 23 de agosto 2007	270 km/h
Arthur	Suroeste de Chetumal	Categoría 2	31 de mayo al 2 de junio 2008	160 km/h
Dolly	Cozumel y Cancún	Categoría 2	20 al 24 de julio 2008	160 km/h
Karl	Norte de Calderitas	Categoría 3	14 al 18 de septiembre 2010	195 km/h
Rina	Felipe Carrillo Puerto, Cozumel	Categoría 2	23 al 28 de octubre 2011	174 km/h
Harvey	Othón P. Blanco, Bacalar	Tormenta tropical	19 al 22 de agosto 2011	91 km/h
Don	Benito Juárez	Tormenta tropical	27 al 30 de julio 2011	83 km/h
Ernesto	Othón P. Blanco y Bacalar	Categoría 1	1 al 10 de agosto 2012	140 km/h
Hanna	José María Morelos	Tormenta tropical	22 al 28 de octubre 2014	64 km/h
Gonzalo		Categoría 4	12 al 19 de octubre 2014	231 km/h

Fuentes: INEGI Anuario Estadístico y Geográfico de Quintana Roo, 2015, para los años de 1995 a 2014. Los años que no se presentan es debido a que no se registraron huracanes con influencia en el territorio de Quintana Roo.

Podemos observar que en el tiempo de casi un siglo de 1916 a 2014, los huracanes y tormentas tropicales han tocado tierra en Chetumal y su Municipio Othón P. Blanco en varias veces.

El primer huracán registrado en Quintana Roo no recibió nombre, fue en 1916 y tuvo consecuencias desastrosas en Xcalak y Payo Obispo hasta destruir el faro del Banco Chinchorro (Careaga, 2010, p. 32). Luego durante varias décadas no hubo huracanes de importancia hasta 1955 donde dos huracanes Hilda y Janet azotaron a Quintana Roo, en particular Janet que destruyo en parte la ciudad de Chetumal.

El huracán Janet paso en línea recta hacia Chetumal y la costa de Quintana Roo. El 26 de septiembre 1955 Janet era ya un huracán de categoría 4 con vientos de más de 220 km/h que levantaba a su paso olas de 20 metros de altura. Cuando tocó tierra en Xcalak, la fuerza del viento había superado los 275 km/h alcanzando la categoría 5 con una presión atmosférica en su ojo de 914 milibares. Así Janet azotó Chetumal a las nueve de la noche, dejando a su paso 90 muertos, dejando 3% de las casas en pie. Arrasó con 300,000 m^3 de madera y acabó con la producción de *copra* pulpa seca del coco, del sur del estado.

Para entender el efecto destructor de Janet, hay que saber que Chetumal es una ciudad costera localizada a la orilla de la bahía de Chetumal, los vientos de 275 km/h llevaron el agua de la bahía hacia adentro arrasando las casas de la parte centro y la destrucción creció cuando el agua regreso con una fuerza incontenible. El centro de Chetumal está localizado en una parte baja casi a nivel del mar. Al penetrar el agua en siete cuadras dentro de la ciudad, arrastro lo que encontró, casas de madera, comercios, vehículos e infraestructura y desde luego a personas. El nivel del agua llegó a más de dos metros de altura en las partes más bajas.

El paso del Huracán Janet marco la vida de Chetumal. (Ver Figura 4) La historia regional se divide entre un antes y un después del huracán. Después del huracán empezó la reconstrucción. Hubo un mal manejo de la ayuda enviada a los damnificados. También hubo discrepancias entre el gobierno de Quintana Roo y los damnificados, los sobrevivientes decidieron reconstruir la ciudad en contra de la insistencia del gobierno de Quintana Roo en quemar ese primer cuadro citadino para repoblar la parte alta.

Gráfica 16.4. Los efectos destructores del Huracán Janet en 1955.
Fuente: *Casa de la Crónica, Chetumal.*

El 16 de septiembre de 1967, el huracán Beulah entró por Cozumel e inclino el faro de Puerto Morelos. El huracán Carmen que azotó Chetumal el 2 de septiembre de 1974, no tuvo la fuerza de Janet, había menos casas de madera y en consecuencia hubo menos casas dañadas, no entraron las aguas de la bahía en las manzanas del centro y no hubo pérdida humana. El huracán Carmen (1974) era el tercer huracán de la temporada, tenía fuerza de 160 km/h (categoría 2), solamente hubieron daños considerables en una parte que se había reconstruido 19 años antes, a raíz del huracán Janet. El historiador de la ciudad, Ignacio Herrera Muñoz, menciona que "a pesar de que el meteoro penetro al interior de la entidad por un lugar llamado "Punta Gavilán", como unos cincuenta kilómetros al norte de la ciudad, las rachas huracanadas se comenzaron a sentir desde las cuatro de la mañana y no cesaron hasta las diez; la mayor parte de la furia del ciclón como sucede en estos casos, la recibió Chetumal de seis a siete horas de ese también negativo día para esta localidad; las lluvias continuaron todo el día con breves lapsos" (Herrera, 2003, p. 345).

A pesar de su categoría relativamente modesta (categoría 2) Carmen daño varias casas, servicios públicos, derribo árboles, edificios como la "Casa del Pueblo", el cinema "Leona Vicario", el centro de salud, se cayó la torre de control del aeropuerto, retorció las cortinas de las casas comerciales. Por ejemplo una casa de madera que se ubicaba en una esquina de Barrio Bravo fue totalmente destruida por Carmen.

En 1988 el huracán Gilberto azoto el norte del Estado. El 13 de septiembre toco tierras en Quintana Roo con olas de 6 metros de altura y ráfagas de 375km/h rebasando a la escala 5 de Saffir-Simpson y alcanzando la categoría 8 en la escala internacional de huracanes (EIH).

Durante septiembre y octubre de 1995, los huracanes Opal y Roxanne inundaron las colonias de Solidaridad, Fidel Velásquez y Payo Obispo de la ciudad de Chetumal (Atlas de riesgo, 2011, p. 25).

Por su parte, el huracán Chantal (2001) causó destrucción de infraestructura de comunicación y de servicios en Chetumal (Atlas de riesgo, 2011, p. 27).

Los huracanes Emily y Wilma entraron en tierra por Cozumel y cayeron sobre Quintana Roo en julio y octubre del 2005 respectivamente con una categoría 5 con efectos destructores en Cancún e Isla Mujeres. El huracán Dean de categoría 5 entro a tierra por Mahahual en 2007, fue hasta la fecha el último huracán de categoría 5 que cayó sobre Quintana Roo.

A parir del huracán Janet, se creó una cultura de prevención y de protección civil. Por lo tanto, hasta ahora existen refugios temporales para las poblaciones en caso de huracanes.

En la ciudad de Chetumal, según el (Atlas de riesgos, 2011, p. 25), "las zonas de mayor peligro se encuentran localizadas en la parte baja de la ciudad de Chetumal que abarca aproximadamente un 70% de ésta (30 Km^2). Hacia el noroeste de la ciudad, donde se ubican los nuevos asentamientos, el peligro es menor". Esta zona baja de la ciudad es precisamente donde se encuentra la mayoría de las casas de madera.

16.4.2.Las inundaciones en Chetumal

Las principales causas de inundación en Chetumal son los huracanes y lluvias torrenciales que se presentan en los meses de junio a noviembre. El observatorio de Chetumal indica lo siguiente (Cuadro 16.3):

Cuadro 16.3. Precipitaciones totales anuales de 1953 a 2014

Precipitaciones promedio	Años más secos	Años más lluviosos
1327.9 mm	793.5 mm	2186.5 mm

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010.

El historiador de la ciudad menciona que antes las lluvias eran benéficas para los chetumaleños, se llenaba el aljibe "Lazaro Cardenas" que abastecía de ese líquido al pueblo. También en los hogares los curvatos almacenaban agua para todo el año y en las aguadas que se encontraba al contorno de la población también quedaba esa agua de lluvia como emergencia en caso de una sequía prolongada. (Herrera, 2003, p. 265)

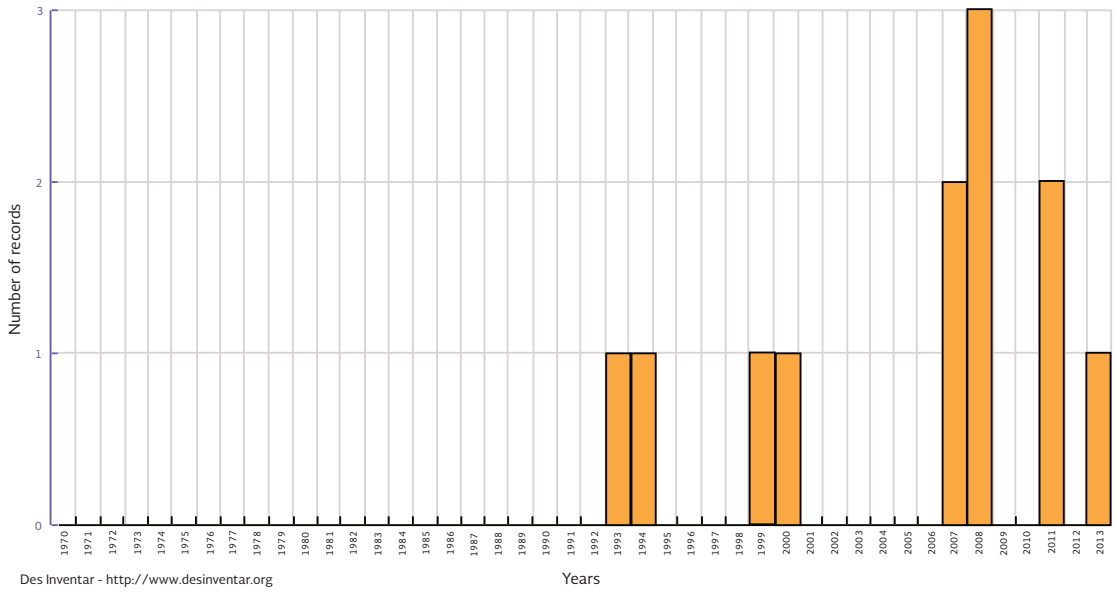
En su mayor parte la capital de Quintana Roo, carece de drenaje sanitario, el cual se satura con frecuencia. Las fosas sépticas pronto estarán saturadas y para el próximo huracán, las aguas serán difícilmente evacuadas. Vialidades como Av. Insurgentes hasta calle 22 de enero y Calzada Veracruz hasta Av. Emiliano Zapata no tiene drenaje sanitario. Es decir, toda la parte del centro histórico de la ciudad, la parte más baja, carece de drenaje.

Podemos observar que en el Municipio de Othón P. Blanco donde se encuentra Chetumal, las inundaciones se han incrementado a partir del año de 1993 (ver Gráfica 16.5) y las lluvias torrenciales se han incrementado a partir del 2007 (ver Gráfica 16.6). Podría ser que estos fenómenos son un efecto del cambio climático, sin embargo, el histórico de las inundaciones y lluvias torrenciales ponen en evidencia la vulnerabilidad de la ciudad y en particular la parte del centro, más baja, donde se encuentran en su mayoría las casas de madera.

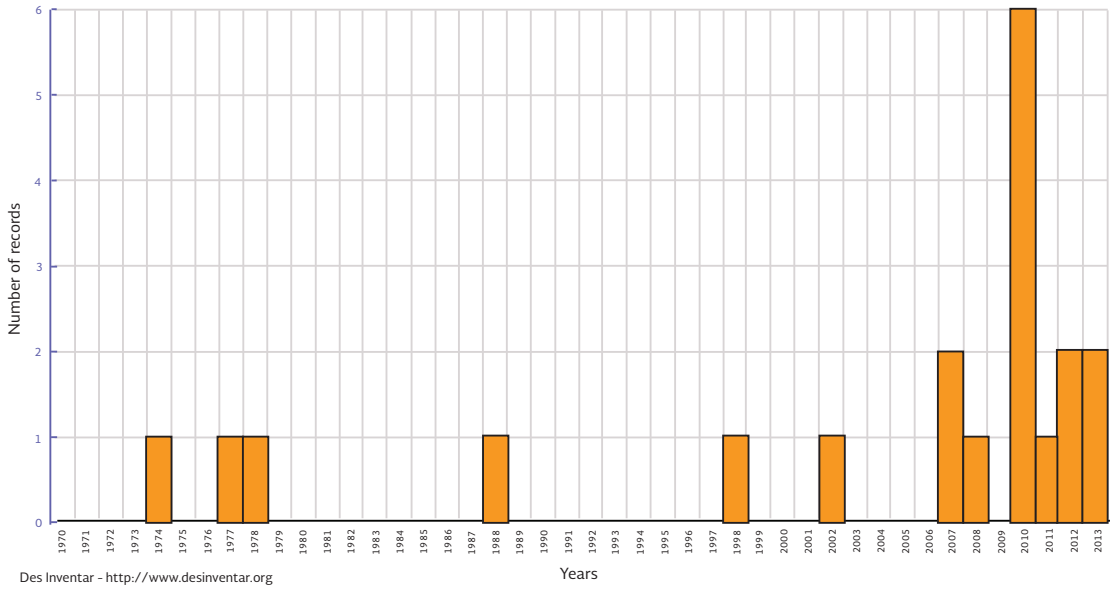
La colonia Centro, es una de las zonas más afectadas por inundaciones. Consta de 230 hectáreas y el 99% estuvo afectado. (Atlas de riesgo, 2011, p. 29)

16.4.3.Los hundimientos en Chetumal

La parte baja de Chetumal donde se encuentra el centro histórico fue ocupado antes por manglares y poco a poco se ha ido rellenando ganando terreno al mar con material



Gráfica 16.5. Inundaciones históricas en el Municipio Othón P. Blanco 1970-2013
Fuente: Sistema de Inventario de Efectos de Desastres. DESINVENTAR. 2018



Gráfica 16.6. Lluvias torrenciales, históricas en el Municipio Othón P. Blanco 1970-2013
Fuente: Sistema de Inventario de Efectos de Desastres. DESINVENTAR. 2018

de relleno. La ciudad fue construida entonces sobre un suelo de relleno poco estable. Las primeras casas de madera que fueron construidas estaban asentadas sobre pilotes y resilientes a las inundaciones, pero las casas más recientes construidas a partir de los años 40's ya no fueron piloteadas. Por lo tanto, las calles están constantemente afectadas por desfundes y hundimientos parciales.

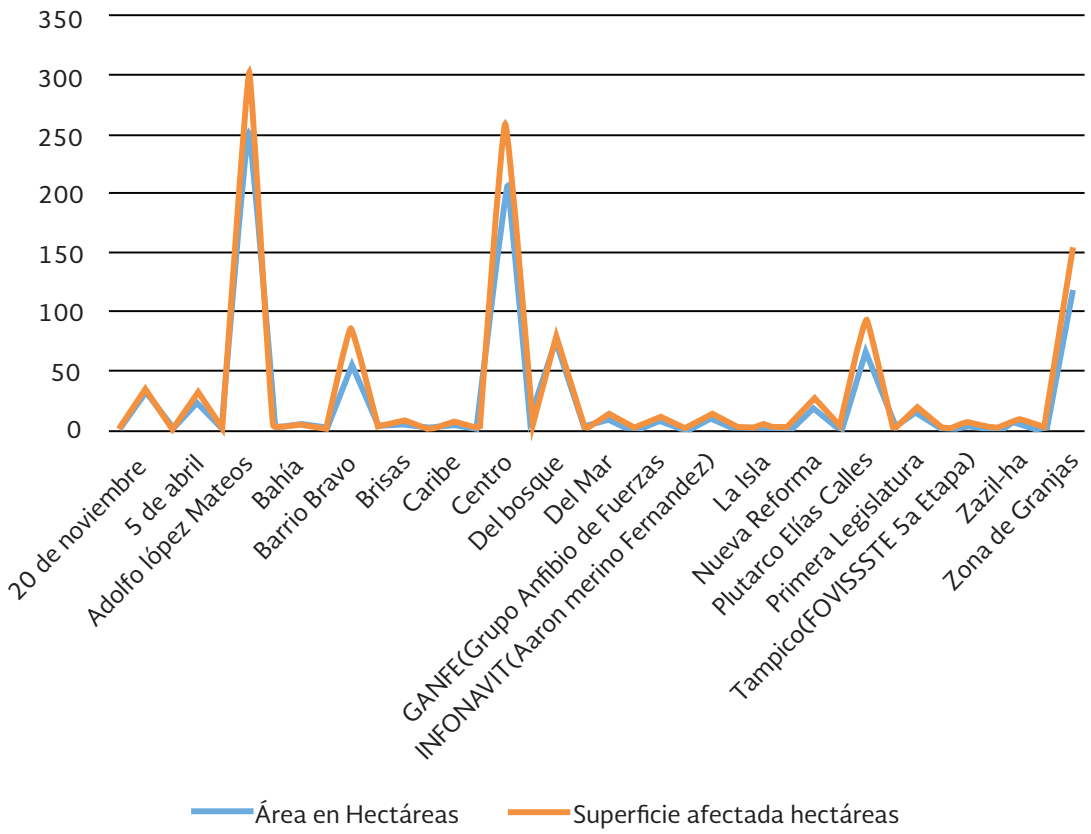
"De acuerdo con el estudio del subsuelo de la ciudad de Chetumal realizado por la Universidad Autónoma de Yucatán en 2009, en la zona centro se observan depósitos marinos poco consolidados y de consistencia muy variable, saturados por encontrarse cerca del nivel freático (0.50 m a 1.50 m)" (Atlas de Riesgo, 2011, p. 25).

El Atlas de riesgo del Municipio Othón P. Blanco menciona que en la zona baja de la ciudad "los registros históricos muestran un patrón muy claro de recurrencia de los hundimientos, es decir, los hundimientos se registran en la misma ubicación recurrentemente. Las zonas con mayor peligro de hundimiento son aquellas donde se han presentado en repetidas ocasiones los hundimientos de mayor tamaño (hundimientos recurrentes); las zonas con peligro bajo son aquellas que se encuentran a menos de 100 metros de dichos hundimientos recurrentes, es decir, zonas donde no se han registrado hundimientos pero que se encuentran próximas a estos" (Atlas de riesgo, 2011, p. 25).

Se puede observar que la colonia Centro y Adolfo López Mateos, son las colonias con los mayores hundimientos, cabe señalar que en la Colonia Centro es donde se ubican la mayoría de las casas de madera. (Ver Gráfica 16.7)

16.5. Tipología de las casas anglo-caribeñas, patrimonio cultural de Chetumal

La arquitectura doméstica del Caribe varía considerablemente desde los primeros asentamientos españoles en Cuba, la Hispañola (República Dominicana), pasando por los franceses en Haití, los holandeses en las islas menores y los ingleses en el Honduras Británico (Belice). Los primeros estilos arquitectónicos se encuentran en la



Gráfica 16.7. Colonias de Chetumal afectadas por hundimientos. Chetumal. 2011

República Dominicana con estilos románico, gótico y plateresco, así como el barroco que se encuentra también en las Antillas mayores. Los ingleses trajeron los estilos georgianos y victorianos mientras que los franceses y los holandeses importaron algunos elementos de sus países de origen. El elemento común a estos diversos estilos es la madera que los primeros colonos encontraban en las islas del Caribe.

Curiosamente encontramos algunas casas en Chetumal de estilo Victoriano. La época victoriana comienza en el año 1837, cuando la reina Victoria accede al trono de Inglaterra y termina en 1901. Durante este periodo de industrialización, surgieron muchas innovaciones en arquitectura y en otras áreas. Inglaterra exportó el estilo Victoriano; esta manifestación artística fue adoptada y asimilada en los Estados Unidos y en el Caribe, donde aparece enmarcada entre 1870 y 1920 (ver Gráfica 16.8).

Gráfica 16.8. Fachadas de casas de madera Estilo Victoriano. Chetumal. 2017.
Fotos: Joel Audefroy, Noviembre del 2017

Algunos autores mencionan que la casa anglo-caribeña es el resultado de varios componentes como la cabaña africana, la estructura de *balloon-frame* y el modelo inglés del *bungalow*. De hecho, las casas que encontramos en Chetumal y Belice no utilizan el sistema de *balloon-frame* que se utiliza en Estados-Unidos y Baja California Norte, pero el sistema de tablas machimbradas se identificó en estas.

La característica de la arquitectura de madera presenta una gradación arquitectónica estilística y estructural en función de la condición socioeconómica y cultural de sus ocupantes. Todo ello se expresa en el uso de materiales y en el diseño de espacios internos y en el estilo afirmado de la fachada. Parece que la forma de producción de estas casas de madera en Chetumal no ha sido por medio de la autoconstrucción ni por el medio de programas locales sino más bien por medio de comercialización de casas de madera. (King, 1984: 91-93) citado por (Checa, 2011, p. 263) "Por lo que respecta a la construcción de esas casas, se sigue un modelo extraído de catálogos de empresas dedicadas a la comercialización de piezas de madera para viviendas o incluso a la venta de casas enteras. Sin descartar el hecho de que se diera la compra integral de alguna casa y esta fuera importada por alguna de las tantas empresas dedicadas a ello, parece más plausible asumir que el plano y esos catálogos fueron el primer recurso que, puesto en manos de carpinteros de ribera, maestros ebanistas o madereros, sirviera para la elevación de esas casas". (Checa, 2011, p. 263)

De esta forma se fueron construyendo casas de una o dos plantas de diferentes estilos como el estilo Victoriano o del estilo del Cottage inglés. Estos modelos de casas anglo-caribeñas surgen entonces a través de un proceso histórico que viene de la implantación del modelo de explotación colonial británico en la entonces Honduras Británica (Belice) y que tuvo una área de influencia en el actual Estado de Quintana Roo. Esta influencia fue trasmitida en consecuencia de las migraciones de la población mexicana en Belice, a raíz de la Guerra de las Castas (1847-1901) y que al final del conflicto regresaron a Payo Obispo con estos modelos de casas Anglo-caribeñas.

En 2004 el Instituto Quintanarroense de Cultura en coordinación con la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, logró iniciar un proyecto de rehabilitación de las casas de madera, el cual se ejecutó bajo el concepto de "Plan Maestro para la Restauración del Centro Histórico de la Ciudad", que consistió en la rehabilitación de las casas de madera situadas en el primer cuadro. Se trabajó en un área de 14 manzanas y 38 casas de madera, rehabilitándose unas y reconstruyéndose otras. Se rehabilitaron finalmente unas 27 casas de un total de 140 existentes en estado regular o mal estado.

El programa de rehabilitación en el año 2004 no tomó en cuenta la vulnerabilidad de las casas de madera a los riesgos hidrometeorológicos como los huracanes y las inundaciones. El programa solamente ha consistido en cambiar maderas alteradas y pintar. No se ha hecho ningún programa para fortalecer la resistencia de los techos a los vientos, ni tampoco capacitar a los carpinteros.

Desafortunadamente el atractivo turístico de la ciudad está en peligro de desaparecer, poco a poco, las casas abandonadas en mal estado se derrumban o son expuestas a incendios. Se encontraron varias casas en un estado muy deteriorado. Ver Gráfica 16.9.

Reconocer el patrimonio histórico mediante una Ley no es suficiente si no se acompaña de políticas y programas sustentables. La Ley de Protección, Conservación y Restauración del Patrimonio Histórico, Cultural y Artístico del Estado de Quintana Roo no tiene decretos de aplicación que permiten llevar a cabo planes y programas sustentables.

Gráfica 16.9. Casa muy deteriorada en Calle 22 de enero Esq. con Fco I. Madero. Fotos: Joel Audefroy, Noviembre del 2017

La rehabilitación de las casas de madera no figura dentro de los planes futuros de desarrollo del Estado de Quintana Roo, México. El Atlas de Riesgo de la Ciudad de Chetumal no menciona la existencia de las casas de madera particularmente vulnerables.

16.6. Discusión

En el primer cuadro de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, es donde se encuentran la mayoría de las casas de madera de estilo Anglo-Caribeño, en este primer cuadro es donde se están presentando grandes cambios en los usos de suelo y por consiguiente es muy codiciado por los intereses inmobiliarios, y es también el lugar de los principales edificios del Gobierno Estatal y municipal.

¿Cuáles serían las medidas a tomar ante la potencial desaparición de este patrimonio?

Las primeras acciones tienen que ver con la Gestión Integral de los Riesgos de Desastre (GIRD). La Gestión Integral de los Riesgos debe formar parte de los Planes de Desarrollo Urbano y no como un programa aparte bajo la responsabilidad de la

Protección Civil. Los predios ocupados por las casas de madera que se encuentran en mal estado son una presa fácil de los promotores inmobiliarios, de hecho algunas de estas casas se encuentran en predios extendidos. Las presiones de los promotores sobre los propietarios de estas casas son bastantes fuertes y son pocos los propietarios que pueden resistir a la atracción de vender sus bienes. Muchas de las casas de madera están desocupadas y los dueños no quieren invertir para su mantenimiento porque se encuentran en la parte más baja de la ciudad sujeta a las inundaciones y hundimientos, varios habitantes consideran que sería una inversión perdida si realizan mantenimiento sus casas en caso de desastre.

Por otra parte, las organizaciones de los habitantes son bastante débiles para poder tener un impacto sobre las políticas urbanas. En febrero del 2009 surgió el "Comité pro defensa del patrimonio histórico y ecológico de Chetumal" constituido por un grupo de ciudadanos encabezados por el cronista de la ciudad, el Profesor Ignacio Herrera Muñoz[6], pero esta asociación tiene un potencial de negociación muy escaso.

Sin embargo, a raíz del huracán Janet en 1955, se creó una cultura de protección civil por medio de campañas de concientización y los habitantes están ahora preparados para poder enfrentar futuros huracanes.

Las casas de madera que se encuentran actualmente han sido en su mayoría construidas después de 1955, perdiendo sistemas constructivos que protegen de inundaciones, como el uso de palafitos.

Además, el conocimiento local para construir las casas de madera, ha ido desapareciendo paulatinamente. Actualmente el uso de la madera no es costeable, y el tipo de madera utilizada para construir casas de madera es derivado del árbol llamado Árbol de Zapote (*Manilkara zapota*), este tipo de madera su principal característica es la resistencia al agua y a la humedad.

6 *Profesor fallecido el 25 de enero del 2017.*

Actualmente es muy difícil construir casas de madera como eran antes y, sin embargo, las casas construidas por tabique o tabicón, están afectadas por salitre y los bloques se desbaratan poco a poco. Existen soluciones técnicas eficientes para la preservación y conservación de las casas de madera, pero no todos los propietarios las conocen.

El fortalecimiento de la resiliencia del patrimonio construido, en particular el patrimonio histórico depende mucho de la economía del lugar. Cuando la economía es fuerte, los habitantes pueden mejorar y limitar la vulnerabilidad de las casas. Hubo una época en la cual la economía de Chetumal era fuerte gracias a la zona de libre comercio, ahora las expectativas se limitan al turismo, es lo que explica el estado y casi abandono de algunas de las casas de madera de Chetumal.

16.7. Agradecimientos:

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo financiero de la Secretaria de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional. Proyecto de investigación registrado N° SIP 20171563 y SIP 20171618

16.8. Referencias

Careaga Viliesid Lorena, Higuera Bonfil Antonio (2010), Quintana Roo, Historia Breve. México, El Colegio de México, COLMEX, Fondo de Cultura Económica FCE. 292 p.

Checa Artasu, Martín Manuel (2011), Morfología y representatividad de la vivienda histórica en la frontera México-Belice: algunas notas. *Cuadernos de vivienda y urbanismo*, vol. 4, núm. 8, julio-diciembre Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, pp. 248-271.

Disponible en: http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cvyu/article/view/5475/4411

Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193424449004

DESINVENTAR (2017) Sistema de Inventario de Efectos de Desastres.

Disponible en: https://online.desinventar.org Consultado el 07 de diciembre del 2017

Herrera Muñoz, I. (2003), Crónicas citadinas II, Nuevo Siglo, Chetumal, 347p.

Herrera Muñoz, I. (2006), "Siniestraron... testimonio y patrimonio citadino...". En Crónica Citadina. 9 de junio de 2006.

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2015) Anuario estadístico y geográfico de INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2015 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México. INEGI, 2015.

Disponible en:

http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2016/702825084370.pdf

King, A. D. (1984), The bungalow: The production of a global culture, Londres: Routledge & Kegan Paul.

Romero Mayo, Rafael. I., Benítez López, Jazmín (2014), El proceso histórico de conformación de la antigua Payo Obispo (hoy Chetumal) como espacio urbano fronterizo durante la etapa de Quintana Roo como territorio federal. En: Revista Península, vol. IX, núm. 1 enero-junio de 2014, UNAM, Mérida, pp. 125-140.

Disponible en:

http://www.scielo.org.mx/pdf/peni/v9n1/v9n1a6.pdf

SEDESOL (2011), Atlas de Riesgo de la ciudad de Chetumal Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo. 37 pp.

Disponible en:

http://www.anr.gob.mx/PDFMunicipales/2011/vr_23004_AR_OTHON_P_BLANCO.pdf

COMPORTAMIENTO DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN DEL CULTIVO DE VID PARA PRODUCCIÓN DE VINO DE MESA Y LOS PERIODOS DE SEQUÍA EN EL VALLE DE GUADALUPE, B. C.

17

Comportamiento de los índices de vegetación del cultivo de vid para producción de vino de mesa y los periodos de sequía en el Valle de Guadalupe, B. C.

Magdaleno Esquer Sheila Soraya[1]*; García Gastélum Alejandro[2]*; Hallack Alegría Michelle[3]; Seingier Georges[4]*

17.1. Resumen

El Valle de Guadalupe, es la región vitivinícola más importante de México, es responsable del 90 % de la producción nacional de vino de mesa, en su valle se concentra la mayor área de cultivo para la producción de vino. Recientemente, se ha desarrollado de manera acelerada la industria de producto vino, que representa un importante presión en el recurso agua, aunado a los recientes ciclos de sequía que han caracterizado el área del Sur de California en Estados Unidos y Norte de Baja California en México. En este trabajo, se obtuvo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NVDI, utilizando dos imágenes por año de los sensores Landsat 5 y Landsat 8 del periodo 2006 – 2016. Con los datos de 68 años de lluvia de una estación meteorológica del sitio, se obtuvo el Índice Estandarizado de Precipitación o SPI resultando 2014 el año más seco de toda la serie con un valor mínimo de SPI de -2.27 o Extremadamente seco. Se obtuvo la curva anual de NDVI para el año 2010, con valores próximos de 0.42 y 0.24 de mínimos, los cuales se utilizaron como valores de referencia para el período 2006 –

1 Facultad de Ciencias Marinas E-mail:
2 Facultad de Ciencias Marinas. Autor de correspondencia: agarcia@uabc.edu.mx
3 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. mhallack@uabc.edu.mx
4 Facultad de Ciencias Marinas. E-mail: georges@uabc.edu.mx
* Universidad Autónoma de Baja California. Carretera Ensenada-Tijuana No. 3917, Fraccionamiento Playitas, 22860 Ensenada, B.C.

2016; en general se observa que el NDVI es más alto en el mes de abril y más bajo en el mes de agosto. En la década analizada. El promedio de NDVI tuvo un mínimo de 0.26 en abril y de 0.23 en agosto de 2014, considerando que le NDVI promedio obtenido en la zona en condiciones húmedas es de 0.42, se clasifica como de nivel bajo.

Palabras Clave: NDVI, SPI, Sequía, Valle de Guadalupe

17.2. Introducción

Las regiones mediterráneas se localizan en el oeste de los continentes, entre los 30° y los 45° de latitud, se caracterizan por veranos cálidos y secos e inviernos templados y lluviosos, son regiones de alto riesgo ante el cambio climático, ya que es probable que se genere una sequía extrema, de mayor frecuencia e intensidad, el centro de investigación ecológica y aplicaciones forestales de la Universidad de Barcelona prevé a nivel internacional un aumento de la temperatura de hasta 6°C en algunas estaciones del año y una disminución de la precipitación del 30-45% hacia finales de este siglo.

Baja California es el único estado de México que cuenta con una región de clima mediterráneo, esta se encuentra dentro de la faja subtropical de alta presión que en verano migra hacia el norte, quedando bajo la influencia de los vientos alisios que pierden casi toda la humedad, por lo que la precipitación es escasa en ese periodo. Sin embargo, en el invierno la faja subtropical se desplaza hacia el sur, quedando expuesto a los vientos del oeste que recogen humedad a su paso por el Pacífico originando lluvias (Reyes-Coca *et. al*, 2004).

La agricultura es la principal actividad económica, con cultivos de tipo mediterráneo cuenta con un total de 5 869 hectáreas, de las cuales: 2 160 Ha son destinadas a la vid, 1 262 Ha al olivo, 303 Ha a otros 18 cultivos y 2 143 Ha se encuentran en descanso (web SEFOA, 2016).

El cultivo de vid y los productos derivados han generado un desarrollo económico turístico contando a la fecha con aproximadamente 77 casas vinícolas, desde pequeñas bodegas familiares hasta grandes empresas exportadoras (WEB PROVINO, SEC-

TURBC; 2017). La actividad industrial en la región está directamente relacionada con la agricultura siendo la vinificación la principal, se producen alrededor de 1.2 millones de botellas de vino al año (SEDESOL, 2006).

La sequía es un fenómeno complejo, puede deberse a diversas causas; físicas, ecológicas, sociales, económicas y políticas, en general, se tendrá una sequía cuando en un lugar y durante un tiempo determinado existe un reducción en la precipitación. En la región Norte de Baja California las sequías están altamente influenciadas por el fenómeno tropical de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) (Reyes Coca *et. al*, 2004), cuando se presenta un evento cálido de ENOS (El Niño), suceden precipitaciones por encima de lo normal en la región (Reyes Coca *et. al*., 2004), si éste es muy fuerte, la precipitación de invierno puede ser muy abundante y provocar inundaciones. Por el contrario, cuando se presenta un evento frío de ENOS intenso (La Niña), la precipitación de invierno disminuye drásticamente, y se tienen grandes posibilidades de un incremento en el número de sequías, sin embargo, El Niño influye las precipitaciones, pero **no** necesariamente las produce (Reyes Coca *et. al*, 2004).

Uno de los indicadores más utilizados para clasificar un periodo de tiempo como húmedo o seco, así como su intensidad, es el Índice de precipitación estandarizada (SPI) propuesto por McKee en 1993, los valores de SPI representan el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico, aquellos registros de precipitación superiores al promedio histórico, presentarán valores del SPI positivos (condiciones de humedad), mientras que aquellos registros de precipitación inferiores al promedio histórico, arrojarán valores del SPI negativos (déficit de humedad), se considera que la sequía comienza en el momento que el SPI baja de cero y termina cuando el SPI alcanza condiciones de humedad indicado por valores positivos (McKee *et. al.* 1995 en Hallack-Alegria 2011). El Centro de Investigación sobre la Sequía (CEISS) considera que con valores de SPI por debajo de -1.5 se pueden presentar pérdidas considerables en cultivos y pastizales, riesgo de incendio extremo y escasez de agua generalizada en cuerpos de agua y pozos (CONAGUA, 2014).

Los impactos de la sequía en la agricultura se han presentado a lo largo de la historia de la humanidad, siendo la razón de grandes pérdidas económicas, cambios políticos y en

el medio ambiente. Los efectos de la sequía en distintas especies de plantas han sido cuantificados (Asbjornsen, 2004) como: reducción en el número y tamaño de las hojas, mortalidad de individuos, reducción del crecimiento, entre otras. El cultivo de la vid se caracteriza por sufrir sequías estacionales en la mayoría de las regiones productoras, situación que se incrementa en ambientes áridos y semiáridos (Bavestrello, 2012), en la vid las respuestas comunes al estrés hídrico incluyen cambios tanto en el metabolismo de hormonas vegetales, como en procesos de fotosíntesis, crecimiento, transcripción y señalización entre otros (Cramer, 2010 en Bavestrello, 2012). Estas relaciones han sido demostradas mediante experiencias de campo, toma de muestras o experimentos controlados. Sin embargo, existen diversas metodologías para estudiar mediante imágenes satelitales los cambios estacionales que ocurren en la vegetación; uno de ellos es la aplicación de índices de vegetación relacionados con el verdor (Chuvieco, 1998). Los índices de vegetación son medidas cuantitativas, basadas en los valores digitales de imágenes raster, tienden a medir la biomasa o vigor vegetal. Usualmente el índice de vegetación es producto de varios valores espectrales en un algoritmo diseñado para obtener un valor que indique la cantidad o vigor de vegetación dentro de un píxel, han sido usados en una gran variedad de contextos para evaluar la biomasa para climas áridos (Jiménez, 2010).

El NDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada) ha sido el más usado en teledetección de vegetación durante las dos últimas décadas, fue desarrollado por Rouse *et. al*. (1973) a partir del análisis de datos de Landsat-MSS. Se considera un indicador indirecto de la sequía agrícola, debido a que la precipitación es el factor responsable del crecimiento de la vegetación, por lo tanto, se puede probar que la precipitación y el NDVI se correlacionan el uno con el otro (Dutta, 2013).

La predicción de la sequía agrícola mediante el rendimiento agrícola utilizando un modelo basado en NDVI-SPI, ha sido abordado por Dutta, 2013, observo que el SPI con diferentes escalas de tiempo se correlaciona con NDVI con un desfase de una quincena, es decir el NDVI de una fecha actual presenta una alta correlación con el SPI de una quincena anterior en zonas semiáridas y de transición. Esto se debe a que la lluvia de un mes no es notable en la vegetación de ese mismo mes, esta es notable a lo largo periodos más largos de un mes (Dutta, 2013) y Chuai, 2013 establece en la señal un retraso de entre 4 a 8 semanas.

En estudios previos en la microcuenca del Valle de Guadalupe, Hallack recomienda el uso de estimaciones del SPI para monitorear sequías meteorológicas para ser utilizadas como una componente clave en un plan de manejo de sequías; calculo valores SPI para el periodo 1950 – 2008 en la escala de tiempo de 24 meses en la cuenca del arroyo del Valle de Guadalupe, encontró valores de -1 a -2.5, en tres episodios de sequía los períodos permanecieron por debajo del promedio por doce, tres y cinco años consecutivos.

Estudios previos se documenta una tendencia a incrementar el área agrícola de riego dedicada a la vid; la superficie dedicada a la agricultura en 1946 consistía de 4,000 hectáreas de temporal y para 1988, la superficie irrigada era de 3,573 hectáreas equivalente a un consumo total de agua de 7.83 Mm^3 considerando una lámina de riego por gravedad de 0.43 m (Gaeta, 2006). En relación al tipo de riego de la superficie cultivable, 65 por ciento corresponde a irrigación y 35 por ciento a temporal y Gaeta - Lara, (2006), estima tendencias de incremento en el área cultivada para vid, con varietales que requieren mayor volumen de agua en el riego, debido a la diversificación del mercado de vinos, lo que detonaría cambios en la demanda de agua.

Meraz (2012), menciona que, debido a las recientes sequías, la sobreexplotación del acuífero, las constantes heladas y los largos periodos de calor, se han observado irregularidades en la producción de la uva, aumentando en algunos años y disminuyendo en otros. Por otro lado, en el programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía del 2014, menciona que la falta de agua para la agricultura en la región ya ha comenzado a afectar a cultivos. El programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía del 2014 cita que la principal problemática en el consejo de cuenca-02 es el desabasto de agua urbano, la falta de agua para la agricultura, la pérdida de potencial inversionista y conflictos sociales.

En respuesta a la problemática expuesta, Sánchez (2011), ha recomendado a los viticultores evaluar la eficiencia técnica y económica de la agroindustria en su conjunto considerando distintos varietales tanto los de temporal que requieren poca agua para su mantenimiento, como los varietales de mayor requerimiento hídrico; con el fin de optimizar el uso del agua y maximizar sus ganancias disminuyendo los costos de bombeo para irrigación y pérdidas debido a cosechas con bajos niveles de calidad.

En los últimos cinco años se ha percibido de manera informal el incremento de casas vitivinícolas y con ellas los cultivos de vid en la región, en contraste a las precipitaciones que presentan una tendencia a la baja, contrario con lo que sucede en los ecosistemas naturales, donde la biomasa vegetal es directamente proporcional a la precipitación.

Gaeta-Lara en 2006 ha sido el único estudio en el Valle de Guadalupe que ha realizado una cuantificación de los cambios de la cobertura agrícola. Con base en datos oficiales de SAGARPA del periodo 1994-2004, desde entonces hasta el momento no se han realizado estudios del cambio en la cobertura vegetal agrícola.

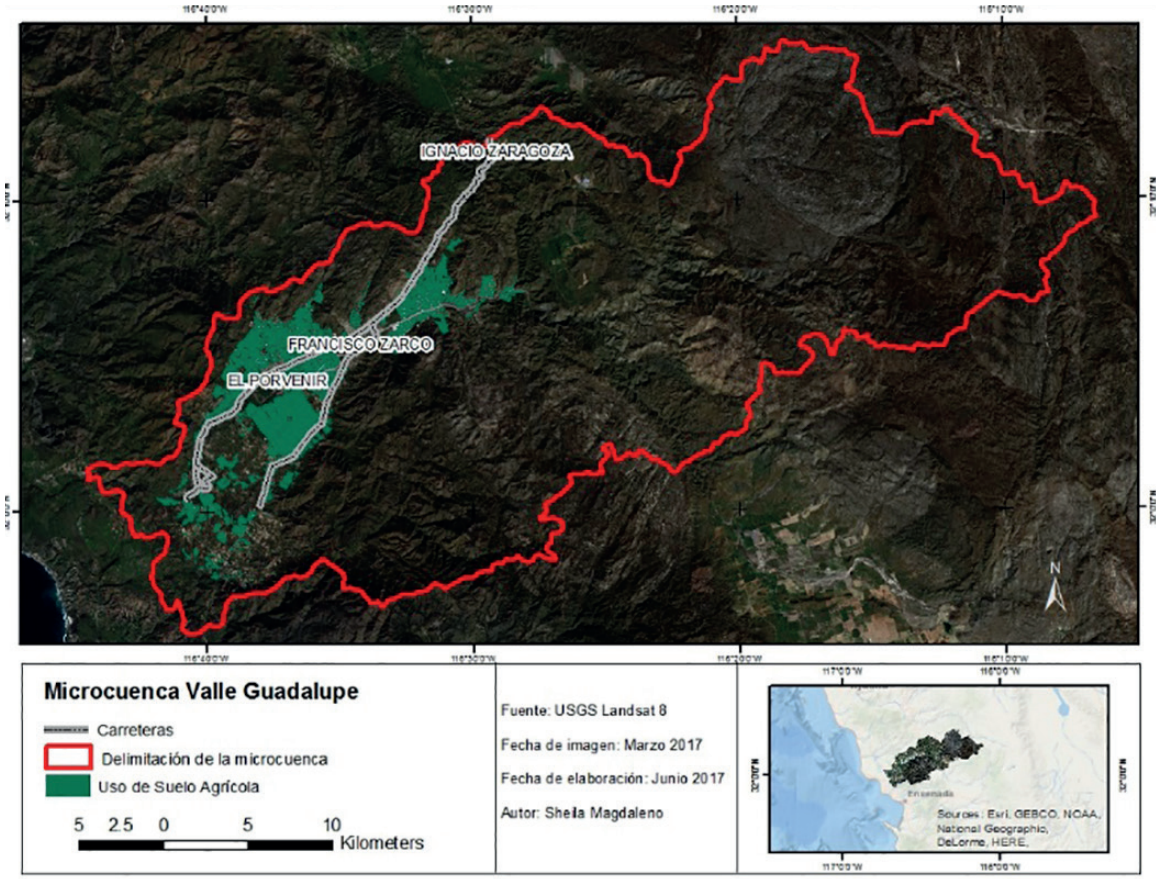
A la fecha no existen estudios que evalúen la relación entre cobertura agrícola y precipitación en el Valle de Guadalupe. El presente trabajo funcionará como una primera aproximación que abrirá mayores cuestionamientos sobre el tema.

Por todo lo anterior en el presente trabajo se realiza la evaluación del Índice de vegetación de la zona agrícola del Valle de Guadalupe en el periodo 2006 – 2016 y se contrasta con el ISP durante el mismo periodo con el fin de determinar los cambios en la precipitación y su influencia en la permanencia de las actividades agrícolas.

17.3. Materiales y Métodos

El área de estudio, se sitúa en la Microcuenca del Valle de Guadalupe (Figura 1) ubicada a 25 Km al norte de la ciudad de Ensenada, y a 85 Km al sur de la ciudad de Tecate, en el noroeste del estado de Baja California; presenta una forma alargada con orientación noreste a suroeste sobre los márgenes del Arroyo Guadalupe, es una extensión de zona rocosa-montañosa con una elevación sobre el nivel del mar de 1,100 pies y un área de 96 055 hectáreas, en las coordenadas geográficas 32° 07' a 32° 02' de latitud norte y -116° 28' a -116° 47' de longitud oeste (Andrade, 1997 en Meraz *et. al*, 2012). Cuenta con una temperatura media de 16.9 °C, con extremos registrados de -9°C y 45.5°C (Leyva, 2016), la época de lluvias se presenta durante los meses de noviembre a marzo (Gaeta, 2006), la escasa precipitación es compensada por la alta humedad atmosférica producida por las nieblas marinas que cubren el matorral por varias horas

del día (Meraz *et. al*, 2012). Posee un micro-clima mediterráneo que es propicio para las actividades vitivinícolas, sin embargo, es una zona semiárida de alta variabilidad interanual en precipitación, donde se presentan períodos de sequía o años sucesivos con precipitaciones inferiores al promedio anual (Hallack-Alegría, 2011), cuenta con una población de 5,345 habitantes (CONAGUA, 2014).



Gráfica 17.1. Área de estudio Microcuenca Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia a partir de imagen Landsat 8 e información proporcionada por SEFOA 2017.

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) es un indicador de sequía que puede ser utilizado como una herramienta para el monitoreo y análisis de este fenómeno, para su cálculo se utiliza un mínimo de 30 años de registros de precipitación mensual, los datos históricos de precipitación de la estación son ajustados a la función de probabilidad acumulada Gamma. Mckee en 1993, propuso una clasificación de intensidad de humedad según el valor SPI que obtuvieran (Cuadro 17.1)

Cuadro 17.1. Categorías para cada rango de valores (Hallack, 2011).

SPI	Intensidad de humedad
+ 2	Extremadamente húmedo
+ 1.5 a +1.99	Muy húmedo
+1.0 a +1.49	Moderadamente húmedo
+0.99 a -0.99	Normal
-1 a -1.49	Moderadamente seco
-1.5 a -1.99	Severamente seco
-2	Extremadamente seco

El SPI fue calculado para cada mes del período de registro, 1948 – 2016, para la escala de tiempo de 12 meses, ajustando una distribución Gamma (Hallack, 2011). Los datos de precipitación mensual acumulada fueron proporcionados por CONAGUA (2014) de la estación meteorológica Olivares Mexicanos (2036), los datos de la estación fueron reconstruidos mediante la incorporación del promedio mensual de una serie de tiempo de 1936-2012 correspondiente a la base de datos de CLICOM-CICESE (Hallack, 2011). Los valores de SPI fueron calculados utilizando el software que provee el National Drought Mitigation Center, http://drought.unl.edu/ (Centro Nacional de Mitigación de Sequías) de Estados Unidos de América.

El NDVI es un índice que evalúa el verdor vegetal en una escala de 0 a 1, donde 0 representa la planta seca (ausencia de pigmento y mesófilo esponjoso) y 1 el mayor verdor, sin embargo, cada especie de planta presenta un valor típico de NDVI, ya sea por su estado fenológico o por la naturaleza de la misma, presentando un valor máximo que no necesariamente es 1, por lo tanto podemos estimar los valores mínimo y máximo durante el ciclo fenológico de determinada especie de planta, para su obtención, se utilizaron imágenes Landsat Tematic Mapper 5 (LTM 5) y Landsat Tematic Mapper 8 (LTM 8) en formato GeoTiff, las imágenes LTM 8 cuentan con 9 bandas espectrales de las cuales se trabajó con la banda del Rojo (B4) y del Infrarrojo Cercano (B5); las imágenes LTM 5 cuentan con 7 bandas espectrales de las cuales se trabajó con la banda del Rojo (B3) y del Infrarrojo Cercano (B4); todas las imágenes fueron obtenidas de forma gratuita del sitio http://glovis.usgs.gov. Se seleccionaron las correspondientes a la etapa de floración de la vid (abril-mayo) y de la cosecha de la uva (agosto), se utilizó LTM 5 para el periodo 2006-2011 y LTM 8 para el periodo 2013-2016.

El NDVI es un índice estandarizado de la vegetación creado por Rouse en 1973, este permite generar una imagen mostrando la biomasa relativa, proporcionando una medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas. Es usado para clasificar la sequía, supervisar y predecir la producción agrícola, asistir en la predicción de zonas en riesgo de incendio y desertificación.

El NDVI se basa en la absorción máxima de pigmentos de clorofila en la longitud de onda roja (R) que oscila entre 0.63 y 0.69 µm y la reflectancia del infrarrojo cercano (IRC), que oscila entre 0.76 y 0.90 µm, matemáticamente representado con la formula.

$$NDVI = \frac{(IRC - Rojo)}{(IRC + Rojo)} \quad (d)$$

Donde:

NDVI	=	Índice de vegetación de diferencia normalizada
IRC	=	Banda espectral del infrarojo cercano y rojo = Banda espectral de rojo

Los posibles valores varían de -1 a 1, donde los valores positivos representan la vegetación (+1 máxima vigorosidad), los valores cercanos a cero representan roca o suelo expuesto, y los valores negativos representan agua, nieve o nubes.

El cálculo se ejecutó en la función, calculadora raster en ArcMap 10.2 siguiendo la formula (d).

17.4. Resultados y discusión

El Valle de Guadalupe se caracteriza por contar con paisajes agrícolas de tipo mediterráneo muy atractivos al turismo gastronómico-enológico; tales como la vid, el olivo, el algarrobo, los cítricos, entre otros.

El producto vid ha generado un desarrollo económico-turístico importante, que se ve reflejado en la instalación de nuevas casas vinícolas en el Valle de Guadalupe, estas van

desde pequeñas bodegas familiares hasta grandes empresas exportadoras (Cuadro 2); en 2004 IMIP reporto la presencia de 18 casas vinícolas, para 2013 González-Andrade reporto alrededor de 57, Bringas en 2014 reporta 60 y actualmente (2017) se enlistan cerca de 77 casas vinícolas (WEB PROVINO, SECTURBC); en un periodo de 12 años hubo un aumento del 328%.

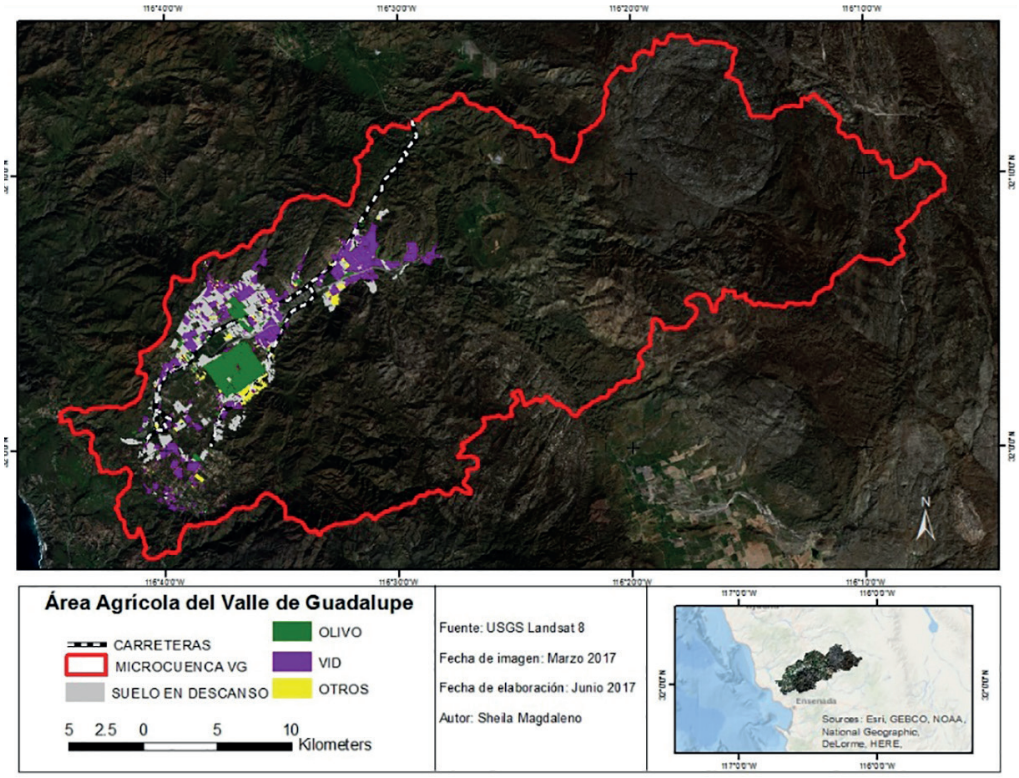
Cuadro 17.2. Crecimiento de casas vinícolas en el Valle de Guadalupe durante el periodo 2004-2017. Fuente: Elaboración propia.

Año	N° de casas vinícolas	Fuente
2004	18	IMIP
2013	57	Andrade-González
2014	60	Bringas
2016	77	WEB: PROVINO, SECTURBC.

Por otro lado el uso de suelo agrícola representa el 6% de la superficie de la microcuenca del Valle de Guadalupe (Gráfica 17.2), de acuerdo a los datos oficiales proporcionados por SEFOA se ha mantenido constantes durante el periodo 2013 - 2016 (Cuadro 17.2), es decir, no se reportan incrementos del área destinada al uso de suelo agrícola. Para 2016, esta comprende 5,869 hectáreas de las cuales se encuentran en descanso el 36.5% (2,143.8 Has), y el 63.5 % se encuentra activo (3,725.2 Has); es decir, el Valle de Guadalupe no se encuentra en su máxima capacidad de aprovechamiento. Si consideramos solo el uso de suelo agrícola activo, la vid representa el 58% (2,160 Has), el olivo el 34% (1,262 Has) y otros 18 tipos de cultivos tan solo un 8% (303.2 Has); por lo tanto los cultivos más importantes de esta región son la vid y el olivo que en conjunto suman el 92% del uso de suelo agrícola activo; desde el punto de vista socioeconómico la SAGARPA en 2004 reporta que estos cultivos son los más importantes tanto por los ingresos económicos que representan, como por la generación de empleo que conllevan a los pobladores de las localidades donde se llevan a cabo.

A pesar de que la superficie agrícola no ha crecido, en los últimos 3 años (2013-2016), se observó un incremento del 3% (66.4 Has) en el cultivo de vid y 12% (138.6 Has) para el de olivo. Por otra parte, el suelo en descanso disminuyo en un 5% (181 Has), así como el cultivo de otros productos han disminuido en un 24% (96 Has) (Cuadro 17.3),

por lo tanto existen cambios en el uso o tipo de cultivo de las parcelas en cada año, estos cambios en el tipo de cultivo explica que a pesar de no incrementarse el área del uso de suelo agrícola, si se incrementa la del cultivo de vid, debido al fuerte crecimiento de casas vinícolas.

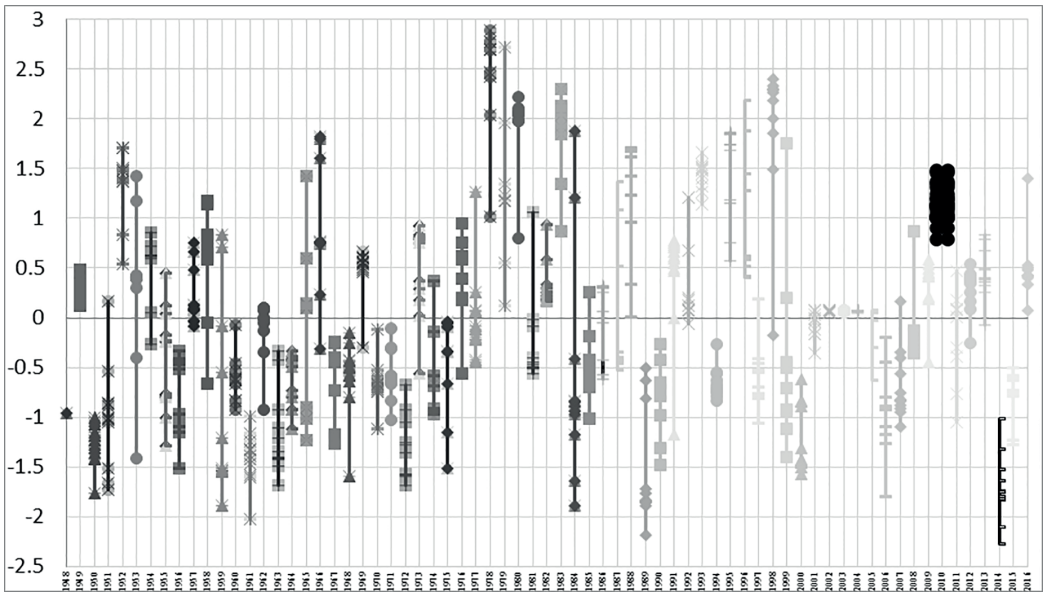


Gráfica 17.2. Ubicación del área agrícola y las parcelas aprovechadas por sus principales cultivos en el Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

Cuadro 17.3. Área en hectáreas de los principales tipos de cultivo en el Valle de Guadalupe en los últimos 4 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.

Tipo de cultivo/Año	2013	2014	2015	2016	Diferencia
Vid	2,093.7	2,123.2	2,137.1	2,160.1	+ 66.4
Olivo	1,123.4	1,240.4	1,247.0	1,262.0	+ 138.6
Otros	399.2	348.9	342.7	303.2	- 96
En descanso	2,252.7	2,156.5	2,142.2	2,143.8	-181
Total	*5,869*	*5,869*	5,869	5,869	0

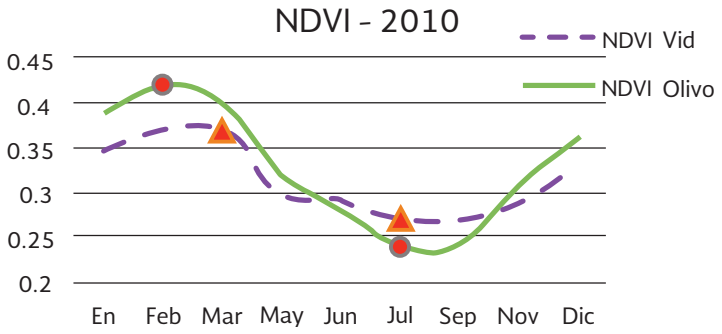
Por otro lado en la Gráfica 17.3, se muestran los resultados de SPI con los registros de precipitación de 68 años (1948 – 2016) para el Valle de Guadalupe, en esta gráfica, el año 2014, es el más seco de la seria analizada, con valores que fluctúan entre -1.02 para el mes de enero hasta el valor más seco de toda la serie -2.27 en el mes de Octubre, es decir en toda la serie, 2014 es el año más seco registrado. Por el lado opuesto, se observa que el año 20120 de la seria analizado para la vegetación, catalogado como moderadamente húmedo con valores de 1.43 para el mes de Octubre y 1.40 en Noviembre.



Gráfica 17.3. Serie de tiempo del Índice Estandarizado de Precipitación de 1948 a 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por CONAGUA, Extremadamente Seco (ES), Muy Húmedo (MuH), Modernamente Húmedo (MoH), Normal (N), Moderadamente Seco (MS), Severamente Seco (SS) y Extremadamente Seco (ES).

Luna-Toledo, 2016, evaluó la respuesta de dos especies de olivo cultivadas en Argentina durante un año, los valores de NDVI fluctuaron de 0.3 a 0.6, reporta también valores de NDVI para Vid de 0.3 a 0.65, los rangos entre cultivos no tienen diferencias significativas; Con el fin de caracterizar la respuesta del NDVI 2006 – 2016, tomando como referencia este estudio para las especies cultivadas de vid y olivo en el Valle de Guadalupe, durante el año 2010, con el fin de conocer la respuesta de NDVI promedio para vid y olivo en condiciones de SPI Moderadamente Húmedo (Gráfica 17.4), se observa que durante el invierno y principios de primavera se obtienen los valores más altos, es

decir se presenta el mayor verdor en respuesta directa al periodo de lluvias, por otra parte en verano el NDVI baja presentando los valores mínimos en ambos cultivos; es probable que la baja precipitación típica de este periodo y las actividades de cosecha de la vid (vendimia) sean la respuesta a este comportamiento (Gráfica 17.4 y Gráfica 17.5).



Gráfica 17.4. Comportamiento de NDVI promedio para Vid y Olivo durante un año húmedo en el Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia.

El intervalo de valores de NDVI obtenidos para la vid fue de 0.27 a 0.37, y para el olivo fue de 0.24 a 0.47 (Cuadro 17.4), estos valores en rango son distintos a los encontrados por Luna-Toledo en Argentina, sin embargo se encontró que los valores de NDVI entre vid y olivo no varían entre si presentando un rango para ambos cultivos entre 0.24 y 0.47. Considerando los resultados de NDVI promedio obtenidos para 2010 se generó una escala de clasificación para el Valle de Guadalupe, con el fin de poder evaluar los meses correspondientes a primavera y verano del periodo 2006-2016 (Cuadro 17.5).

Cuadro 17.4. Valores NDVI obtenidos para los cultivos en 2010. Fuente: Elaboración propia

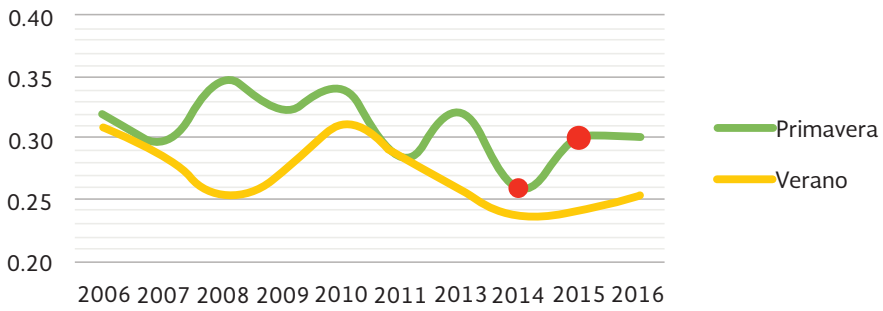
Mes	NDVI total	NDVI Vid	NDVI Olivo
En	0.38	0.35	0.39
Feb	0.39	0.37	0.42
Mar	0.39	0.37	0.40
May	0.34	0.30	0.32
Jun	0.29	0.29	0.28
Jul	0.27	0.27	0.24
Ago	0.31	0.30	0.26
Sep	0.3	0.27	0.24
Nov	0.32	0.29	0.31
Dic	0.34	0.33	0.36

Cuadro 17.5. Clasificación generada para los cultivos de VG durante primavera y verano. Fuente: Elaboración propia

Rango NDVI	Clasificación
0.20 a 0.25	**Bajo**
0.25 a 0.30	**Medio**
>0.30	**Alto**

Se analizaron dos imágenes por año del periodo 2006-2016, cada una representativa de primavera (abril – mayo) y verano (agosto), a partir de estas se calcularon valores NDVI promedio para el uso de suelo agrícola total ($NDVI_T$) y para el suelo cultivado con vid y olivo ($NDVI_{V-O}$), no se encontraron diferencias importantes entre ellas, esto se debe a que el suelo cultivado con vid-olivo representa el 92% del suelo cultivado y las parcelas destinadas a otros cultivos representan el 8%, además el suelo en descanso no aporta valores significativos de NDVI (~ 0.01), la vegetación silvestre que llega a cubrir esta área es mínima, debido al prolongado periodo de sequía, estas plantas responden directamente a la precipitación, no reciben riego.

Se observó que los valores de NDVI promedio son mayores en primavera con respecto a los obtenidos para verano (Gráfica 17.5), esto es por la respuesta vegetal a las lluvias de invierno.



Gráfica 17.5. Comportamiento de NDVIT promedio del uso de suelo agrícola del VG durante la última década. Fuente: Elaboración propia.

El valor máximo de NDVI promedio del uso agrícola en primavera fue de 0.35 (Alto) y el valor máximo de NDVI promedio para verano de 0.31 (Alto). El valor mínimo de NDVI promedio del uso agrícola en ambas estaciones coincide en el año 2014; para primavera se calculó 0.26 (Medio) y para verano 0.24 (Bajo) (Cuadro 17.6).

En la Gráfica 17.5 los puntos rojos indican un cambio en el valor de NDVI, para la primavera de 2014 se calculó 0.26 (Medio) y para 2015 0.30 (Alto). En 2014 las condiciones del Valle de Guadalupe llegan a sequía severa en el mes de abril y el NDVI promedio correspondiente disminuye hasta 0.26 en primavera y 0.24 para verano, siendo el valor más bajo del periodo analizado (Cuadro 17.6), sin embargo, en el 2015 se mantiene la sequía en condición moderada para después tornarse condición normal seco, esto implicaría que se mantuviese constante o en descenso el valor de NDVI, pero esto no sucedió, debido a que el NDVI aumenta de nivel medio en 2014 a nivel alto en 2015, esto podría ser una evidencia de la importación de agua al sitio, evidenciado por el impacto que pudiese tener la sequía meteorológica sobre el NDVI, que se detectó en el Valle de Guadalupe.

Cuadro 17.6. Datos $NDVI_T$ promedio para el periodo 2006-2016, clasificados según la propuesta generada para VG. Fuente: elaboración propia.

Año	$NDVI_T$	
	Primavera	Verano
2006	0.32 ALTO	0.31 ALTO
2007	0.3 ALTO	0.29 MEDIO
2008	**0.35** ALTO	0.25 MEDIO
2009	0.32 ALTO	0.27 MEDIO
2010	0.34 ALTO	0.31 ALTO
2011	0.28 MEDIO	0.28 MEDIO
2013	0.32 ALTO	0.26 MEDIO
2014	0.26 MEDIO	0.24 BAJO
2015	0.3 ALTO	0.24 BAJO
2016	0.3 ALTO	0.25 MEDIO

17.5. Conclusión

El año 2014 fue el más seco registrado en 68 años en la zona con un valor de SPI de -2.27 clasificándose con sequía extrema, paradójicamente en este mismo año se aumentaron 29.5 Has de cultivo de vid y 117 de olivo, también se instalaron 3 casas vinícolas más. Este crecimiento, según los datos de SEFOA no implica cambios de uso de suelo, instalándose sobre suelo agrícola en descanso.

La sequía más severa de los datos analizados dio inicio en enero de 2014 y se prolongó hasta febrero de 2015; los valores obtenidos de NDVI en 2014 se muestran de Nivel Bajo (0.26) y en 2015 de Nivel Medio (0.30), este cambio representa una recuperación del vigor vegetal, resultado de la probable importación de agua a la región.

Si las sequías se mantienen con la misma intensidad eventualmente el uso del agua del acuífero se verá en un fuerte conflicto de interés, entre el uso agrícola y el uso doméstico y de servicios. En el programa sectorial de desarrollo urbano – turístico de los valles vitivinícolas se considera como estrategia la compra de derechos de agua de otras cuencas, así como propiciar mayor reutilización del agua tratada y fomentar acciones tendientes a la recarga de los acuíferos, por lo tanto es posible que el agua actualmente utilizada para mantener las áreas agrícolas sea de otras cuencas, lo cual favorecería intereses económicos de productores, pero implicaría severos impactos ambientales como cambios en las características fisicoquímicas y biológicas de agua – suelo, así como la geomorfología de la cuenca.

La sequía no ha tenido efectos en la cobertura agrícola del Valle de Guadalupe; en este trabajo se observó que la sequía meteorológica no impacta directamente a la producción de la vegetación agrícola, contrario a lo que sucede con la vegetación silvestre, ya que se evita mediante el riego de apoyo, sin embargo, el acuífero del cual se extrae el agua para regar si depende de la precipitación para su recarga, entonces la sequía impacta la disponibilidad del agua para riego. Al mediano plazo la sequía representa una limitante a la disponibilidad de agua en el acuífero, por lo tanto, la sequía es una limitante indirecta sobre la permanencia y desarrollo de la agricultura en el Valle de Guadalupe.

El Valle de Guadalupe no se encuentra a su máxima capacidad agrícola (57% del uso de suelos agrícola disponible), probablemente porque el acuífero y el número de concesiones son in suficientes para mantener la superficie agrícola disponible, existe el riesgo que la sequía meteorológica detectada pueda convertirse en una sequía agrícola. Es de suma importancia verificar el origen del agua que se utiliza para mantener la agricultura del Valle, así como estimar escenarios sobre qué sucedería si el área agrícola es aprovechada a su máxima capacidad.

Se recomienda realizar análisis de NDVI más detallados, considerando los meses más húmedos cada diez años, con el fin de realizar una mejor caracterización del verdor vegetal de la zona agrícola.

17.6. Referencias

Asbjornsen, H., Vogt, K. A., & Ashton, M. S. (2004). Synergistic responses of oak, pine and shrub seedlings to edge environments and drought in a fragmented tropical highland oak forest, Oaxaca, Mexico. Forest ecology and management, 192(2), 313-334.

Bavestrello-Riquelme, C., Cavieres, L., Gallardo, J., Ibacache, A., Franck, N., & Zurita-Silva, A. (2012). Evaluación de la tolerancia a estrés por sequía en cuatro genotipos naturalizados de vid (Vitis vinifera) provenientes del norte de Chile. Idesia (Arica), 30(3), 83-92.

Bringas Rábago, & Nora L. (Coord.) (2014b). "Inventario de establecimientos turísticos en el Valle de Guadalupe", Tijuana, Reporte de investigación, El Colegio de la Frontera Norte (COLEF)-Secretaría de Turismo del Estado de Baja California (SECTURE).

Chuai, X. W., Huang, X. J., Wang, W. J., & Bao, G. (2013). NDVI, temperature and precipitation changes and their relationships with different vegetation types during 1998–2007 in Inner Mongolia, China. International Journal of Climatology, 33(7), 1696-1706.

Chuvieco, E. (1998). Fundamentos de teledetección espacial. Estudios Geográficos, 59.

CONAGUA (2014). Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Baja California y Municipio de San Luis Río Colorado.Sonora.

Dutta, D., Kundu, A., & Patel, N. R. (2013). Predicting agricultural drought in eastern Rajasthan of India using NDVI and standardized precipitation index. Geocarto International, 28(3), 192-209.

Gaeta Lara, A. (2006). Productividad de la vid en función del aprovechamiento de agua subterránea en el Valle de Guadalupe 1994-2004. MPA Thesis. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, México.

González Andrade, S., & Flores, N. A. F. (2013). Matriz de insumo-producto vitivinícola de Baja California, México. Revista de economía, 30(81), 57-88.

GloVis portal (http://glovis.usgs.gov) Earth Resources Observation and Science Center (EROS) of the United. States Geological Survey (USGS)

Hallack- Alegría, M. (2011) Análisis de frecuencias de precipitación por la metodología de L-momentos y sus efectos en la cuenca del arroyo de Guadalupe, Baja California, México. Tesis Doctoral. Instituto de Ingeniería. UABC.

Jiménez, N., Gavilá, J. M., & Rodríguez, I. C. (2010).Evaluación del impacto de la sequía sobre la vegetación natural mediante teledetección en el SE español.

Luna Toledo, E. S., & Figuerola, P. I. (2016). Monitoreo de la fenología y fenometría del olivar a través de la dinámica del NDVI-modis, en Vichigasta, La Rioja.

Meraz Ruiz, L., Valderrama Martínez, J. and Maldonado Radillo, S. (2012). La Ruta del Vino en el Valle de Guadalupe, Baja California, México. Perspectiva frente al cambio climático: Una primera aproximación. En: L. López Barbosa, G. Aboites Manrique and F. Martínez Gómez, ed., Globalización y agricultura. Nuevas perspectivas en la sociología rural. Saltillo: UAAAN – UA de C, p.24.

Periódico Oficial del Estado, No. 40, 29 de septiembre de 2006, Tomo CXIII. Programa sectorial de desarrollo urbano -turístico de los valles vitivinícolas de la zona norte del municipio de Ensenada (región del vino), B.C. Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada (IMIP).

PROVINO, A.C.(*https://provinobc.mx/)*

Reyes-Coca, S., & Troncoso-Gaytán, R. (2004). Modulación multidecenal de la lluvia invernal en el noroeste de Baja California. Ciencias marinas, 30(1A), 99-108

Sánchez, Gándara, A. (2011). Conceptos básicos de gestión ambiental y desarrollo sustentable. México: S y G Editores S.A. de C.V.

SEDESOL (2006). Programa de desarrollo regional. Región del vino.

18

CONCLUSIONES

Los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos están ocupando una mayor atención por parte del gobierno, organismos internacionales y la academia, responsable ésta última, de estudiar sus causas, impactos y nuevas formas de evitarlos. El creciente interés obedece a una serie de implicaciones que se traducen en personas fallecidas, heridos, damnificados y graves pérdidas económicas que reducen los niveles de desarrollo, con mayores efectos en los países en vías de desarrollo, como es el caso de México.

En un contexto de cambio climático, los desastres representan momentos de coyuntura que revelan las debilidades de una sociedad para hacer frente a una amenaza en particular, en este caso, a los fenómenos hidrometeorológicos. Los efectos del cambio climático representan uno de los principales desafíos a nivel mundial, ya que engloba una serie de modificaciones de los fenómenos atmosféricos y oceanográficos que impactan la vida cotidiana de las personas, al intensificarse los huracanes, tormentas, sequías, aumento en el nivel del mar, cambios en la distribución de especies de animales y plantas y, por supuesto, los desastres.

Los asentamientos humanos, así como las actividades productivas que le dan sustento, están sometidos a los efectos de los componentes del clima en un contexto cada vez más extremo. Los habitantes de las ciudades están experimentando con mayor frecuencia e intensidad eventos totalmente opuestos como ondas de calor o nevadas, inundaciones o escasez de agua, efectos asociados al cambio climático. En la agricultura, por ejemplo, los efectos del cambio climático o la variabilidad climática son responsables de variaciones en

los patrones de cultivo de especies emblemáticas como el maíz de temporal, donde el rendimiento está sujeto en gran medida a la intensidad de la lluvia, así como a su distribución espacial y temporal.

El monitoreo y estudio de eventos hidrometeorológicos como ciclones tropicales, tornados, sequías y variabilidad de la temperatura, son necesarios para tener una mejor comprensión de la dinámica de la atmósfera y del océano en condiciones específicas, pero sobretodo en lugares particulares que ofrezcan herramientas y conocimiento actual para el diseño de políticas públicas orientadas a la reducción del riesgo de desastres. En este sentido, el uso de bases de datos más robustas, simulación hidrológica de las cuencas del país y modelación numérica del clima son instrumentos que permiten entender mejor los fenómenos hidrometeorológicos que más impactan a la sociedad, con una visión de largo plazo necesaria para la planeación de los asentamientos humanos y de las actividades productivas.

La vulnerabilidad y el riesgo son factores que están directamente relacionados con el desastre, por lo cual no puede existir vulnerabilidad sin la conformación del riesgo, y no puede manifestarse el desastre si no existe una sociedad vulnerable. La mayor parte de las investigaciones presentadas en esta obra establecen que la vulnerabilidad es un término netamente social, ya que intervienen factores enmarcados en tres dimensiones como es la exposición, sensibilidad y adaptación, elementos que implican la ubicación de los asentamientos humanos, la capacidad de resistir los embates de un fenómeno intenso o peligro, y la capacidad de reponerse ante el impacto de una amenaza. En otro sentido, la vulnerabilidad puede estar relacionada con la capacidad de los cultivos para responder a distintos niveles de sequía o exceso de lluvia, fenómenos asociados a la variabilidad climática interanual o interdécadas.

El riesgo de desastres a inundaciones, particularmente asociado a lluvias intensas y ciclones tropicales, representa una de las principales causas de desastres en México y en el mundo. El aumento del riesgo de inundación se encuentra directamente relacionado al crecimiento de los asentamientos humanos en zonas costeras, ocupación de zonas no aptas para el desarrollo urbano (cauces y zonas de inundación), aumento en la intensidad de huracanes y cambio de uso del suelo. Un caso contrario lo repre-

sentan las sequías, eventos que frecuentemente se asocian a las regiones del norte del país, pero que en la actualidad se presentan en todo el territorio nacional. La sequía está asociada a cambios en los patrones de lluvia en ciertas zonas, pero sus efectos pueden intensificarse con los cambios de uso del suelo y la pérdida de biodiversidad, especialmente cuando se presenta un crecimiento acelerado de los asentamientos humanos y de ciertas actividades agrícolas.

La resiliencia de los asentamientos humanos en el país debe ocupar una mayor atención en los planes y programas de desarrollo urbano, así como un elemento central en la gestión integral del riesgo de desastres. De manera general, la resiliencia debe entenderse como la capacidad de respuesta de una sociedad para recuperarse de los efectos de una amenaza, término complementario a la vulnerabilidad, que involucra las debilidades de esa sociedad. Para el estudio y operacionalización de la resiliencia, se debe contar con indicadores reales, actuales y precisos que permitan definir acciones de política pública que reduzcan el riesgo actual y prevean el riesgo a futuro.

La reducción del riesgo de desastres debe estar orientado a una verdadera gestión integral del riesgo de desastres. En muchos casos la gestión del riesgo conlleva una visión de arriba hacia abajo donde no existen espacios de participación de los residentes de zonas donde ya se han presentado desastres, los cuales poseen una memoria sobre lo que ha ocurrido en un espacio y tiempo determinado. Sin embargo, la política pública para la reducción del riesgo ha tenido avances importantes en los últimos años, por lo menos en dos marcos normativos. La Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano (LGAHOTDU), publicada el Diario Oficial de la Federación del 28 de noviembre de 2016, contempla a la gestión integral de riesgos así como la reducción de riesgos de desastres, como elementos centrales de la política de planeación de los asentamientos humanos. Ante este nuevo panorama, la nueva infraestructura y desarrollos inmobiliarios deberán contar con un estudio de riesgo y prevenir la ocurrencia de desastres asociados a fenómenos naturales y antrópicos.

La Ley General de Protección Civil (LGPC), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 19 de enero de 2018, considera también a la gestión integral de riesgos (Art. 2, XXVIII) como un elemento central en la prevención de desastres y reconoce

a los riesgos como procesos de construcción social (Art. 10, I). De esta forma, existe una vinculación entre la LGAHOTDU y la LGPC al considerar que los asentamientos humanos sean cada vez más seguros, combinado la reducción del riesgo, la prevención y la atención de los desastres. La complementariedad entre ambos instrumentos es evidente, mientras que la LGAHOTDU busca incidir en la gestión del riesgo (evitar nuevos riesgos y reducir los existentes), la LGPC busca mejorar la gestión del desastre (atención, coordinación y prevención de los desastres).

En suma, los aportes generales de la presente obra se presentan a continuación:

Presenta estudios de caso que abarcan gran parte del territorio nacional (Tabasco, Baja California-2, Veracruz-2, Nayarit-2, Querétaro, Jalisco-2, Campeche, Quintana Roo-2, San Luis Potosí, Yucatán y a nivel nacional-2).

Aborda el riesgo y la vulnerabilidad desde una perspectiva física, natural, técnica y social, con lo que demuestra la complejidad sobre el estudio de los desastres.

Cada capítulo propone estrategias para la elaboración de instrumentos de políticas públicas que estén orientadas para un mejor conocimiento de los fenómenos naturales, reducir el riesgo y aumentar la vulnerabilidad y resiliencia de la sociedad.

La obra es resultado del trabajo de colaboración entre los miembros de REDESClim, es decir, cada capítulo fue elaborado por al menos dos miembros de la Red.

De esta forma se cumplen los objetivos de REDESClim planteados desde sus inicios como es fomentar la investigación científica e interdisciplinaria y la formación de recursos humanos de alto nivel, propiciar la colaboración de propuestas, promover el desarrollo de capacidades humanas y proponer medidas de prevención y mitigación de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos.

El estudio futuro de los desastres asociados al clima deberá orientarse a la solución de un problema nacional que cada vez es más complejo, especialmente si se asocia al cambio climático. Una visión integral de los desastres debe involucrar la reducción

de pérdidas humanas, económicas, daños en los ecosistemas y crear asentamientos humanos más seguros, con la participación de actores gubernamentales, organizaciones de la sociedad civil y de la población que ha sido o puede ser afectada por algún peligro asociado a un fenómeno natural. En este sentido, la política pública nacional sobre la reducción del riesgo de desastres debe ajustarse a un nuevo modelo de gestión dinámico, es decir, deberá contar con mecanismos que permitan la actualización de los principales componentes como lo es la participación ciudadana, transparencia y acceso a la información, así como crear mecanismos de evaluación de las diferentes estrategias implementadas, que contribuyan al desarrolla de una cultura de protección civil, con énfasis en la prevención.

RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO:
EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS

ÍNDICE FIGURAS

Gráfica I.1.	Impacto económico anual de los desastres en 2000-2016 en México (millones de pesos)	13
Gráfica I.2.	Impacto económico anual de los desastres en 2000-2016 en México (millones de pesos). Fuente: Segob-Cenapred, 2018.	15
Gráfica I.3.	Evolución del número de miembros REDESClim Fuente: elaboración propia.	17
Gráfica I.4.	Distribución de miembros REDESClim por entidad federativa (2017) Fuente: Useg, El Colef, 2017.	18
Gráfica I.5.	Adscripción institucional de los miembros de REDESClim (2017) Fuente: elaboración propia.	19
FOTO I.1.	Participantes en la Quinta Reunión Nacional REDESClim, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, B.C.S., 2017 Fuente: CIBNOR.	26
Gráfica 1.1.	Generación conceptual de los indicadores Fuente: Modificado de Jovanovic, et. al., 2016.	32
Gráfica 1.2.	Proceso de reconocimiento de las dimensiones y fases de los indicadore Fuente: Modificado de Jovanovic, et. al., 2016.	33
Gráfica 1.3.	Modelo de indicadores de resiliencia de ciudades costeras ante huracanes Fuente: Modificado de Hernández, 2014.	35
Gráfica 1.4.	Cuidad costera de Playa del Carmen, Municipio de Solidaridad, Quintana Roo, México Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI, 2016, 2010, 2005 y 2000; NHC, 2016.	37
Gráfica 2.1.	Distribución anual de tornados y trombas marinas para el periodo de 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.	65
Gráfica 2.2.	Distribución mensual de tornados y trombas marinas para el periodo 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.	66
Gráfica 2.3.	Distribución horaria de tornados y trombas marinas para el periodo 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.	67
Gráfica 2.4.	Distribución espacial de reportes de tornados y trombas marinas para el periodo 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios.	68
Gráfica 2.5.	Situación sinóptica tipo I, casos de 15-05-2016 en Chihuahua (izq.) y 17-05-2016 en Coahuila (der.). Humedad relativa (%) a 2 m, campo de vientos (m s-1) a 10 m y en contornos la presión a nivel del mar (hPa).	71
Gráfica 2.6.	Situación sinóptica tipo II, casos de 03-07-2016 en Quintana Roo (izq.) y 20-08-2016 en BC.S. (der.). Humedad relativa (%) a 2 m, campo de vientos (m s-1) a 10 m y en contornos la presión a nivel del mar (hPa).	73
Gráfica 2.7.	Situación sinóptica tipo III, casos de 23-03-2016 en Edo. de México (a) y 24-05-2016 en Edo. de México (b). Humedad relativa (%) a 2 m, campo de vientos (m s-1) a 10 m y en contornos la presión a nivel del mar (hPa).	75

Gráfica 2.8. Distribución de daños por tornados y trombas marinas para el periodo 2000-2017. Fuente: Elaboración propia con base en Macías y Avendaño (2014) y datos propios. 77
Gráfica 3.1. Trayectorias de 619 ciclones tropicales en la cuenca del Océano Pacífico oriental desde 1970 a 2010. Las líneas en color representan el ciclón 12 de 1959 (rojo), Liza de 1976 (azul) y Pauline de 1997 (verde); los puntos son posiciones cada 6 horas, los asteriscos sitios de entrada a tierra con la intensidad correspondiente. El cuadro indica la península de Baja California y los puntos negros la posición de Acapulco (Guerrero), Minatitlán (Colima) y La Paz (Baja California Sur). Fuente: elaboración propia. 85
Gráfica 3.2. Trayectorias de 85 ciclones tropicales en la cuenca del Océano Pacífico oriental desde 2011 a 2015. Las líneas en color representan los ciclones que entraron a tierra por la costa de México con posiciones cada 6 horas y asteriscos el primer sitio de entrada a tierra por cada ciclón con la intensidad correspondiente (km/h). Fuente: elaboración propia. 90
Gráfica 3.3. Imágenes infrarrojas del satélite GOES-15 durante la entrada a tierra de los ciclones tropicales Manuel (0700 horas, 15 de septiembre 2013), Odile (0000 horas, 16 de septiembre 2014) y Patricia (1900 horas, 24 de octubre 2015). La barra vertical de colores representa una escala de altura (km) asociada al desarrollo vertical de la nubosidad; nubes más altas alcanzan tonos rojos y negros. Fuente: elaboración propia. 92
Gráfica 3.4. Trayectoria del ciclón tropical Manuel (13-16 de septiembre 2013) antes y después de su entrada a tierra. Los puntos en color rojo representan posiciones cada 6 horas, con la intensidad (km/h) en su interior; asterisco es el sitio de entrada a tierra y cuadros azules son una selección de poblaciones. Las acumulaciones de lluvia (mm, 13-15 de septiembre) se indican con puntos verdes para estaciones meteorológicas con los 15 valores más altos en Guerrero. Elevaciones del terreno se indican mediante contornos de elevación del terreno cada 250 m. Las flechas negras indican la circulación del viento en el interior del ciclón. Fuente: elaboración propia. 94
Gráfica 3.5. Trayectoria del ciclón tropical Odile (15-16 de septiembre 2014) antes y después de su entrada a tierra. Los puntos en color rojo representan posiciones cada 6 horas, con la intensidad (km/h) en su interior y el asterisco es el sitio de entrada a tierra. Las acumulaciones de lluvia (mm, 14-16 de septiembre) se indican con puntos verdes para 33 estaciones meteorológicas. Elevaciones del terreno se indican mediante contornos de elevación del terreno cada 250 m. Las flechas indican la circulación del viento en el interior del ciclón. En el extremo inferior izquierdo se muestran la trayectoria de Odile y otros ciclones mencionados en el texto. Fuente: elaboración propia. 96
Gráfica 3.6. Trayectoria del ciclón tropical Patricia (23-24 de octubre 2015). Los puntos en color rojo representan posiciones cada 6 horas, con la intensidad (km/h) en su interior; el asterisco es el sitio de entrada a tierra y los cuadros azules son una selección de poblaciones. Elevaciones del terreno se indican mediante contornos de elevación del terreno cada 250 m. Las flechas indican la dirección del viento en el interior del ciclón. En el extremo superior derecho, con líneas punteadas, estaciones meteorológicas con lluvia (mm, 22-24 de octubre) para los 16 valores más altos en Colima y Jalisco. Fuente: elaboración propia. 99
Gráfica 3.7. Selección de pronósticos oficiales de trayectoria durante el desarrollo de los ciclones tropicales Manuel (a), Odile (b) y Patricia (c) en el Océano Pacífico oriental. Las líneas marcan pronósticos 24, 48 y 72 horas antes

de la entrada a tierra; los signos (+) indican la hora inicial así como en proyecciones a 12, 24, 36, 48, 72, 96 y 120 horas. La línea negra, gruesa es la trayectoria observada. Fuente: elaboración propia. 101

Gráfica 4.1. Distribución espacial en el área de estudio de 178 estaciones climatológicas del SMN con datos para el período 1921 a 2010. Cuencas: A) Río Coatzacolacos, B) Río Tonalá y Lagunas del Carmen y Machona, C) Río Grijalva – Villahermosa, D) Isla, E) Río Usumacinta – Chixoy, F) Laguna de Términos, G) Río Champotón, H) Río Grijalva – Tuxtla Gutiérrez, I) Río Lacantum. Fuente: modificado de Fernández et. al., (2017a, p. 53) 115

Gráfica 5.1. Localización del Altiplano Mexicano (AM) y la Costa Occidental del Pacífico Mexicano (COPM), frente a las costas de Nayarit (mapa pequeño), y tipos de climas presentes en toda el área (mapa grande). En el mapa grande, las líneas cortadas indican los límites estatales y en línea blanca se muestra el contorno de la cuenca del río San Pedro Mezquital. Las áreas sombreadas en ambos mapas son representativas del AM (gris) y la COPM (negro) resultado de un análisis de Funciones Empíricas Ortogonales aplicado a 174 series de precipitación. Fuente: Elaboración propia. 128

Gráfica 5.2. Contornos de anomalías de precipitación en base a la diferencia entre la media de precipitación de los 10 años secos (a) y de los 10 años húmedos (b), y la media de todo el período 1970-2012. Para cada serie individual se calculó la anomalía para construir los contornos. Los contornos azules muestran las anomalías negativas (déficit de lluvia) mientras que los contornos rojos muestran las anomalías positivas (exceso de lluvia). El contorno igual a cero se muestra con línea negra gruesa. Fuente: modificado de Vega-Camarena et. al., 2018. 135

Gráfica 5.3. Series de sumas estandarizadas de precipitación mensual entre 1970 y 2012 estimadas a partir de las series regionales del Altiplano Mexicano (a) y la costa occidental del Pacífico Mexicano (b). En cada caso, cuando la tendencia de la serie va en aumento es indicación de un período húmedo. Por el contrario, si va en descenso es indicación de un período seco. Obsérvese como hay períodos húmedos y secos en el Altiplano que coinciden con períodos opuestos en la costa, aunque su duración no necesariamente coincide. Fuente: Elaboración propia. 136

Gráfica 5.4. Mapas compuestos de vectores de viento promedio (m s-1) y anomalías de contornos de humedad específica (g kg-1) a 500 hPa (≈5000 m) (a) y 700 hPa (≈3000 m) durante 10 años secos en el Altiplano Mexicano. El contorno = 0 g kg-1 se muestra en línea gruesa y los valores positivos están sombreados en color celeste. Los vórtices de movimientos ciclónicos y anti-ciclónicos se muestran con la letra 'B' y 'A', respectivamente. El cuadro de color rojo muestra el área de interés. Fuente: Elaboración propia. 139

Gráfica 5.5. Mapas compuestos de vectores de viento promedio (m s-1) y anomalías de contornos de humedad específica (g kg-1) a 500 hPa (≈5000 m) (a) y 700 hPa (≈3000 m) durante 10 años húmedos en el Altiplano Mexicano. El contorno = 0 g kg-1 se muestra en línea gruesa y los valores positivos están sombreados en color celeste. Los vórtices de movimientos ciclónicos y anti-ciclónicos se muestran con la letra 'B' y 'A', respectivamente. El cuadro de color rojo muestra el área de interés. Fuente: Elaboración propia. 140

Gráfica 5.6. Mapas de anomalías de divergencia promedio a 11 km de altura (a y c) y a nivel del mar (b y d) durante el período seco registrado en el Altiplano Mexicano entre 1998 y 2001. Los mapas de la derecha son ampliaciones de la zona de estudio delimitada por el cuadro rojo. Los contornos positivos, que indican divergencia de humedad se muestran en negro, mientras que los contornos negativos, que indica convergencia de humedad se muestran en blanco. Las áreas de convergencia están sombreadas en color azul. Fuente: Elaboración propia. 141

Gráfica 5.7.	Mapas de anomalías de divergencia promedio a 11 km de altura (a y c) y a nivel del mar (b y d) durante el período húmedo registrado en el Altiplano Mexicano entre 1998 y 2001. Los mapas de la derecha son ampliaciones de la zona de estudio delimitada por el cuadro rojo. Los contornos positivos, que indican divergencia de humedad se muestran en negro, mientras que los contornos negativos, que indica convergencia de humedad se muestran en blanco. Las áreas de convergencia están sombreadas en color azul. Fuente: Elaboración propia.	142
Gráfica 5.8.	Mapa donde se muestran en color amarillo los polígonos de las cuencas del río San Pedro Mezquital, que desemboca en el Pacífico, y del Altiplano Mexicano cuyo drenaje es hacia el interior del continente (Izquierda). En línea azul se muestra la trayectoria del río San Pedro Mezquital y del río Aguanaval unidos arbitrariamente en los límites de sus cuencas adyacentes para hacer continua la línea que sirve de base para construir el perfil longitudinal desde la costa hasta el interior del Altiplano (Derecha). Fuente: Elaboración propia.	143
Gráfica 5.9.	Modelo conceptual de flujos de viento en condiciones secas (a) y húmedas (b) identificadas en el Altiplano Mexicano con base en los resultados del análisis de divergencia y contenido de humedad en la atmósfera el perfil longitudinal a lo largo de los cauces de los ríos San Pedro-Mezquital y Aguanaval. Fuente: Elaboración propia.	144
Gráfica 6.1.	Localización de la cuenca del río Valles. Elaboración propia con información de la CONABIO, IMTA e INEGI. Las estaciones meteorológicas están identificadas con su número en el sistema CLICOM (CISESE 2017)	160
Gráfica 6.2.	Promedio mensual (1979-1996) obtenido con las bases de datos meteorológicas seleccionados para a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima. Fuente: elaboración propia con las bases de datos meteorológicas seleccionadas para este estudio.	162
Gráfica 6.3.	Función de distribución acumulada obtenida con las bases de datos seleccionadas para a) precipitación, b) temperatura máxima y c) temperatura mínima en el periodo 1979-1996.Fuente: elaboración propia.	163
Gráfica 6.4.	Caudales diarios observados y simulaciones hidrológicas para el periodo de calibración (1990-1994) obtenidos con las bases de datos seleccionadas.	165
Gráfica 6.5.	Caudal mensual observado (obs) y simulados en el periodo para el periodo de calibración (1990-1994) obtenidos con las bases de datos seleccionadas. Fuente: elaboración propia	166
Gráfica 6.6.	Error calculado entre el indicador hidrológico obtenido con el caudal observado y los indicadores hidrológicos obtenidos con las bases de datos meteorológicas seleccionadas para el periodo de calibración del modelo (1990-1994). Fuente: elaboración propia	167
Gráfica 7.1.	Celdas de malla GFS en Veracruz. Fuente: elaboración propia	179
Gráfica 7.2.	Dominios del WRF. Fuente: elaboración propia	180
Gráfica 7.3.	Celdas de malla WRF en Veracruz. Fuente: elaboración propia	181
Gráfica 7.4.	Esquema de ejecución automatizada del WRF. Fuente: elaboración propia	184
Gráfica 7.5.	Ubicación de estaciones meteorológicas en el estado de Veracruz y alrededores. Fuente: elaboración propia	186
Gráfica 7.6.	Pronóstico de precipitación acumulada 48 horas antes del 10/08/17. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17	188
Gráfica 7.7.	Precipitación acumulada con datos de la CONAGUA del 10/08/17. Fuente: Organismo Cuenca Golfo Centro (CONAGUA, 2017)	189
Gráfica 7.8.	Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Teziutlan datos medidos. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17	190
Gráfica 7.9.	Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Perote. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17	191

Gráfica 7.10. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Tuxpango. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17 192
Gráfica 7.11. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Xalapa. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 08/08/17 193
Gráfica 7.12. Pronóstico de precipitación acumulada 48 horas antes del 09/09/17. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 07/09/17 196
Gráfica 7.13. Precipitación acumulada con datos de la CONAGUA del 09/09/17. Fuente: Organismo Cuenca Golfo Centro (CONAGUA, 2017) 197
Gráfica 7.14. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Teziutlán. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 07/09/17 198
Gráfica 7.15. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Perote. 199
Gráfica 7.16. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Tuxpango. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 07/09/17 200
Gráfica 7.17. Pronóstico WRF 72 horas antes vs EMA Xalapa. Fuente: elaboración propia, con datos WRF, corrida del 07/09/17 201
Gráfica 8.1. Área de estudio. Región de Bahía de Banderas y localización de las estaciones meteorológicas. Elaboración propia. 210
Gráfica 8.2. Índice Oceánico de El Niño (ONI por sus siglas en inglés) Se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región El Niño 3.4 (franja comprendida entre 5°N – 5°S y 120°-170°O) Fuente: https://www.nwfsc.noaa.gov/research/divisions/fe/estuarine/oeip/figures/Figure_ONI-01.JPG 212
Gráfica 8.3. Índice Multivariado del ENSO (MEI por sus siglas en inglés)obtendio a partir de seis varaibles observadas sobre el Pacífico Tropical. Fuente NCAR 2013 Fuente: https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/multivariate-enso-index. 213
Gráfica 8.4. Promedios anuales de la temperatura [°C] mínima en línea punteada y máxima en línea continua, de 1928 al 2016. Se unió la serie histórica de la estación manual (Puerto Vallarta) y datos de una estación meteorológica automática (CUC). 215
Gráfica 8.5. Promedios de la Temperatura mensual [°C] mínima en línea punteada y máxima en línea continua, de la serie de 1928 al 2016. 216
Gráfica 8.6. Promedio decenal de la temperatura [°C] observada en la ciudad de Puerto Vallarta de 1930 al 2016 de acuerdo a los datos registrados. 216
Gráfica 8.7. Anomalía suavizada de la temperatura del punto Cuc(a) y la Prepa (b) con línea sólida y MEI con línea punteada. 218
Gráfica 9.1. Ubicación geográfica del área de estudio. Municipio de Puerto Vallarta. Fuente: Elaboración propia. 227
Gráfica 9.2. Ubicación geográfica de cada uno de los puntos de muestreo Fuente: Elaboración propia. 228
Gráfica 9.3. Concentraciones medias de PM10 por día de la semana en el punto Ixtapa 231
Gráfica 9.4. Concentraciones medias de PM10 por día de la semana de los puntos Aurora y Pitillal 232
Gráfica 9.5. Concentraciones medias de PM10 por día de la semana de los puntos Juntas, Centro, Marina, Caracol y Mojoneras 232
Gráfica 9.6. Mapa de superficie de los sistemas atmosféricos presentes en la región de estudio. Fuente: Centro Nacional de Huracanes (NHC), Análisis y Pronósticos Marinos (2017) 233
Gráfica 9.7. Sondeo por satélite (19/02/2017-12:00 UTC). Fuente: Air Resources Laboratory (2017) 234
Gráfica 9.8. Imagen Satelital de vapor (19/02/2017-12:00 UTC). Fuente: Marshall Space Flight Center (MSFC) (2017). 235
Gráfica 9.9. Mapa de superficie de los sistemas atmosféricos presentes en la región de estudio. Fuente: Centro Nacional de Huracanes (NHC), Análisis y Pronósticos Marinos (2017) 236

Gráfica 9.10.	Sondeo por satélite (31/03/2017-12:00 UTC). Fuente: Air Resources Laboratory (2017)	237
Gráfica 9.11.	Imagen Satelital de vapor (31/03/2017-12:00 UTC). Fuente: Marshall Space Flight Center (MSFC) (2017)	238
Gráfica 10.1.	Localización de las ciudades Fuente: Elaboración propia con base en INEGI, 2010.	249
Gráfica 10.2.	Índice de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales en la ciudad de Motul a nivel de secciones electorales. Fuente: Elaboración propia	262
Gráfica 10.3.	Índice de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales en la ciudad de Progreso a nivel de secciones electorales. Fuente: Elaboración propia	263
Gráfica 11.1.	Rendimiento del maíz de temporal según fase del ENSO y ciclo vegetativo.	287
Gráfica 11.2.	Vulnerabilidad del rendimiento de maíz de temporal por ciclo vegetativo según fase del ENSO.	289
Gráfica 12.1.	Localización del área de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2005).	300
Gráfica 12.2.	Impacto de Karl y Matthew en diferentes sectores: a) Vivienda, b) Actividades económicas, c) Salud, d) Vías de comunicación. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo	304
Gráfica 12.3.	Percepción de la población de las localidades La Antigua y Nicolás Blanco acerca del aumento en la frecuencia y la intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en campo	309
Gráfica 13.1.	Relación de bi-direccionalidad entre los procesos sociales y naturales	320
Gráfica 13.2.	Promedio de precipitación anual de 1914-2005 para la región de San Diego, CA. (FUENTE: NOAA-National Weather Service Forecast Office, en línea).	322
Gráfica 13.3.	Mapa de Ensenada en la región fronteriza California-Baja California, elaborado por Alejandro García Gastelum.	323
Gráfica 13.4.	Inundación de marzo de 1978, Salvador Farreras, 1978, archivo particular.	324
Gráfica 13.5.	Se observa el nivel del agua sobre la pared, Salvador Farreras, 1978, archivo particular.	325
Gráfica 13.6.	Antigua desembocadura del río formando una laguna costera, Heberto Peterson, 1919, archivo particular.	326
Gráfica 13.7.	Al centro se observa la laguna ya desecada y arriba el cauce del río modificado, Heberto Peterson, años sesenta, archivo particular.	326
Gráfica 13.8.	Recurrentes inundaciones en la zona de la antigua laguna costera, archivo La Jornada B.C., en línea.	327
Gráfica 14.1.	Evolución teórica de un karst tropical Fuente: modificada de Lehmann, 1954	336
Gráfica 14.2.	Evolución del karst tropical en la península de Yucatán. Fuente: Elaboración propia	337
Gráfica 14.3.	Perfil morfopedológico representativo del sur de Campeche. Fuente: Elaboración propia	339
Gráfica 14.4.	Resultado gráfico de la aplicación del índice MRVBF (líneas claras) y su comparación con límites morfológicos asociados a un poljé en Balamkú, Campeche. Fuente: Elaboración propia con base MDE. Inegi.	342
Gráfica 14.5.	Comparación entre las fronteras del índice MRVBF y el Tasseled cap aplicada a la región norte de los Chenes, Campeche. Fuente: Elaboración propia con base Imagen Landsat TM.	343
Gráfica 14.6.	Índice MRVBF modificado en las fronteras y extensión de sus polígonos según las respuestas radiométricas del Tasseled cap. Fuente: Elaboración propia con base MDE.Inegi.	344

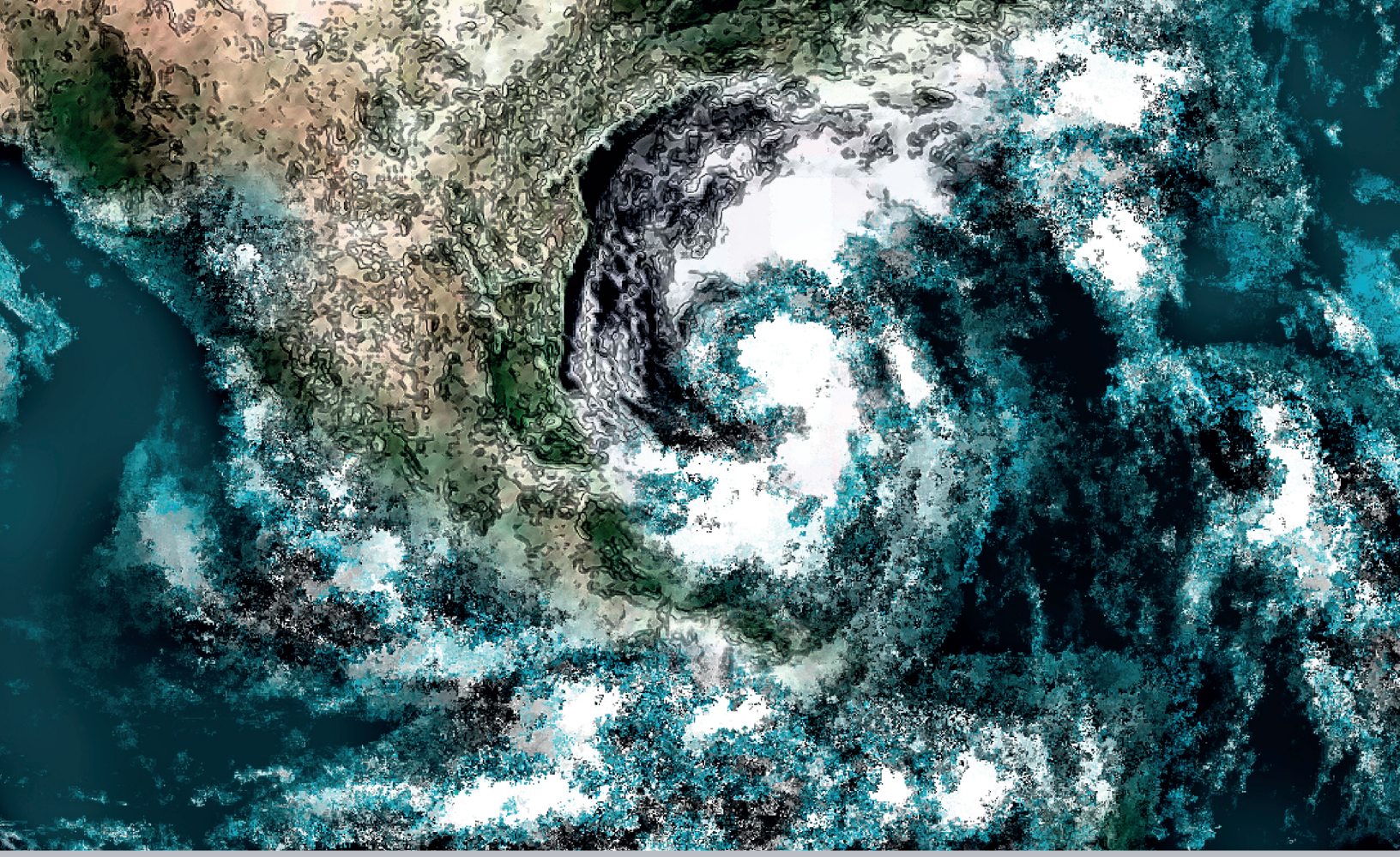
Gráfica 14.7. Precipitación promedio anual y acumulada en 7 días durante el huracán Isidoro en Campeche. Fuente: Rivera-Arriaga et. al., 2004 346
Gráfica 14.8. Fotos de los bajos inundables afectados por el huracán Isidoro. Fuente: Universidad Autónoma de Yucatán Centro de Investigaciones Regionales "Dr. Hideyo Noguchi" 347
Gráfica 14.9. Susceptibilidad a la inundación región Norte de Campeche. Fuente: Elaboración propia 349
Gráfica 14.10. Susceptibilidad a la inundación región centro de Campeche. Fuente: Elaboración propia 350
Gráfica 14.11. Susceptibilidad a la inundación región sur de Campeche. Fuente: Elaboración propia 351
Gráfica 15.1. Esquema de los componentes principales de SHETRAN. Fuente: (Ewen y Parkin, 2000:252). 358
Gráfica 15.2. Modelo digital de elevaciones de las microcuencas de estudio. González (2015). 359
Gráfica 15.3. Mapa de ubicación de las microcuencas Amazcala y San José, dentro de la cuenca del Río Querétaro, en el estado de Querétaro. 360
Gráfica 15.4. Crecimiento demográfico en el estado de Querétaro. Fuente: (INEGI, 2015). 361
Gráfica 15.5. Usos de suelo en la microcuenca San José, resoluciones: a) 30 m y b) 300 m. 362
Gráfica 15.6. Lluvia acumulada para los tres eventos- 1, 10 y 17 septiembre 2015. 363
Gráfica 15.7. Evolución del cambio en la cobertura vegetal en la microcuenca San José 367
Gráfica 15.8. Evolución del cambio en la cobertura vegetal en la microcuenca Amazcala 368
Gráfica 15.9. Simulación del evento del 1 de septiembre 2015 para los usos de suelo de 2015, 2001 y 1986 en la microcuenca San José. 371
Gráfica 15.10. Simulación del evento del 10 de septiembre 2015 para los usos de suelo de 2015, 2001 y 1986 en la microcuenca San José. 371
Gráfica 15.11. Simulación del evento del 17 de septiembre 2015 para los usos de suelo de 2015, 2001 y 1986 en la microcuenca San José. 373
Gráfica 15.12. Simulación del evento del 10 de septiembre para los usos de suelo de 1986-2015 en la microcuenca Amazcala. 373
Gráfica 15.13. Simulación del evento del 17 de septiembre para los usos de suelo de 2015 y 1986 en la microcuenca Amazcala. 374
Gráfica 15.14. Respuesta para la urbanización de 2050 con la lluvia medida en 2015 e intensidades con duración de 60 min y periodos de retorno de 10, 20, 25, 50 y 100 años en la microcuenca San José 375
Gráfica 15.15. Respuesta para la urbanización de 2050 con la lluvia medida en 2015 e intensidades con duración de 60 min y periodos de retorno de 10, 20, 25, 50 y 100 años en la microcuenca Amazcala 375
Gráfica 15.16. Polígonos de posible avance de la mancha urbana San José (imagen superior) y Amazcala (imagen inferior). 377
Gráfica 16.1. Ubicación del área urbana de Payo Obispo, Quintana Roo en 1902. Fuente: Archivo General del Estado de Quintana Roo. 385
Gráfica 16.2. Casa Anglo-Caribeña. Uso del Curvato. 2017. Foto: Joel Audefroy, Noviembre del 2017 387
Gráfica 16.3. Mapa de Chetumal, Quintana Roo. México. 1946. Fuente: Archivo General del Estado de Quintana Roo. 388
Gráfica 16.4. Los efectos destructores del Huracán Janet en 1955. Fuente: Casa de la Crónica, Chetumal. 392
Gráfica 16.5. Inundaciones históricas en el Municipio Othón P. Blanco 1970-2013 Fuente: Sistema de Inventario de Efectos de Desastres. DESINVENTAR. 2018 395
Gráfica 16.6. Lluvias torrenciales, históricas en el Municipio Othón P. Blanco 1970-2013 Fuente: Sistema de Inventario de Efectos de Desastres. DESINVENTAR. 2018 395

Gráfica 16.7.	Colonias de Chetumal afectadas por hundimientos. Chetumal. 2011	397
Gráfica 16.8.	Fachadas de casas de madera Estilo Victoriano. Chetumal. 2017. Fotos: Joel Audefroy, Noviembre del 2017	398
Gráfica 16.9.	Casa muy deteriorada en Calle 22 de enero Esq. con Fco I. Madero. Fotos: Joel Audefroy, Noviembre del 2017	400
Gráfica 17.1.	Área de estudio Microcuenca Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia a partir de imagen Landsat 8 e información proporcionada por SEFOA 2017.	411
Gráfica 17.2.	Ubicación del área agrícola y las parcelas aprovechadas por sus principales cultivos en el Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.	415
Gráfica 17.3.	Serie de tiempo del Índice Estandarizado de Precipitación de 1948 a 2016. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por CONAGUA, Extremadamente Seco (ES), Muy Húmedo (MuH), Modernamente Húmedo (MoH), Normal (N), Moderadamente Seco (MS), Severamente Seco (SS) y Extremadamente Seco (ES).	416
Gráfica 17.4.	Comportamiento de NDVI promedio para Vid y Olivo durante un año húmedo en el Valle de Guadalupe. Fuente: Elaboración propia.	417
Gráfica 17.5.	Comportamiento de NDVIT promedio del uso de suelo agrícola del VG durante la última década. Fuente: Elaboración propia.	418

ÍNDICE CUADROS

Cuadro 1.1.	Indicadores de vulnerabilidad del ambiente social y su monitoreo para el año 2017	43
Cuadro 1.2.	Indicadores de vulnerabilidad del ambiente económicoy su monitoreo para el año 2017	44
Cuadro 1.3.	Indicadores de vulnerabilidad del ambiente construido y su monitoreo para el año 2017	45
Cuadro 1.4.	Indicadores de vulnerabilidad del ambiente organizacional y su monitoreo para el año 2017	46
Cuadro 1.5.	Indicadores de vulnerabilidad del ambiente cultural y su monitoreo para el año 2017	48
Cuadro 3.1.	Impacto físico y social para una selección de ciclones tropicales en la costa occidental de México	86
Cuadro 3.2.	Características generales de la población en México	89
Cuadro 3.3.	Actividad de ciclones tropicales en las temporadas 2011-2015	91
Cuadro 3.4.	Ciclones tropicales con impacto relevante en el noroeste de México	97
Cuadro 3.5.	Ciclones tropicales con impacto relevante en el suroeste de México	100
Cuadro 4.1.	Número de bases de datos, formatos y número de visualizaciones cartográficas desarrolladas, así como el número de metadatos estructurados.	113
Cuadro 4.2.	Número de estaciones después y antes del control de calidad para cada variable en su período correspondiente	116
Cuadro 6.1.	Bases de datos usadas en este estudio	162
Cuadro 6.2.	Percentiles para la precipitación, la temperatura máxima y la temperatura mínima obtenidos con las bases de datos seleccionadas en el periodo 1979-1996.	164
Cuadro 6.3.	Coeficiente de Nash Sutcliffe para las simulaciones hidrológicas diarias obtenido con los datos meteorológicos seleccionados en los periodos de calibración (Cal.) y validación (Val.).	166
Cuadro 7.1.	Características de computo básico	182
Cuadro 7.2.	Características de cómputo remoto	182
Cuadro 7.3.	Características de computo actual	183
Cuadro 7.4.	Tiempo de ejecución con distintas características	183
Cuadro 8.1.	Características de las series de temperatura.	211
Cuadro 8.2.	Promedio de temperatura de las series disponibles.	215
Cuadro 8.3.	Resultado de los coeficientes de correlación entre los índices MEI y ONI con las series suavizadas de la anomalía de la temperatura promedio, máxima y mínima	217
Cuadro 9.1.	Resultados de cada uno de los puntos, expresado en IMECAS.	230
Cuadro 9.2.	Interpretación del IMECA. Fuente: Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (2011).	230
Cuadro 10.1.	Zonificación de las secciones electorales por ciudades	250
Cuadro 10.2.	Condiciones ambientales según tipo de escenario de cambio climático en las ciudades.	259
Cuadro 10.3.	Grados de vulnerabilidad urbana por ciclones tropicales por subíndices de cambio climático en las secciones electorales de las ciudades.	261

Cuadro 11.1.	Anomalía mensual del índice y fase del ENSO por ciclo de producción.	281
Cuadro 11.2.	Influencia del ENSO sobre la meteorología de siembra a floración.	284
Cuadro 11.3.	Influencia del ENSO sobre la meteorología de siembra a cosecha.	285
Cuadro 11.4.	Influencia del ENSO sobre el rendimiento por ciclo vegetativo.	286
Cuadro 11.5.	Comportamiento de las variables evaluadas según fase del ENSO.	288
Cuadro 12.1.	Características físicas y socioeconómicas de las localidades La Antigua y Nicolás Blanco.	301
Cuadro 12.2.	Variables y criterios utilizados para el cálculo de cada tipo de vulnerabilidad.	303
Cuadro 12.3.	Criterios de vulnerabilidad evaluados para las localidades de La Antigua y Nicolás Blanco.	307
Cuadro 12.4.	Índice de vulnerabilidad por tipo y global para las localidades de La Antigua y Nicolás Blanco.	308
Cuadro 14.1.	Tipos de bajos susceptibles a la inundación	339
Cuadro 15.1.	Valores medios de los parámetros por uso de suelo, para una resolución de pixel de 300 x 300m. Fuente: González (2015)	364
Cuadro 15.2.	Análisis de sensibilidad comparando el gasto máximo del evento del 1 de septiembre de 2015 en la microcuenca San José.	365
Cuadro 15.3.	Análisis de sensibilidad comparando el gasto máximo del evento del 1 de septiembre de 2015 en la microcuenca San José	366
Cuadro 15.4.	Comparacion de gasto pico bajo diferentes tamaños de pixel en la Microcuenca San José.	369
Cuadro 15.5.	Resumen de incremento del escurrimiento por km^2 para la microcuenca San José	377
Cuadro 16.1.	Población a través de la historia en Payo Obispo, Quintana Roo (1902 a 2015)	386
Cuadro 16.2.	Huracanes y tormentas tropicales. Estado de Quintana Roo. 1916 y 2014	390
Cuadro 16.3.	Precipitaciones totales anuales de 1953 a 2014	394
Cuadro 17.1.	Categorías para cada rango de valores (Hallack, 2011).	412
Cuadro 17.2.	Crecimiento de casas vinícolas en el Valle de Guadalupe durante el periodo 2004-2017. Fuente: Elaboración propia.	414
Cuadro 17.3.	Área en hectáreas de los principales tipos de cultivo en el Valle de Guadalupe en los últimos 4 años. Fuente: Elaboración propia a partir de datos otorgados por SEFOA.	415
Cuadro 17.4.	Valores NDVI obtenidos para los cultivos en 2010. Fuente: Elaboración propia	417
Cuadro 17.5.	Clasificación generada para los cultivos de VG durante primavera y verano. Fuente: Elaboración propia	418
Cuadro 17.6.	Datos NDVI T promedio para el periodo 2006-2016, clasificados según la propuesta generada para VG. Fuente: elaboración propia.	419



http://www.redesclim.org.mx/

REDESCLIM

IMTA
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua