



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

Análisis de la resiliencia de la selva tropical ante los efectos e interacciones de eventos hidrometeorológicos extremos

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTA

ALUMNO: GABRIEL SÁNCHEZ RIVERA

DIRECTOR DE TESIS

Oscar Frausto Martínez

ASESORES

Adrián Cervantes Martínez

Alejandro Collantes Chávez-Costa

Martha Angélica Gutiérrez Aguirre

Leticia Gómez Mendoza

Ángel Refugio Terán Cuevas

Julio Cesar Morales Hernández



COZUMEL QUINTANA ROO, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

DIVISIÓN DE DESARROLLO SUSTENTABLE

TESIS ELABORADA BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE TESIS DEL PROGRAMA DE DOCTORADO Y APROBADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN DESARROLLO SOSTENIBLE

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR: _____

Oscar Frausto Martínez

ASESOR: _____

Adrián Cervantes Martínez

ASESOR: _____

Alejandro Collantes Chávez-Costa

ASESOR: _____

Martha Angélica Gutiérrez Aguirre

ASESOR: _____

Leticia Gómez Mendoza

ASESOR: _____

Ángel Refugio Terán Cuevas

ASESOR: _____

Julio Cesar Morales Hernández



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Estado de Quintana Roo (UAEQRoo) por abrir sus puertas para fortalecer mi formación académica y docente.

A la División de Desarrollo Sostenible de la Unidad Académica Cozumel por el apoyo recibido durante los estudios doctorales en Desarrollo Sostenible.

A los asesores que dedicaron horas de su tiempo para revisar y emitir las sugerencias y recomendaciones que permitieron enriquecer y consolidar el proyecto de tesis, así como las publicaciones de ellas derivadas.

Un agradecimiento muy especial a la Dra. Leticia Gómez Mendoza por la dedicación y cariño profesional con que me ha acompañado para culminar este proyecto, cuya idea de gesto desde los estudios de maestría. Así como al Dr. Adrián Cervantes Martínez, quien ha sido un impulsor y apoyo en mi desarrollo académico y docente dentro de la UQRoo.

Al Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez, quien desde la licenciatura no ha dejado de ser un mentor, y quien con sus altos valores éticos como docente, a través de sus consejos y sugerencias ha impulsado mi consolidación como geógrafo.

Al Dr. Armando Rendón Corona, por compartir su experiencia académica y docente, al tiempo de fungir como mecenas de esta aventura.

Y a todos con quienes he compartido y cruzado ideas, las cuales finalmente se ven materializadas en este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la Beca CONACYT (597620) para la realización de los estudios doctorales.

Fructificar la razón: trascender nuestra cultura

Gabriel Sánchez Rivera. 2022

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
ÍNDICE DE CUADROS	III
ÍNDICE DE ECUACIONES	IV
ANEXOS	IV
RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.	11
I.1. DESARROLLO SOSTENIBLE / SUSTENTABLE	11
I.2. CAMBIO CLIMÁTICO Y CALENTAMIENTO GLOBAL	14
I.3. PERTURBACIÓN, DEGRADACIÓN, RECUPERACIÓN Y RESTAURACIÓN	19
I.4. RESILIENCIA.....	24
I.5. EVENTOS EXTREMOS	29
I.6. EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS	31
a. <i>Ciclones tropicales</i>	31
b. <i>Lluvias y sequía</i>	37
c. <i>Incendios forestales</i>	38
d. <i>Niño-Oscilación Sur (ENSO)</i>	39
I.7. SELVA TROPICAL.....	40
I.8. ÍNDICE ESPECTRALES.....	45
a. <i>Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)</i>	45
b. <i>Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)</i>	48
c. <i>Anomalías estandarizadas</i>	50
II.1. PRIMERA FASE: REVISIÓN CRÍTICA DE INFORMACIÓN	54
a. <i>Investigación documental</i>	54
b. <i>Área de estudio</i>	56
c. <i>Adquisición y preprocesamiento de datos</i>	57
II.2. SEGUNDA FASE: EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS	58
a. <i>Ciclones tropicales</i>	58
b. <i>Lluvias y Sequías</i>	61
c. <i>Incendios forestales</i>	62
II.3. TERCERA FASE: CARACTERIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN DE TIPO SELVA.....	62
II.4. CUARTA FASE: RESILIENCIA DE LA VEGETACIÓN	63
a. <i>Modelo teórico bivariado</i>	64
b. <i>Modelo Land-Trendr (LT-GEE)</i>	68
c. <i>Determinación de “Unidades Básicas de Análisis Espacial” (UBAE’s)</i>	69
II.5. QUINTA FASE: INTEGRACIÓN DEL INFORME FINAL	70
III.1. CARACTERIZACIÓN DE EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS	72
a. <i>Ciclones tropicales extremos</i>	72
b. <i>Lluvias y sequías extremas</i>	85
c. <i>Incendios forestales</i>	92
III.2. CARACTERIZACIÓN DE LA SELVA TROPICAL.....	93
III.3. ESTIMACIÓN DE LA RESILIENCIA DE LA SELVA TROPICAL	97
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN	109

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....	115
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RESILIENCIA POR UBAE	149
<i>a. Selva mediana caducifolia y subcaducifolia.</i>	<i>149</i>
<i>b. selva mediana subperennifolia.....</i>	<i>154</i>
<i>c. selva baja caducifolia y subcaducifolia.....</i>	<i>159</i>
<i>d. selva baja subperennifolia.....</i>	<i>164</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: MARCO DE RESILIENCIA COMO COMPONENTE DE LA SOSTENIBILIDAD	13
FIGURA 2: ZONA DE IMPACTO DEFINIDA POR EL CENTRO NACIONAL DE HURACANES (NHC)	33
FIGURA 3: CAMPO DE VIENTOS DE UN CICLÓN TROPICAL. FUENTE JIMÉNEZ ET AL. (2003)	33
FIGURA 4: LOCALIZACIÓN DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN Y TRAYECTORIA DE CICLONES 2000-2012.....	35
FIGURA 5: REGIONES DE EL NIÑO.	40
FIGURA 6: DISTRIBUCIÓN DE LAS SELVAS PERENNIFOLIAS Y CADUCIFOLIAS.	41
FIGURA 7: RELACIÓN ENTRE LAS CIENCIAS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, Y EL ANÁLISIS ESPACIAL.....	52
FIGURA 8: DIAGRAMA METODOLÓGICO GENERAL.	53
FIGURA 9: ETAPAS DEL PROCESO DE REVISIÓN DE LA LITERATURA	54
FIGURA 10: DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	57
FIGURA 11: REPRESENTACIÓN DEL DOMINIO DE ESTUDIO BASADO EN: EVENTOS EXTREMOS SINGULARES VS MÚLTIPLES EVENTOS EXTREMOS.	65
FIGURA 12: MODELO BIVARIADO DE RESILIENCIA (RESISTENCIA – TASA DE RECUPERACIÓN) ASOCIADO A UN EVENTO SINGULAR... 66	66
FIGURA 13: DIAGRAMA DEL MODELO BIVARIADO DE RESILIENCIA (RESISTENCIA-RESILIENCIA). ADAPTADO DE NIMMO ET AL. (2015).....	67
FIGURA 14: ESQUEMA DEL PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA LA DELIMITACIÓN DE LAS UBAE’S.	70
FIGURA 15: INTENSIDAD DE CICLONES AGRUPADOS POR CATEGORÍAS DE ACUERDO CON LA ESCALA SAFFIR-SIMPSON POR DÉCADAS EN EL PERÍODO 1851-2019, DONDE: A) LÍNEA COLOR VERDE, REPRESENTA LA SUMA DE LOS CICLONES QUE NO ALCANZAN LA CATEGORÍA DE HURACÁN; LÍNEA AMARILLA SUMA DE LOS HURACANES CATEGORÍAS 1, 2 Y 3; LÍNEA ROJA SUMA DE HURACANES CATEGORÍAS 4 Y 5; Y LÍNEA NEGRA PUNTEADA, SUMA TOTAL DE CICLONES. B) EQUIVALENTE A -A)-, PERO REPRESENTANDO EL PORCENTAJE CON RESPECTO AL TOTAL DE CICLONES REPORTADOS POR DÉCADA.	72
FIGURA 16: ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN ANUAL Y TENDENCIA LINEAL EN EL ATLÁNTICO NORTE: A) NÚMERO E INTENSIDAD (CATEGORÍA SS) DE CICLONES; B) VELOCIDAD DE VIENTOS MÁXIMOS SOSTENIDOS Y MÍNIMA PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	74
FIGURA 17: TRAYECTORIAS DE LOS CICLONES TROPICALES CLASIFICADOS POR ZONA DE IMPACTO. A) NO IMPACTARON TIERRA; B) IMPACTARON TIERRAS CONTINENTALES E INSULARES; C) IMPACTARON TIERRAS MEXICANAS; Y D) IMPACTARON LA PENÍNSULA DE YUCATÁN.	75
FIGURA 18: RESUMEN ESTADÍSTICO (HISTOGRAMA Y DIAGRAMA DE CAJAS): A) VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTOS SOSTENIDOS [KM/H]; B) MÍNIMA PRESIÓN ATMOSFÉRICA [MB].	77
FIGURA 19: FUNCIÓN DE PROBABILIDAD: A) VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTOS SOSTENIDOS [KM/H]; B) MÍNIMA PRESIÓN ATMOSFÉRICA [MB].	77
FIGURA 20: CICLONES EXTREMOS EN EL ATLÁNTICO NORTE POR UMBRALES, POR VARIABLE DE ANÁLISIS.	78
FIGURA 21: TRAYECTORIAS DE LOS CICLONES QUE EXCEDEN LOS UMBRALES POR VARIABLE: A) ≥ 90.0 Y < 99.0 ; B) ≥ 99.0 Y < 99.9 ; C) ≥ 99.9 ; D) ≤ 10.0 Y > 1.0 ; E) ≤ 1.0 Y > 0.1 ; Y F) ≤ 0.1	78
FIGURA 22: NÚMERO DE CICLONES EXTREMOS POR COMBINACIÓN DE UMBRALES DE REFERENCIA.	79
FIGURA 23: COMPARACIÓN ENTRE LA REGRESIÓN LINEAL Y LOS DIAGRAMAS DE CAJA PARA LAS VARIABLES “VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTOS SOSTENIDOS” VS “LA MÍNIMA PRESIÓN ATMOSFÉRICA”.	80

FIGURA 24: TRAYECTORIAS DE LOS CICLONES EN EL ATLÁNTICO NORTE, EN EL PERÍODO 1851- 2019, CATEGORIZADOS COMO EVENTOS EXTREMOS POR EXCEDER LOS UMBRALES SELECCIONADOS PARA: A) AMBAS VARIABLES; Y B) EN UNA SOLA VARIABLE.....	82
FIGURA 25: TRAYECTORIAS DE LOS CICLONES QUE IMPACTARON LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, EN EL PERÍODO 1851- 2019, CATEGORIZADOS COMO EVENTOS EXTREMOS POR EXCEDER LOS UMBRALES SELECCIONADOS PARA: A) AMBAS VARIABLES; Y B) EN UNA SOLA VARIABLE.	84
FIGURA 26: LLUVIA PROMEDIO [MM/DÍA] PARA EL PERÍODO 2000-2020.....	85
FIGURA 27: HISTOGRAMA DE FRECUENCIAS DE LLUVIA PROMEDIO MENSUAL [MM/DÍA] PARA EL PERÍODO 2000-2020.	86
FIGURA 28: LLUVIA PROMEDIO POR TEMPORADA [MM/DÍA] PARA EL PERÍODO 2000-2020. A) JUNIO, JULIO Y AGOSTO (JJA), B) SEPTIEMBRE, OCTUBRE Y NOVIEMBRE (SON), C) DICIEMBRE, ENERO, FEBRERO (DEF), D) MARZO, ABRIL Y MAYO (MAM).	86
FIGURA 29: LLUVIA PROMEDIO [MM/DÍA] PARA EL PERÍODO 2000-2020.....	87
FIGURA 30: LLUVIA ACUMULADA [MM] PARA EL PERÍODO 2000-2020.	87
FIGURA 31: LLUVIA ACUMULADA POR EVENTO CICLÓNICO [DÍAS/EVENTO], 2000 – 2020.	87
FIGURA 32: LLUVIA PROMEDIO, MÍNIMO, MÁXIMO Y ACUMULADO MENSUAL PARA EL PERÍODO 2000-2020.....	88
FIGURA 33: DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE LLUVIA MEDIA POR MES/AÑO DURANTE LAS TEMPORADAS DE HURACANES 2000 A 2020.	90
FIGURA 34: DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE LLUVIA MEDIA POR MES DURANTE LAS TEMPORADAS DE HURACANES 2000 A 2020.	91
FIGURA 35: DIAGRAMA COMPARATIVO ENTRE CICLONES TROPICALES, LLUVIA MENSUAL ACUMULADA, SPI-3M Y ONI. 1990 – 2020.	91
FIGURA 36: A) DIAGRAMA DE INTENSIDAD DE EVENTOS REGISTRADOS; B) SERIES DE TIEMPO MENSUALES PARA LOS DIEZ AÑOS CON LOS MÁXIMOS EVENTOS REGISTRADOS ANUALMENTE.	92
FIGURA 37: DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE PUNTOS DE CALOR DURANTE EL PERÍODO 2001-2020.	93
FIGURA 38: DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN	94
FIGURA 39: CAMBIOS EN SUPERFICIE POR CLASES DE USV ENTRE LAS SERIES II2.5 Y VI.5.	96
FIGURA 40: ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE CAMBIO 2020-2020.....	97
FIGURA 41: CAMBIOS EN SUPERFICIE POR CLASES DE USV ENTRE LAS SERIES II2.5 Y VI.5.	98
FIGURA 42: LOCALIZACIÓN DE LAS UBAE'S POR TIPO DE VEGETACIÓN.	99
FIGURA 43: DIAGRAMA DEL MODELO BIVARIADO RESISTENCIA-RESILIENCIA POR UBAE POR TIPO DE VEGETACIÓN.	101
FIGURA 44: RESULTADOS DEL MODELO DE RESILIENCIA PARA LA UBAE: SM-CSC_1.	105
FIGURA 45: RESULTADOS DEL MODELO DE RESILIENCIA PARA LA UBAE: SM-SP_1.....	106
FIGURA 46: RESULTADOS DEL MODELO DE RESILIENCIA PARA LA UBAE: SB-CSC_1.....	107
FIGURA 47: RESULTADOS DEL MODELO DE RESILIENCIA PARA LA UBAE: SB-SP_1.....	108

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1: RELACIÓN ENTRE LOS ODS Y LOS OBJETIVOS DE LA REDD+	14
CUADRO 2: VARIACIÓN DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN ESPERADAS PARA EL ESTADO DE QUINTANA ROO.....	19
CUADRO 3: TEMAS PRINCIPALES PARA LA EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN	24
CUADRO 4: RELACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS Y VARIABLES DE RESPUESTA Y EFECTO.	30
CUADRO 5: CRITERIOS PRINCIPALES PARA LA IDENTIFICACIÓN DE UN "EVENTO EXTREMO" Y DEFINICIONES RELACIONADAS.....	31
CUADRO 6: ESCALA DE DAÑO POTENCIAL SAFFIR-SIMPSON DE LOS CICLONES TROPICALES	32
CUADRO 7: CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE NORMALIZADO DE PRECIPITACIÓN.....	49
CUADRO 8: CLASIFICACIÓN DE LA SEQUÍA DE ACUERDO A VALORES DE SPI.	49
CUADRO 9: CONCEPTOS Y EJEMPLOS DE AUTORES CONSULTADOS	55
CUADRO 10: NÚMERO DE CICLONES POR CATEGORÍA Y ZONA DE IMPACTO EN EL PERÍODO 1851 – 2019.....	75
CUADRO 11: RESULTADOS DE LA ESTADÍSTICA BÁSICA DESCRIPTIVA POR VARIABLE.....	76

CUADRO 12: PORCENTAJES RELATIVOS PARA EL TOTAL DE CICLONES CATALOGADOS COMO EXTREMOS POR ESCENARIO.....	80
CUADRO 13: NÚMERO DE CICLONES POR COMBINACIÓN DE UMBRALES DE REFERENCIA Y ZONA DE IMPACTO.....	81
CUADRO 14: LISTADO DE CICLONES CLASIFICADOS POR COMBINACIÓN DE PERCENTILES [%] POR VARIABLE.....	81
CUADRO 15: NÚMERO DE CICLONES EXTREMOS POR COMBINACIÓN DE UMBRALES DE REFERENCIA.....	83
CUADRO 16: CICLONES QUE IMPACTARON LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, DENTRO DE LOS UMBRALES INDICADOS POR EL IPCC, CAMUFFO ET AL. Y EL ÍNDICE DE REFERENCIA EXTREMO PROPUESTO.	84
CUADRO 17: LLUVIA MEDIA MENSUAL PARA LAS TEMPORADAS DE HURACANES 2000 A 2020	89
CUADRO 18: RECLASIFICACIÓN DE USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN	94
CUADRO 19: MATRIZ DE CAMBIOS DE USOS DE SUELO Y VEGETACIÓN	95
CUADRO 20: RESULTADOS DEL MODELO BIVARIADO RESISTENCIA-RESILIENCIA POR UBAE.....	100

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: DETERMINACIÓN DEL NDVI.....	47
ECUACIÓN 2: DETERMINACIÓN DEL SPI	49
ECUACIÓN 3: DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	50
ECUACIÓN 4: TASA DE DEFORESTACIÓN	63
ECUACIÓN 5: RESISTENCIA.	66
ECUACIÓN 6: TASA DE RECUPERACIÓN.....	66
ECUACIÓN 7: ÍNDICE DE RESILIENCIA.....	67
ECUACIÓN 8: DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON	69

ANEXOS

ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE RESILIENCIA POR UBAE.....	149
---	-----

RESUMEN

Como consecuencia del calentamiento global, los sistemas climáticos se han visto alterados, provocando el aumento en número e intensidad de fenómenos meteorológicos severos, lo que ha puesto en riesgo a los sistemas naturales y sociales más vulnerables. En el caso de la península de Yucatán, se evidencia en el incremento de registros por encima del promedio máximo, de temperaturas durante las temporadas de estiaje, lluvias torrenciales durante la época de lluvia, daños a los ecosistemas costeros y marinos, como es el caso del arrecife de coral, manglares y erosión costera. La selva tropical por su parte, en combinación con los efectos derivados del cambio climático, enfrenta una serie de presiones asociadas a la deforestación, cambios de uso de suelo, agricultura, ganadería, tala inmoderada, incendios provocados, entre otros, y cuyas consecuencias se ven reflejadas en la disrupción de la capacidad de las selvas como reservorios y sumideros de carbono.

Existen diversos estudios tendientes a identificar y estimar el impacto económico y los daños a la infraestructura (medios de producción) y a los sistemas forestales, provocados por ciclones de alta intensidad, sin embargo, estos estudios abordan el análisis de las perturbaciones provocadas por un evento individual y no proporcionan información acerca de los efectos ocasionados por la interacción de múltiples perturbaciones extremas (naturales y/o antrópicas) ocurridas previa y posterior al impacto de un ciclón tropical de alta intensidad, por lo que el objetivo del estudio consistió en efectuar un análisis de la capacidad de resiliencia de la vegetación de tipo selva del norte de la península de Yucatán, ante los efectos e interacciones de eventos hidrometeorológicos en categoría de extremos ocurridos en el periodo 2001-2020.

El proyecto se llevó al cabo en el marco del “desarrollo sustentable”, tomando como base técnica las ciencias de la información geográfica (SIGc), las cuales incorporan a los “Sistemas de Información Geográfica” y el “Análisis Espacial”. Para identificar el grado de resiliencia de la vegetación de tipo selva, se determinaron cuatro categorías: selva tropical baja y mediana (subperennifolia y caducifolia/subcaducifolia). Se utilizaron como datos base el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI por sus siglas en inglés), y se aplicó un modelo bivariado de resistencia y tasa de recuperación, con el que se estimó un índice

de resiliencia para 20 unidades básicas de análisis espacial (UBAE's). La identificación de cada tipo de perturbación en categoría de extrema, se realizó a través de productos derivados de satélite, clasificando los valores obtenidos mediante la técnica estadística "Excedente a un umbral relativo". Los hallazgos muestran que los sistemas forestales se encuentran fuertemente adaptados a la ocurrencia de fenómenos naturales en intensos y en categoría de extremos, siendo las principales amenazas las relacionadas con las actividades antrópicas, como lo indican diversos estudios presentes en la literatura científica.

Los resultados del estudio proveen información que puede coadyuvar con los esfuerzos de protección y conservación de los recursos forestales de región y el cumplimiento de los "Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)" de la agenda 2030, así como de la iniciativa para la "reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques (REDD+)".

PALABRAS CLAVE

Resiliencia ecológica, eventos extremos, selva tropical, anomalías NDVI, Google Earth Engine.

INTRODUCCIÓN

Ante el aumento de la pérdida de biodiversidad y la fragilidad de los ecosistemas frente al impacto de diversos eventos extremos de carácter natural y antrópico (Seiler & Vianco, 2017), aunado a los efectos provocados por el inminente cambio climático global, el cual representa una amenaza emergente para la persistencia y el funcionamiento de los ecosistemas tropicales (Murray-Tortarolo et al., 2016), el tema del Desarrollo Sostenible ha tomado particular importancia como modelo para garantizar la conservación de los recursos naturales y los servicios ecosistémicos que de ellos se obtienen (Gudynas, 2004). De manera paralela, el término "resiliencia" es cada vez más utilizado en diversos contextos, entre los que se incluyen la resistencia física, psicológica, ecológica y social (Saunders & Becker, 2015), sin embargo, la resiliencia y la sostenibilidad son a menudo abordados como dos temas separados, lo que ha llevado a un predominio de la

sostenibilidad sobre la resiliencia, derivando en una preocupación creciente por integrar ambos conceptos, de forma que ello permita garantizar que los componentes ambientales, económicos y sociales sean tanto resilientes como sostenibles (Achour et al., 2014).

De acuerdo con Anderies, Folke, Walker, y Ostrom (2013), la sostenibilidad proporciona los objetivos de un sistema y la resiliencia provee los conceptos para dar cumplimiento con tales objetivos. Es decir, la sostenibilidad prioriza los resultados deseados, mientras que la resiliencia los procesos para alcanzar tales resultados (Bocchini et al., 2014; Park et al., 2013; Redman, 2014). Por lo que, el estudio propuesto consideró para su realización un marco de integración de la resiliencia como un componente del desarrollo sostenible.

Muchos ecosistemas se encuentran expuestos a sufrir perturbaciones ocasionadas por la interacción de múltiples eventos extremos de carácter natural y antrópico, las cuales tienen implicaciones directas sobre la capacidad de resistencia y tasa de recuperación de los sistemas forestales, por lo que, ante un determinado evento hidrometeorológico extremo, estas capacidades pueden amplificarse o disminuir según los procesos derivados del impacto de distintos sucesos extremos ocurridos previo o posterior al evento (Nimmo et al., 2015).

Gran parte del conocimiento de las capacidades de resiliencia de los ecosistemas se tiene a partir del estudio de perturbaciones provocadas por eventos singulares (Buma & Wessman, 2011), es decir, la mayoría de las investigaciones son anecdóticas ya que se basan en datos no experimentales que contemplan únicamente un suceso (van de Pol et al., 2017).

Estudios realizados en las selvas tropicales, sugieren que estos ecosistemas se encuentran altamente adaptados o presentan una alta resistencia a los cambios estacionales provocados por eventos climáticos o antropogénicos recurrentes (Jimenez-Rodríguez et al., 2018; Kennard et al., 2002; Paz et al., 2018). Sin embargo, Cole, Bhagwat, y Willis (2014), reportaron en sus resultados, diferencias significativas en las tasas de recuperación de la vegetación (en términos de la velocidad y el grado en que esta unidad

ecológica recupera su capacidad de crecimiento con relación a la existente previo al evento perturbador evaluado), las cuales sugieren que la capacidad de respuesta del ecosistema es más rápida después de perturbaciones naturales, como es el caso de huracanes, que, en comparación con perturbaciones de origen antrópico, como son los incendios provocados, en los cuales se presentaron tasas de recuperación más lentas.

Turner (2010) destaca que es necesario un mayor estudio de las perturbaciones provocadas por la interacción de múltiples eventos extremos (naturales y/o antrópicos), especialmente cuando los efectos por la combinación estos puedan exceder la resistencia ecológica de un ecosistema.

Moreno-Mateos et al. (2017), manifiestan que los resultados de su estudio, sugieren que los ecosistemas recuperados y restaurados tienen menos abundancia, diversidad, así como, disminución de los ciclos de carbono y nitrógeno, que los ecosistemas no impactados (intactos). Incluso en el caso de los primeros, de alcanzarse la recuperación completa, los sistemas acumularán una deuda de recobro provisional, pudiendo tener consecuencias a largo plazo que afecta la resiliencia de los ecosistemas (Johnstone et al., 2016), por tal motivo, Moreno-Mateos et al. (2017) afirman que acrecentar la cantidad de ecosistemas menos funcionales a través de la restauración ecológica y la compensación, son alternativas inadecuadas a la protección de los ecosistemas.

Comprender cómo responden y se adaptan los ecosistemas forestales ante las perturbaciones provocadas por múltiples eventos extremos que interactúan en diferentes escalas espacio-temporales y ante diferentes esquemas de uso y manejo, resulta fundamental para la conservación y manejo forestal en las próximas décadas (Lazos-Chavero et al., 2018; Martínez-Yrizar et al., 2018).

Existen diversos estudios tendientes a identificar y estimar el impacto económico y los daños provocados por ciclones de alta intensidad, tanto a la infraestructura (medios de producción), como a los sistemas forestales, sin embargo, estos estudios se centran en sucesos individuales y no proporcionan información acerca de los efectos ocasionados por

la interacción de múltiples eventos extremos naturales y antrópico, ocurridos previo y posterior al impacto de un ciclón de alta intensidad (Buma & Wessman, 2011).

Bhaskar et al. (2018) señalan que la interacción potencial entre los tipos de perturbación provocadas por múltiples eventos naturales y antropogénicos no se ha incorporado explícitamente en un marco bivariado de resiliencia (Hodgson et al., 2015; Nimmo et al., 2015).

En el caso de la península de Yucatán, no se han identificado estudios que aborden el estudio de múltiples perturbaciones sobre la vegetación, las cuales tienen la capacidad de crear situaciones nuevas con impactos potenciales en la resiliencia del ecosistema, promoviendo la aparición de nuevos estados alternos cuando la resistencia ecológica de un sistema se ve superada (Buma & Wessman, 2011).

Tampoco se localizaron, para el caso de la selva tropical de la península de Yucatán, estudios que aborden los efectos de múltiples sucesos en categoría de extremos sobre la vegetación, bajo un marco de resiliencia bivariado basado en la consideración conjunta de la resistencia y la recuperación. Por lo que, destaca la falta de un análisis integral de la interacción de los efectos provocados por uno o varios eventos hidrometeorológicos extremos (ciclones, lluvias, sequías, incendios forestales, entre otros) ocurridos en ubicaciones coincidentes y distintos estadios temporales.

Derivado de lo anterior se plantea la siguiente **pregunta** ¿Cuál es la capacidad de resiliencia de la selva tropical baja y mediana (subperennifolia y caducifolia/subcaducifolia), y los efectos resultantes de la interacción de múltiples eventos hidrometeorológicos extremos ocurridos en la península de Yucatán, en el período 2001 – 2020, medidos en términos de la actividad fotosintética (verdor) y los cambios en la cobertura espacio-temporal, a través de un modelo bivariado de resistencia y tasa de recuperación?

Para dar respuesta a la pregunta de investigación se parte de las siguientes **hipótesis**: a) la capacidad de resiliencia de la vegetación de tipo selva de la península de Yucatán ante el impacto de huracanes catalogados como extremos, presenta variaciones en función de la ocurrencia previa y posterior de diversas perturbaciones

hidrometeorológicas extremas; b) la relación entre la resistencia y la tasa de recuperación ante cada evento extremo identificado, presentan una correlación inversa, es decir, a mayor capacidad de resistencia de la vegetación de tipo selva, menor será la tasa de recuperación, por el contrario, a menor capacidad de resistencia, el sistema requerirá de mayores tiempos de recuperación (tasa de recuperación). (i: $> \text{Resistencia} = < \text{tasa de recuperación}$; ii: $< \text{Resistencia} = > \text{tasa de recuperación}$); c) a menor exposición a múltiples eventos intensos, la capacidad de resiliencia de la vegetación de tipo selva, será mayor ante el impacto de eventos hidrometeorológicos extremos; y d) es posible estimar la capacidad de resiliencia de la vegetación a partir del análisis de series temporales derivadas de productos de percepción remota, como son imágenes satelitales, medida en términos de la actividad fotosintética (vigorosidad).

El **objetivo general** del estudio consistió en generar un análisis integral de la resiliencia de la selva tropical del norte de la península de Yucatán, que considere y permita determinar los efectos e interacciones provocados por múltiples eventos hidrometeorológicos extremos suscitados durante el periodo 2001 – 2020, a través de la aplicación de un *modelo bivariado de resiliencia* para la cuantificación de las áreas afectadas por cada tipo de evento extremo identificado, mediante el uso e implementación de técnicas de percepción remota como son el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI por sus siglas en inglés) y modelos espaciales de estadística multivariada. Los cuales permiten la estimación de las tasas de cambio previas y posteriores asociadas a cada evento perturbador extremo, en términos de la vigorosidad de la vegetación (actividad fotosintética).

Para cumplir con el objetivo general se establecieron los siguientes objetivos particulares:

1. Caracterizar los eventos ciclónicos extremos que han impactado la península de Yucatán, tomando como criterios los registros de su intensidad, velocidad del viento y presión atmosférica, mediante las técnicas estadísticas recomendadas por *Camuffo et al. (2018)*.
2. Estimar las perturbaciones hidrometeorológicas extremas (tipo de evento, localización geográfica, frecuencia, duración e intensidad) ocurridas en el período 2001 – 2020,

dentro del área de estudio, a través del uso de imágenes derivadas de productos de percepción remota y bases de datos climáticas.

3. Caracterizar la vegetación de tipo selva de la península de Yucatán, presente en la zona de estudio en el período 2001 – 2020, estimado las tasas de cambio espacio-temporal para las coberturas baja y mediana (subperennifolia y caducifolia / subcaducifolia), tomando como base las capas de Uso de Suelo y Vegetación (USV) de las series I a VI, elaboradas por INEGI.
4. Estimar la capacidad de resistencia y tasa de recuperación de la vegetación de tipo selva baja y mediana (subperennifolia y caducifolia/subcaducifolia) y los efectos sobre ella, medidos en términos de la actividad fotosintética, estimada a partir del Índice Normalizado de Vegetación (NDVI) dentro de la zona de estudio para el periodo 2021 – 2020.

Para alcanzar los “*Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*” de la agenda 2030 (ONU, 2016) y los de la iniciativa para la “*Reducción de las Emisiones Derivadas de la Deforestación y la Degradación de los Bosques (REDD+)*”, (Bastos Lima et al., 2017) , por la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio climático (UNFCCC)*, es necesario entender la respuesta de la vegetación de tipo selva de la península de Yucatán ante el impacto de diversos tipos de eventos hidrometeorológicos intensos y los efectos resultantes de su interacción. Lo anterior cobra mayor importancia debido a que como consecuencia del calentamiento global, los escenarios actuales, indican un aumento en la cantidad e intensidad de huracanes y de eventos climáticos extremos (Walsh et al., 2016).

Los hallazgos del estudio permitirán aumentar el nivel de comprensión de las capacidades de respuesta (resistencia y recuperación) de la vegetación de tipo selva ante la exposición a tales fenómenos perturbadores. Los resultados ofrecen un modelo que permite la identificación, jerarquización y toma de decisiones para establecer “sitios o zona prioritarias de atención” en función de diversas dimensiones:

Ámbito ambiental: la metodología utilizada permite identificar zonas para realizar investigaciones adicionales tendientes a comprender los efectos que pudieran haber alterado el flujo de especies, nutrientes, energía o materiales, de tal forma que

interrumpan el funcionamiento de los ecosistemas en la región (Sloan, 2008), o incluso la disminución o peligro de extinción de especies (Wroe et al., 2006), particularmente en aquellas áreas donde los ecosistemas alcanzan un nivel tal, en el que ciertos atributos valiosos adquieren un estado en el cual se empobrecen o disipan (Ghazoul & Chazdon, 2017).

Ámbito económico: se pueden identificar áreas prioritarias para realizar estudios puntuales que permitan verificar las condiciones de recuperación de los ecosistemas tras los efectos ocasionados por múltiples perturbaciones extremas, y en su caso, invertir en proyectos que favorezcan la protección y restauración de zonas destinadas a mejorar la resistencia o la capacidad de recuperación de las selvas.

Ámbito político-social: a través de la identificación de “zonas prioritarias de atención”, los resultados obtenidos pueden fungir como insumos para:

- Realizar estudios tendientes a la evaluación de la vulnerabilidad de la selva tropical ante eventos climatológicos extremos.
- Mejorar el diseño de instrumentos para la adaptación frente al cambio climático (Paz et al., 2018), los cuales podrán ser incorporados a través de instrumentos de política ambiental, como son planes de desarrollo urbano y ambiental, ordenamientos territoriales, atlas de riesgos, entre otros.
- Desarrollar estrategias y el diseño de mecanismos de adaptación para fortalecer las capacidades de resiliencia de la selva tropical frente a eventos extremos en función de las necesidades y requerimientos de la población.
- Aportar de nuevo conocimiento para ser considerado en el diseño e implementación de nuevas políticas gubernamentales, que favorezcan y salvaguarden a la población y los medios de producción, a través de la protección y restauración de los ecosistemas de selva tropical de la península.
- Enriquecer los estudios de los sistemas costeros de la península, debido a las características hidrológicas de esta, la cual está conformada por una intrincada red subterránea que interconecta los diversos ecosistemas que abarcan desde el interior (tierra adentro) hacia la costa, a través de conductos transversales (Corredor costero

transversal) por los cuales se da un complejo proceso de intercambio de energía y materiales (Hernández-Arana et al., 2015).

La Implementación de técnicas de teledetección que permitan cubrir grandes extensiones territoriales, para el análisis de extensas series de tiempo, representan un potencial ahorro en tiempos y costos de desarrollo de estudios y proyectos (Yengoh et al., 2016), facilitando la toma de decisiones sobre la selección de sitios o zonas prioritarias para su atención e inversión.

El estudio es de carácter cualitativo y transversal, enmarcado en una escala regional y en el modelo teórico bivariado, propuesto por Hodgson et al. (2015) y Nimmo et al. (2015), en el cual la resiliencia se puede estudiar a partir de dos variables: "cambio de estado" (resistencia) y "tiempo de retorno" (Resiliencia), donde la resistencia está representada por la medida en que un sistema absorbe una perturbación externa y la tasa de recuperación que refleja la capacidad de retorno a condiciones equivalentes previas a tal perturbación (Bhaskar et al., 2018). Las tasas de cambio se estimaron a través del Índice Normalizado de Vegetación, aplicando técnicas de análisis espacio-temporal (series de tiempo).

La tesis se plantea desde una postura teórica que surge de la "Geografía Activa" (una Geografía Social) planteada por el Profesor Pierre Georges (George, 1975), cuyo enfoque primordial es el estudio e interpretación de los efectos de los fenómenos sobre el Espacio Geográfico y no el estudio de los fenómenos *per se*. Paralelamente, se toma como marco de referencia la definición del "desarrollo sustentable" como medio para comprender los procesos que permitan la gestión y conservación de los sistemas naturales objeto de estudio.

Lo anterior permite conciliar la postura teórica con la definición adoptada del "desarrollo sustentable", de tal manera que el principio de la "Geografía Activa" de estudiar los efectos de los fenómenos, se traduce en el medio para alcanzar los objetivos que permitan la conservación de la vegetación de tipo selva de la península de Yucatán y por ende contribuir con el conocimiento sobre las consecuencias que eventos extremos producen sobre los servicios ecosistémicos de los cuales depende el funcionamiento e

integridad de los medios de producción y de subsistencia de la sociedad que habita la región (sistemas socioecológicos).

El documento se divide en 5 **capítulos**, el *primero* muestra la revisión teórico-conceptual de los conceptos y fundamentos de resiliencia y eventos extremos por tipo. El *segundo* presenta la metodología aplicada para la caracterización de los eventos extremos considerados para la estimación y cuantificación de la resiliencia de la vegetación en el marco del modelo bivariado propuesto, se incluye también, la descripción de cada una de las fases metodológicas aplicadas para cumplir con los objetivos planteados. En el *tercero* se describe el área de estudio y sus características principales, mientras que, en el *cuarto capítulo* se muestran los resultados derivados de cada una de las fases metodológicas desarrolladas. En el *capítulo cinco* se presenta y discute el diagnóstico de los efectos provocados por los tipos de perturbación identificadas y sus interacciones sobre la vegetación de tipo selva.

Por último, un apartado donde se incluyen las conclusiones y discusión final de los resultados obtenidos, así como las proyecciones y posibles líneas de investigación que puedan derivarse a partir de los resultados exhibidos.

CAPÍTULO I. Marco teórico.

I.1. Desarrollo Sostenible / Sustentable

De acuerdo con Rivera-Hernández, Blanco-Orozco, Alcántara-Salinas, Houbron, y Pérez-Sato (2017), los términos “desarrollo sostenible”, “desarrollo sustentable”, “sostenibilidad” y “sustentabilidad” han sido y son utilizados constantemente y sin distinción en diferentes ámbitos y medios de comunicación como son:

- Publicaciones científicas de diversas áreas (economía, turismo, biología, geografía, ciencias ambientales, ciencias del desarrollo, entre otras)
- Libros académicos
- Textos gubernamentales
- Leyes y reglamentos
- Revistas y artículos de divulgación
- Periódicos
- Publicaciones en internet
- Películas
- Radio y televisión

Sin embargo, estos conceptos son utilizados indistintamente careciendo de un significado unificado, por lo que el sentido que toman depende de la concepción generalizada de los propios autores (Rivera-Hernández et al., 2017).

Derivado de lo anterior, Rivera-Hernández et al. (2017) en su estudio sobre las diferencias ontológicas y lingüísticas sobre los términos desarrollo sostenible y desarrollo sustentable, llevan a cabo un estado del arte sobre el origen y desarrollo de tales términos. De tal estudio se desprende que ambos conceptos, tomando en cuenta estrictamente el lenguaje, el léxico y la semántica, los verbos “sostener” y “sustentar” son sinónimos, sin embargo, desde el punto de vista ideológico, ambos términos responden a ideologías y posturas divergentes.

Es hacia los años 70, que se da el origen y los antecedentes de estos conceptos (Sheinbaum, 2007), como una crítica a la viabilidad de un crecimiento económico sostenido como objetivo condicionante del desarrollo, lo que origina como contra parte, el concepto de Ecodesarrollo, el cual pretendía responder a las necesidades de producción

requeridas por los países del tercer mundo a través del respeto hacia los ecosistemas, permitiendo garantizar las condiciones de habitabilidad de la Tierra (Naredo, 2004).

El término “*sustainable development*” (en inglés) es presentado en la ONU en 1987, refiriéndose al “desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.

El debate sobre las diferencias entre ambos conceptos se centra en el uso de los términos individuales “sostenibilidad” o “sustentabilidad”, eliminando el concepto de “desarrollo”, el cual, por sí mismo, conduce a una idea de cambio gradual y direccional; opuesto al concepto de “sostenibilidad”, el cual se refiere al mantenimiento de una situación existente de un estado o sistema (Gallopín, 2003).

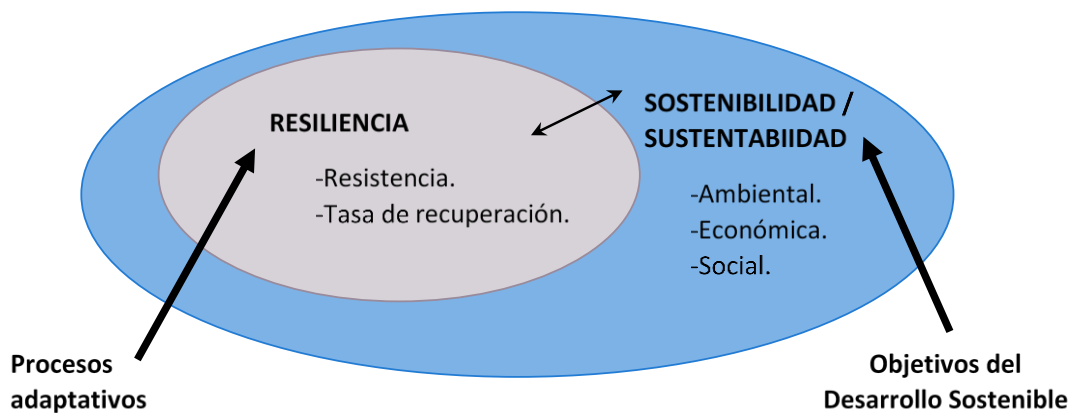
Rivera-Hernández et al. (2017) consideran que el desarrollo entendido como un crecimiento económico constante en el tiempo, omite cualquier contenido de carácter ecológico, por lo que lo sostenible sobrepone el crecimiento económico por sobre la protección del medio ambiente (Barrios et al., 2007). En contrasentido, Barkin y Dos (1998) proponen que el desarrollo sustentable reconoce la diversidad y por tanto, la sustentabilidad se torna en un esfuerzo por la diversidad ecológica y social en todas sus dimensiones, por lo que esta debe ser entendida como “un proceso, más que un conjunto de metas específicas que implica una nueva forma de relacionarse con la naturaleza, la economía y la sociedad”.

Dado que los objetivos del presente estudio no están enfocados en el desarrollo de los sistemas forestales, sino por el contrario, en la comprensión de la respuesta de éstos ante el impacto de eventos extremos, se consideran como sinónimos los términos “sostenible” y “sustentable”, asumiendo como base la definición del “desarrollo sustentable” como medio para comprender los procesos que permitan la gestión y conservación de los sistemas naturales objeto de estudio.

Para abordar el uso integrado de la sustentabilidad y la resiliencia, Marchese et al. (2018) identifican tres marcos predominantes en la literatura: 1) la resiliencia como

componente de la sustentabilidad, 2) la sustentabilidad como componente de la resiliencia y 3) la resiliencia y la sustentabilidad como tópicos independientes.

De acuerdo con Marchese et al. (2018) la resiliencia como componente de la sustentabilidad, es la relación predominante en estudios en el ámbito del manejo de recursos naturales y las ciencias de la sostenibilidad. Este marco toma como base que, a mayor capacidad de resiliencia, mayor la sostenibilidad del sistema, sin embargo, de manera inversa, mayor sostenibilidad no garantiza un sistema más resiliente, de tal forma que, ante la ausencia o poca capacidad de resiliencia, un sistema presentaría un nivel frágil de sostenibilidad (Figura 1).



Fuente: Adaptado de Saunders y Becker (2015).

Figura 1: Marco de resiliencia como componente de la sostenibilidad

En el contexto del desarrollo sostenible destacan dos iniciativas internacionales en cuyas metas se encuentran la conservación y cuidado de los recursos forestales mundiales. La primera corresponde a los “Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)” de la agenda 2030 (ONU, 2016) y la segunda a la “Reducción de las Emisiones Derivadas de la Deforestación y la Degradación de los Bosques (REDD+)” auspiciado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés), (Bastos Lima et al., 2017) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés).

Mientras los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) reflejan un compromiso político y proveen el marco normativo principal sobre medio ambiente y desarrollo hasta

2030, la iniciativa para la *Reducción de las Emisiones Derivadas de la Deforestación y la Degradación de los Bosques* (REDD+) ofrece mecanismos de financiamiento para robustecer los esfuerzos y trabajos enfocados a la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) derivados de la pérdida forestal (Loewe, 2012).

Al comparar ambas iniciativas es posible distinguir objetivos centrales, en función de los beneficios conjuntos previstos (Bastos Lima et al., 2017), (Cuadro 1).

Cuadro 1: Relación entre los ODS y los objetivos de la REDD+

ODS, Agenda 2030	Objetivos de REDD+ (incluidos en las decisiones específicas de la UNFCCC)
ODS 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.	(9 / CP.19). Reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal. Mejora de las reservas forestales de carbono. (15 / CP.19). Abordar los impulsores de la deforestación.
ODS 15. Promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y frenar la pérdida de la diversidad biológica.	(2 / CP.13). Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación en los países en desarrollo: enfoques para estimular la acción.

Fuente: Adaptado de Bastos Lima et al. (2017).

1.2. Cambio Climático y calentamiento global

El aumento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos, como es el caso de los huracanes, a consecuencia de los efectos asociados al cambio climático (CC) (Lazos-Chavero et al., 2018), pueden alterar abruptamente las sociedades y los procesos ecológicos en los ecosistemas, reconfigurando su función y dinámica (Bonilla-Moheno, 2010; Everham & Brokaw, 1996; Rittenhouse et al., 2010; Tanner et al., 1991); por lo que, el cambio climático global se considera una amenaza emergente para la persistencia y el funcionamiento de los ecosistemas tropicales (Jimenez-Rodríguez et al., 2018).

Para comprender el concepto de cambio climático, la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMNUCC) diferencia la variabilidad climática global atribuible a causas naturales tales como, modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas, entre otras, las cuales pueden persistir durante largos períodos; a diferencia de aquellos cambios derivados de las actividades antropogénicas que provocan modificaciones persistentes en la composición de la atmósfera (IPCC, 2018).

El calentamiento global (CG), entendido como la principal manifestación del cambio climático, representa a nivel planetario uno de los problemas más importantes que afronta la humanidad (IPCC, 2018; Showstack, 2009). Existen evidencias que apuntan a que las actividades antropogénicas han incidido en una acelerada modificación de la temperatura global, superándose los registros anteriores a 1850 (IPCC, 2014a).

El origen del calentamiento global antropogénico se registra a partir del auge de la Revolución Industrial, período que se caracterizó por la utilización de combustibles de origen fósil —petróleo, gas, carbón y derivados— para los procesos industriales, sin contar con un control adecuado de la emisiones generadas, lo que acarrió el aumento de las concentraciones de los principales gases denominados de efecto invernadero (GEI), como son el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), los cuales al exceder las concentraciones naturales permanecen en la atmósfera por más tiempo del normal, rompen el ciclo que permite la regulación térmica de la atmósfera y por ende los aumentos en la temperatura de la superficie terrestre y los océanos, lo que se ve acrecentado por la deforestación y los cambios de uso de suelo como resultado del crecimiento urbano, la agricultura, la ganadería y la tala inmoderada, por mencionar algunos (IPCC, 2014a).

Los impactos provocados por los cambios en el clima en los últimos decenios revelan la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos al cambio del clima (IPCC, 2014a). Evidencia de tales cambios es el aumento registrado de emisiones de CO₂ en un 40% desde la era preindustrial (IPCC, 2018), lo que provocó que la década de 2010-2019 fuese la más calurosa registrada, siendo 2019 el segundo año más caluroso de todos los tiempos (ONU, 2021). Las evidencias con que se cuenta, muestran un cambio en los sistemas meteorológicos, la presencia de eventos en categoría de extremos cada vez más

frecuentes, así como un aumento en el nivel medio del mar -0.19 cm entre 1901 y 2010— debido al derretimiento de los polos y glaciares (ONU, 2021).

Los cambios en el nivel medio del mar, aunado al desarrollo urbano en las zonas costeras, ocasionaría la degradación y pérdida de zonas de humedales, se reflejaría en mayores índices de vulnerabilidad¹ frente a fenómenos como las mareas de tormenta, al tiempo que se presentaría un incremento de la superficies susceptibles de inundación (Conde Álvarez y Gay García, 2008).

Otros casos son la evaporación potencial del suelo y cuerpos de agua continentales, acelerando los procesos involucrados en la desertificación —escasez hídrica— ampliando la superficie para las zonas áridas (Orellana et al., 2009) y generando una mayor disponibilidad de combustible vegetal para la ocurrencia de incendios forestales, resultando en extensos daños en la agricultura y la ganadería (IPCC, 2018). En los océanos, por otro lado, el aumento de la temperatura favorecería el incremento en número e intensidad de ciclones tropicales (Emanuel, 2005).

Aunado a lo anterior, se acelerarían los procesos de degradación de la tierra, erosión de suelos, pérdida de vegetación, así como el detrimento de la seguridad alimentaria, debido a la baja de rendimiento de cultivos y la inestabilidad para el suministro de alimentos, poniendo en riesgo los medios de subsistencia de las poblaciones, la infraestructura, y la salud de los ecosistemas (IPCC, 2019).

Conde Álvarez y Gay García (2008) manifiestan que, en el caso de México, las consecuencias de tales sucesos repercutirán negativamente sin distinción en las dimensiones económica, social y ambiental en un amplio espectro escalar espacio-temporal.

El *Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (IPCC, 2014a) menciona que, aproximadamente a partir de la década de los cincuenta del siglo XX se ha observado una mayor actividad relacionada con fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como son la disminución de las

¹ El (IPCC, 2014a) define vulnerabilidad como la propensión o predisposición de las personas, infraestructura o medioambiente a ser susceptibles de sufrir daños y el menoscabo a la capacidad de respuesta y adaptación.

temperaturas frías extremas, el aumento de temperaturas cálidas extremas, el aumento de lluvias intensas y la elevación de los niveles máximos del mar.

Para poder identificar los probables efectos y las consecuencias derivados del calentamiento global se han desarrollado diversos escenarios basados en modelos estadísticos avanzados, para la construcción de simulaciones de los posibles impactos, intentando con ello, determinar las tendencias y pronosticar los cambios del clima global en el mediano y largo plazo, así como las consecuencias que tales modificaciones implicarían en diversos sistemas y ámbitos económicos, sociales y ambientales (IPCC, 2018).

Los modelos desarrollados a la fecha, indican que a partir de finales del siglo XXI, un alto porcentaje del calentamiento medio global se deberá a las emisiones acumuladas de CO₂ y la continua emisión de GEI, ocasionando cambios significativos en el sistema climático, propiciando la posibilidad de ocurrencia de eventos intensos cuyas afectaciones podrán ser consideradas como graves y de consecuencias irreversibles para los ecosistemas y la población mundial (IPCC, 2014a).

Si bien las alteraciones climáticas de origen antropogénico no son reversibles, es posible atender las consecuencias inherentes a través de la adopción de estrategias en dos vertientes: *mitigación* y *adaptación*, cuya planeación y acción coordinada permitirán el avance en un marco de DS (IPCC, 2014a).

Los procesos de mitigación deben considerar cambios en los modelos actuales de desarrollo y de producción, promoviendo acciones que favorezcan el control y la disminución drástica y sostenida de las emisiones de GEI. Para ello es fundamental considerar que, las acciones deben ser diferenciales en función del desarrollo socioeconómico y la política ambiental y climática de cada región (IPCC, 2014a). Por su parte, los procesos de adaptación se deben enfocara limitar los riesgos derivados de los efectos provocados por el cambio climático, así como en la disminución de la vulnerabilidad de los sistemas socioecológicos, previniendo el deterioro y detrimento de

los servicios ecosistémicos² (SE), atendiendo a las poblaciones en función del tipo de peligros a los que se encuentran mayormente expuestos (IPCC, 2014a).

En el marco del desarrollo sostenible, derivado de la agenda 2030, se establecen 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS's), los cuales proveen el marco normativo principal (Loewe, 2012) para combatir la pobreza y desigualdad, y la protección del medioambiente, a través de un desarrollo económico sostenible —sostenido— (ONU, 2019; UNSDG, 2018).

El informe 2019 de los ODS's (ONU, 2019) identifica y reconoce que el cambio climático es el área que requiere urgentemente la aplicación de medidas de atención, dado que los efectos combinados por el CG serán irreversibles, poniendo a la población de los países más pobres y vulnerables, en riesgo de hambruna, enfermedades y niveles extremos de pobreza, al ampliar la brecha de desigualdad —estimando que para 2050, cerca de 140 millones de personas podrían verse en situaciones de alta precariedad—.

Para atender tal situación, la agenda 2030 incluye el objetivo 13: *Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*. Integrado por cinco metas específicas, entre las que se cuentan el desarrollo de estrategias de reducción del riesgo de desastres ante las crecientes amenazas climáticas, y para lo cual, a partir del acuerdo de París (ONU, 2015) se incorpora la implementación de las *contribuciones previstas determinadas a nivel nacional*³ (CDN).

Una preocupación adicional se presenta, a raíz de la actual emergencia sanitaria derivada de la propagación del virus SARS-CoV-2, donde los planes, programas y acciones para contener el cambio climático y cumplir con los ODS's, así como con el acuerdo de París, se han visto seriamente postergados (UNEP, 2019). A un año de que comenzara la contingencia, después de meses durante los cuales las actividades económicas, industriales y de servicios, se vieran paralizadas en un alto porcentaje —en algunos casos por completo—, en la medida en que los países reactiven sus economías se debe poner especial atención en no dejar de lado la atención de la crisis climática, por el contrario, de

² Procesos o funciones ecológicas que tienen un valor, monetario o no, para los individuos o para la sociedad en su conjunto. Clasificados en servicios de apoyo, de aprovisionamiento, de regulación y culturales (IPCC, 2019).

³ Las CDN son estrategias que se conforman por un conjunto de metas, normativas y medidas planificadas para dar respuesta al cambio climático (ONU, 2019).

acuerdo con el secretario General de las Naciones Unidas, António Guterres: “Es imperante aplicar transiciones limpias, inclusivas y a largo plazo que permitan afrontar la crisis climática y hacer realidad el desarrollo sostenible”, vinculando las estrategias de recuperación de la pandemia con las de atención al cambio climático y los ODS’s (WMO, 2020).

Los escenarios de los efectos por el cambio climático apuntan a un aumento en la frecuencia (Solow, 2017) e intensidad (Goodess, 2013; IPCC, 2012b; Tapia-Palacios et al., 2018) de eventos climáticos extremos, lo que toma relevancia debido a que los huracanes son una de las principales causas de daños a la vegetación en las costas tropicales y subtropicales del mundo (Lugo, 2000).

Para el caso de la península de Yucatán, en 2009 se publica el Atlas Escenarios de Cambio Climático en la península de Yucatán, en el cual se presentan los escenarios extremos de sequías y de máximos de precipitación, acorde a los modelos internacionalmente aceptados, se consideraron cuatro modelos de circulación general (HADLEY, GFDL CGCM y ECHAM) y a su vez, cuatro familias de escenarios (Orellana et al., 2009).

En el Cuadro 2, se presentan los valores proyectados para los escenarios 2020, 2050 y 2080, correspondientes a la precipitación y temperaturas medias anuales.

Cuadro 2: Variación de temperatura y precipitación esperadas para el estado de Quintana Roo

Escenario	Variación en la precipitación total anual	Aumento de la temperatura media anual (°C)
2020	disminuirá entre 5 y 10%	entre 0.8 y 1.2°C
2050	variará entre +5 y -15%	entre 1.5 y 2.5°C
2080	variará entre +10 y -20%	entre 2 y 3°C

Fuente: Pereira-Corona et al. (2013).

1.3. Perturbación, degradación, recuperación y restauración

Se entiende por perturbaciones aquellos eventos o sucesos que se presentan de manera individual y que tienen como origen causas naturales o antrópicas, las cuales poseen la capacidad de provocar cambios en la condición existente de un sistema ecológico. Los

factores principales mediante los que se les distingue y describe incluyen: tipo, intensidad, extensión espacial, frecuencia, entre otros (Vold & Buffett, 2008).

Townsend y Hildrew (1994), la definen como cualquier evento discreto que tiene la capacidad de eliminar organismos, abriendo paso para que, individuos de distinta o la misma especie puedan hacer usos de los recursos que quedan disponibles. Por su parte, Bartha, Czárán, y Scheuring (1997), la definen como “un patrón de mortalidad espaciotemporal multi-especie de origen no competitivo”.

Una definición distinta es la propuesta por Bender, Case, y Gilpin (1984) y Glasby y Underwood (1996), en la cual una perturbación responde y define una relación causa-efecto, donde la causa es el evento que perturbé y la respuesta del sistema corresponde al efecto.

Para los alcances del presente proyecto se considera la definición propuesta por Bender et al. (1984) y Glasby y Underwood (1996), dado que se vincula con el concepto de resiliencia, basado en un modelo bivariado de “resistencia y tasa de recuperación”, donde la resistencia está referida a la capacidad del sistema para soportar la degradación provocada por una perturbación.

El hecho de que tales eventos (perturbaciones) induzcan cambios en los sistemas ecológicos no necesariamente debe considerarse como negativos, pues en algunos casos, ciertas perturbaciones, particularmente las de origen natural, aseguran la presencia de algunas especies críticas para mantener la riqueza de los sistemas o bien favorecen el rejuvenecimiento de flora local, es decir, aquellos legados biológicos que sobreviven la presencia de una perturbación, son elementos fundamentales para la recuperación de los ecosistemas al actuar como filtros selectivos, en contraparte, perturbaciones de origen antrópico pueden tener el efecto opuesto al modificar radicalmente las condiciones de los ecosistemas, provocando cambios permanentes e irreversibles, como es el caso de la deforestación (Vold & Buffett, 2008).

Algunos ejemplos de los tipos de perturbaciones clasificados por su origen se muestran a continuación: *Naturales*. - Inundaciones, sequías, ciclones tropicales, lluvias

torrenciales, avenidas, procesos de remoción en masa, fragmentación (parches) forestal; *Antrópicas*. - Deforestación, cambios de uso de suelos, urbanización, desvío de efluentes.

De acuerdo con J. A. Stanturf (2015), La perturbación se convierte en degradación cuando los efectos provocados cruzan un umbral más allá de la resistencia natural de un ecosistema.

El concepto de degradación responde a una construcción multidimensional, la cual ha sido abordada y estudiada desde numerosas áreas del conocimiento y bajo diversos marcos conceptuales, esto ha llevado a que tal concepto sea analizado y definido desde distintas escalas espaciales, temporales y dimensionales (Hobbs, 2016).

La confusión y diversidad de definiciones en torno al concepto de degradación comienza por un tema de escala, donde se trata de identificar y evaluar las capacidades y pérdidas de las características de los suelos, ecosistemas y paisajes (Ghazoul & Chazdon, 2017).

De acuerdo con Warren (2002), el fenómeno de degradación de los suelos es un proceso complejo, por lo que nos es pertinente realizar juicios independientemente de su contexto espacial, temporal, económico, ambiental y cultural. Stocking y Murnaghan (2000), mencionan que la degradación no posee una característica fácilmente identificable, sino por el contrario, está en dependencia de los diferentes recursos que la integran (suelo, agua, vegetación, rocas, aire, clima y vientos) y su nivel de deterioro o disminución.

Thompson et al. (2013) definen la degradación como “Una reducción en la capacidad de un bosque o selva para producir servicios ecosistémicos como el almacenamiento de carbono y productos de madera como resultado de cambios antropogénicos y ambientales”, es decir, la degradación responde a un proceso en el cual los ecosistemas en condición predefinidas (no degradadas) alcanzan un estado en el cual se empobrecen o disipan ciertos atributos valiosos (Ghazoul & Chazdon, 2017), entre los que se puede incluir la disminución o peligro de extinción de especies (Wroe et al., 2006).

La existencia de ecosistemas colapsados son un indicador del grado de degradación del paisaje, donde las capacidades de regeneración ecológica natural se ven reducidas al punto en que los ecosistemas originales son incapaces de recuperar y soportar la biodiversidad nativa (Pardini et al., 2010). Ejemplo de ellos son las zonas de cultivo donde debido a la presión por la producción agrícola ha alcanzado el punto de inflexión con el resultado de la inminente pérdida absoluta de la capacidad de regeneración forestal (Magnuszewski et al., 2015).

En este sentido, Ghazoul y Chazdon (2017) diferencia la degradación de la deforestación, donde la segunda implica la conversión absoluta de la cubierta forestal, cambiando radicalmente la estructura o composición de los bosques o selvas para la implementación de actividades agrícolas, industriales o urbanas, entre otras.

Dado que el concepto de degradación no está definido con precisión, un enfoque alternativo sería el considerarlo como un estado en el cual un ecosistema carece o ha perdido aquellos atributos de un sistema adaptativo complejo, lo que implica una condición en la cual se produce una reducción o modificación significativa de la dinámica del ecosistema (Bahamondez & Thompson, 2016; Ghazoul et al., 2015; Thompson, 2011).

La recuperación de los ecosistemas depende de diversas variables y características locales, como son de la fertilidad del suelo (Chazdon, 2003; Gourlet-Fleury et al., 2011), los cambios en la cobertura arbórea la cual contribuye con el ciclo de nutrientes, la erosión edáfica y los procesos de remoción en masa (Islam et al., 2001; Sidle et al., 2006), así como la fragmentación de los hábitats (parches) que interrumpen los flujos energéticos de los ecosistemas (Ghazoul & Chazdon, 2017).

Para poder apreciar y comprender los procesos que llevan a un ecosistema a la pérdida de su dinámica y rendimiento funcional, es necesario estudiar y comprender tales procesos desde diferentes escalas espacio- temporales (Ghazoul & Chazdon, 2017). Por ejemplo: a mayor escala, la degradación del paisaje abarca la deforestación, la fragmentación de los bosques, la desertificación y el uso no sostenible de la tierra, a los cambios en la configuración y la calidad (fragmentación) de la cobertura de las selvas, lo

que altera el flujo de especies, nutrientes, energía o materiales, de tal forma que interrumpe el funcionamiento de los ecosistemas en toda la región (Sloan, 2008).

El concepto de restauración está intrínsecamente ligado al concepto de degradación, dado que este implica el deseo de un retorno (recuperación) de los ecosistemas afectados a una condición histórica percibida a través de la sucesión natural o la intervención activa, la cual refiere a un estado de relativa estabilidad y tranquilidad para la sociedad involucrada, es decir, tanto la percepción de la degradación y la recuperación responden a procesos de construcción social, las cuales están en dependencia de las normas culturales y éticas de cada grupo (Burger et al., 2008; Lamb et al., 2012). Lo que resulta en una variedad de iniciativas locales, regionales y globales tendientes a contrarrestar los procesos de pérdida de los servicios ecosistémicos, promoviendo recuperación de ecosistemas y paisajes (Ghazoul & Chazdon, 2017).

Las acciones de restauración responden a un proceso de aceptación social de las condiciones ambientales locales o regionales deseables, lo que conlleva al diseño de políticas que respondan a los intereses que imperen en su momento, ello incluye la valoración de los costos que tales acciones representen, y lo cual, en escalas locales puede superar las capacidades gubernamentales (Birch et al., 2010; Vergara et al., 2016), por tanto, la recuperación de los ecosistemas implican la consideración de múltiples factores socioeconómicos, políticos y biofísicos (Li et al., 2012).

Por otra parte, las acciones tendientes a la recuperación no implican necesariamente el restablecimiento de los ecosistemas a su estado original (previo a la degradación), de tal forma que los objetivos planteados dependerán de los múltiples beneficios sociales y ecológicos esperados o deseados en función de distintas escalas, que llevaría a los sistemas a nuevos “estados estables”, entendiendo éstos como nuevas condiciones que permitan a los ecosistemas mantener sus funciones y carácter fundamentales previos a las perturbaciones (Ghazoul & Chazdon, 2017).

La identificación y estimación de los índices de fragmentación de los ecosistemas puede proveer información útil sobre la escala y tipo de las intervenciones necesarias para la restauración de los ecosistemas, entre las que se pueden considerar como ejemplo la

restauración de la vegetación en zonas de amortiguamiento o aumentar la conectividad de pequeños fragmentos de bosque, fortaleciendo así las capacidades de resiliencia de los sistemas (Tambosi et al., 2014); por tal motivo, los estudios o proyectos deben necesariamente estructurarse desde un enfoque multiescalar, con lo cual se garantice primeramente la identificación de amplias áreas afectadas (puntos críticos), para posteriormente llevar a cabo investigación a mayor detalle (Ghazoul & Chazdon, 2017).

Yengoh, Dent, Olsson, Tengberg, y Tucker III (2014) identifican cuatro temas principales a ser considerados para llevar a cabo una evaluación integral, monitoreo y mapeo de la degradación (véase Cuadro 3).

Cuadro 3: Temas principales para la evaluación de la degradación

Tema	Características
Causas de degradación	Los impulsores, en su mayoría hechos por el hombre, como las prácticas agrícolas, el pastoreo excesivo, la deforestación y las actividades industriales como la minería.
Tipo de degradación	La naturaleza del proceso que impulsa la disminución de la calidad o productividad de la tierra. Por ejemplo, sequía, salinización y erosión eólica o hídrica.
Grado de degradación	Clasificado en grados de severidad, como leve, moderado, fuerte y extremo.
Extensión de la degradación	El área total afectada.

Fuente: Yengoh et al. (2014).

I.4. Resiliencia

Lazos-Chavero et al. (2018) menciona que los eventos extremos tienen la capacidad de alterar abruptamente las sociedades y los procesos ecológicos en los bosques, reconfigurando su función y dinámica. La combinación de tales eventos extremos tanto de carácter natural como antrópico, pueden generar una sinergia con consecuencias negativas inmediatas para los ecosistemas afectados provocando resultados variados en su capacidad de resiliencia (Bhaskar et al., 2018); aunado a ello, Buma y Wessman (2011) destacan que las perturbaciones derivadas de múltiples eventos extremos, ocurridos en la misma ubicación, separadas por intervalos menores a los requeridos por el sistema para

alcanzar su recuperación, pueden crear una perturbación acumulada de gravedad extraordinaria o de características novedosas.

La disminución de las capacidades de resiliencia de un sistema forestal puede representar un indicador de un proceso de degradación, proceso que se da como resultado de una disminución progresiva de la estructura, la composición y las funciones en las que se basa el vigor y la resiliencia de este (Vásquez-Grandón et al., 2018).

Uno de los principales enfoques de los estudios de biodiversidad (Mori, 2016) ha sido dilucidar los mecanismos por los cuales la biodiversidad estabiliza las funciones de los ecosistemas ante los cambios ambientales (perturbaciones), de ahí que el concepto de resiliencia se ha convertido en el foco de una proporción creciente de la investigación ecológica y evolutiva, y es popular en la interfaz entre la conservación, la ingeniería y las ciencias sociales (Hodgson et al., 2015).

De acuerdo con Moberg (2009), el concepto de resiliencia representa un componente necesario que proporciona un marco y una base para comprender y desarrollar estrategias para la transformación sostenible, complementando la agenda de desarrollo sostenible, para enfrentar los cambios y desafíos sociales y ambientales a consecuencia del calentamiento global.

El concepto y definición de resiliencia ha sido y es ampliamente estudiado, de acuerdo con Hosseini, Barker, y Ramirez-Marquez (2016) se han ofrecido diversas definiciones al respecto, las cuales se superponen con una serie de conceptos ya existentes, tales como: robustez, tolerancia a fallos, flexibilidad, capacidad de supervivencia y agilidad, entre otros. El concepto de resiliencia también se ha abordado desde perspectivas disciplinarias particulares y en todos los dominios de aplicación, incluidos la psicología, la ecología y las empresas, entre otros. El autor distingue cuatro dominios principales: organizacional, social, económico, ingeniería. Por su parte, Newton y Cantarello (2015) hacen hincapié en la cada vez mayor incorporación del concepto de resiliencia en política ambiental.

Wang et al. (2017), en su estudio denominado “análisis de las definiciones de resiliencia”, hacen un recuento de las principales aportaciones en cuanto al tema,

analizando sus dominios de aplicabilidad y si estas son de carácter cuantitativo o cualitativo. De ellas destacan las siguientes:

- Resiliencia Ecológica (Holling, 1996): "la magnitud de la perturbación que se puede absorber antes de que el sistema cambie su estructura al cambiar las variables y los procesos que controlan el comportamiento".
- Resiliencia en Ingeniería (Youn et al., 2011): "el grado de tasa de supervivencia pasiva o confiabilidad, más una tasa de supervivencia o restauración proactiva".
- Resiliencia basada en árboles de eventos probabilísticos (Teodorescu, 2015): "la nueva probabilidad de recuperación del daño máximo en un tiempo específico menor que el tiempo máximo de recuperación al funcionamiento normal".

Bhaskar et al. (2018) mencionan que el concepto de resiliencia ha evolucionado para ser aplicable a los sistemas socioecológicos, concepto que se construye y se vuelve central para la teoría de sistemas adaptativos complejos (Pereira-Lindoso, 2017), representando un paradigma clave en la "ciencia de la sostenibilidad" (Turner, 2010). De tal forma que, resiliencia socioecológica, más que un concepto representa una teoría científica sobre el funcionamiento de sistemas complejos (Allen et al., 2016).

La resiliencia socioecológica está relacionado con la capacidad de autoorganización, aprendizaje y adaptación, durante y después de la perturbación (Carpenter et al., 2001; Engle & Lemos, 2010) y se describe como la capacidad del sistema para tolerar perturbaciones y permanecer en el mismo dominio de estabilidad (Pereira-Lindoso, 2017).

Una definición de resiliencia relacionada con los sistemas socioecológicos es la propuesta por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014b) que establece la resiliencia como: "la capacidad de un sistema socioecológico para hacer frente a un evento o perturbación peligrosa, responder o reorganizarse de manera que mantenga su función, identidad y estructura esenciales".

Walker et al. (2006) definen la resiliencia socioecológica como "la capacidad del sistema para absorber las perturbaciones y organizarse a medida que experimenta

cambios con el fin de mantener esencialmente las mismas funciones, estructura, identidad y retroalimentación”. Tales capacidades de acuerdo con Pereira-Lindoso (2017), se encuentran en función de dos aspectos fundamentales, el primero, en cuanto al conjunto de opciones del cual el sistema dispone para adaptarse, y segundo, la capacidad del sistema para alcanzar nuevos estados estables en función de las opciones de adaptación disponibles.

En este sentido Hodgson et al. (2015), plantea el supuesto de que, si la resiliencia se logra a través de la resistencia y/o la recuperación, entonces la resiliencia se puede definir como la capacidad de un sistema para resistir y/o recuperarse de una perturbación exógena, donde la resistencia es la capacidad de un sistema de permanecer inalterado después de la perturbación y la recuperación es la capacidad de volver a las condiciones previas a la perturbación (Grimm & Wissel, 1997; Hodgson et al., 2015). Ingrisch y Bahn (2018) refuerzan la propuesta, fundamentando que, para abordar una evaluación de la resiliencia ampliamente comparable, se debe utilizar un marco bivariado de comparación de resiliencia que, considere conjuntamente el impacto de la perturbación (resistencia) y la tasa de recuperación.

Por otro lado, la pérdida de resiliencia o capacidad de un bosque para recuperarse a un estado dado, luego de una perturbación o disturbios extremos, capaces de desencadenar el proceso de degradación, puede llevar al sistema a un punto de inflexión o umbral ecológico en el cual el proceso de degradación se vuelve irreversible (Vásquez-Grandón et al., 2018).

Conocer y analizar los componentes de la dinámica de los procesos socioecológicos, desde una perspectiva de resiliencia permitiría reconocer condiciones o contextos útiles para llevar al cabo investigaciones sobre la vulnerabilidad de los sistemas (Pereira-Lindoso, 2017).

La interacción de múltiples perturbaciones extremas representa una preocupación en ecología, debido a que la combinación de tales eventos ofrece un comportamiento no lineal sobre las capacidades de resistencia, adaptación y recuperación de los ecosistemas, es decir, eventos combinados presentados en condiciones espacio-temporales distintas,

limita el estudio del comportamiento y los resultados a largo plazo en la estructura y función del ecosistema derivados de un único evento extremo (Buma & Wessman, 2011).

Un enfoque bivariado es el propuesto por Hodgson et al. (2015) y Nimmo et al. (2015), en el cual se plantea llevar a cabo estudios desde un marco de "resistencia-resiliencia" (modelo bivariado de "cambio de estado" (resistencia) y "tiempo de retorno" (resiliencia), el cual entre otros permite conocer los atributos intrínsecos y los factores ambientales extrínsecos a una unidad ecológica que influyen en la resistencia y la resiliencia, a partir de la observación de los cambios de estado a largo plazo.

Por otra parte, Newton y Cantarello (2015), sugieren que el concepto de "resiliencia ecológica" puede en ocasiones tener un valor limitado como objetivo para la restauración de los bosques, a diferencia del concepto de "resiliencia de ingeniería" el cual permite medir y estimar potencialmente la tasa de recuperación posterior a la perturbación. Para ello establece que la diferencia clave entre ambos conceptos radica en si los ecosistemas muestran un estado de equilibrio único, como en el caso de la "resiliencia de ingeniería", o los estados estables múltiples, como en el caso de la "resiliencia ecológica".

Partiendo de la distinción realizada por Newton y Cantarello (2015), el presente estudio toma como base para su desarrollo el concepto de "Resiliencia Ecológica", el cual reconoce la existencia de múltiples estados estables y la capacidad de los sistemas para resistir los "cambios de régimen" entre estados alternativos (Oliver et al., 2016), *bajo un modelo bivariado de "cambio de estado" (resistencia) y "tiempo de retorno" (resiliencia), en el contexto de múltiples perturbaciones presentes en la misma ubicación y en diferentes temporalidades* (Nimmo et al., 2015).

Al explorar los conceptos y la aplicación de teorías de resiliencia en general, Walker et al. (2014) identificaron que la resiliencia puede ser identificada y estimada a partir de procesos que incluyen la tala de vegetación, incendios forestales, inundaciones, sequías, conectividad, modularidad, evaluaciones de uso del suelo y cambio de la cobertura del suelo. Indicadores que pueden ser registrados a través de la implementación de técnicas que involucren el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), (Yengoh et al., 2016).

I.5. Eventos extremos

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2018), define como evento extremo aquellos que se puede identificar cuando una sola variable hidrológica, meteorológica o climática (por ejemplo, lluvia o viento) excede sus umbrales específicos (percentiles, valores absolutos fijos y/o períodos de retorno)".

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático define como evento climático extremo aquellos que presentan valores de una variable climática o de tiempo atmosférico por encima o debajo de un valor umbral cerca de los extremos superior o inferior del rango de valores observados de tal variable (IPCC, 2012b), los cuales se encontrarán en el percentil 10 o 90 de la función de densidad de probabilidad observada (IPCC, 2014b). Sin embargo, Camuffo, della Valle, y Becherini (2018) consideran que los percentiles deben de estar en el orden de 1 y 99, de acuerdo con los resultados obtenidos en su estudio.

Una definición ampliamente aceptada sobre el concepto de eventos extremos los define como “aquellos eventos que exceden algún tipo de límite en términos de magnitud, duración y frecuencia”, es decir, eventos extremos se caracterizan por presentar una amplia proporción entre el mayor impacto y un impacto típico (Décamps, 2008).

Estadísticamente, la ocurrencia de eventos extremos es poco común en cuanto a frecuencia, magnitud y/o duración en un ecosistema particular, por lo que reconocerlos estará en función de la longitud y calidad de los registros de observación con que se cuenta (Décamps, 2008) y no pueden ser descritos completamente basados en una sola cantidad (Camuffo et al., 2018).

Los ciclones tropicales en categoría de huracán no son los únicos fenómenos naturales que pueden ser caracterizados como eventos extremos, Álvarez-Yépez, Martínez-Yrizar, y Fredericksen (2018) definen los eventos extremos como alteraciones climáticas (sequías prolongadas, severas heladas, huracanes de alta intensidad y olas de calor y frío, etc.) o antropogénicas (cambios en el uso de la tierra, deforestación e incendios inducidos) que derivan en respuestas biológicas extremas. Bailey y van de Pol (2016) los definen como episodios en el que se excede la capacidad de aclimatación de un

organismo y la respuesta fisiológica o de desarrollo posterior la cual es significativamente diferente de la aclimatación normal. Así mismo, perturbaciones provocadas por eventos extremos (antropogénicos o naturales) como son la tala y la sequía, afectan a los ecosistemas en su totalidad, induciendo un cambio en su funcionamiento (Piponiot et al., 2018).

El presente estudio considera para el análisis de múltiples perturbaciones extremas, los siguientes eventos y variables de respuesta (**Error! Reference source not found.**):

Cuadro 4: Relación de eventos extremos y variables de respuesta y efecto.

Tipo de evento extremo	Variables de respuesta	Variables de efecto
Ciclones tropicales.	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad del viento • Presión atmosférica • Duración (Tiempo) • Frecuencia • Lluvia (Volumen) • 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de actividad fotosintética (magnitud o intensidad del daño) • Área total afectada (extensión)
Lluvias.	<ul style="list-style-type: none"> • Lluvia (Volumen) • Duración (Tiempo) • Frecuencia • 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de actividad fotosintética (magnitud o intensidad del daño) • Cambios en la cobertura arbórea (Intensidad del daño)
Sequías.	<ul style="list-style-type: none"> • Duración (Periodo sin registro de lluvias) • Frecuencia • Contenido de agua • 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de actividad fotosintética (magnitud o intensidad del daño) • Cambios en la cobertura arbórea (Intensidad del daño)
Incendios forestales.	<ul style="list-style-type: none"> • Duración (Tiempo) • Frecuencia • Temperatura • 	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de actividad fotosintética (magnitud) • Cambios en la cobertura arbórea (Intensidad del daño) • Área total afectada (extensión)

Fuente: Elaboración propia.

Camuffo et al. (2018), describen los principales métodos reportados en la literatura, utilizados para la caracterización de los eventos climáticos en categoría de extremos **Error!**

Reference source not found..

Cuadro 5: Criterios principales para la identificación de un "evento extremo" y definiciones relacionadas.

Siglas (en inglés)	Criterio	Definición
POT	Pico por encima del umbral. (<i>Peak over threshold</i>)	Un valor por encima (o por debajo) de un umbral cerca de los extremos superior (o inferior) del rango (IPCC, 2012a).
EVT	Teoría del valor extremo. (<i>Extreme value theory</i>)	"Contenido en la distribución de cola" de una variable dada (Coles, 2001; Gumbel, 1960; Tiago de Oliveira, 1986).
ERT	Excedente a un umbral relativo. (<i>Exceeding a relative threshold</i>)	Eventos más raros que el percentil 10 o 90 (IPCC, 2014b).
REP	Excedente a un umbral y un período de retorno. (<i>Exceeding a threshold and a return period</i>)	Cuando una variable excede un umbral y un período de retorno (WMO, 2018).
EFF	Eficacia. (<i>Effectiveness</i>)	Eventos que desencadenan un desastre (por fenómeno natural) o emergencia (IPCC, 2014b). Evento que puede causar la pérdida de vidas, lesiones, etc. (WMO, 2018).

Fuente: Camuffo et al. (2018)

Para la clasificación de los eventos hidrometeorológicos analizados en el presente estudio, se seleccionó el modelo "excedente a un umbral relativo", tomando como umbrales de referencia los percentiles 10-90; 1-99 y 0.1-99.9, según el tipo de variables utilizadas para la identificación de cada evento en particular. Lo que permitió tener un marco de referencia común para la comparación de los distintos fenómenos en categoría de extremos, en concordancia con la definición propuesta por la WMO (2018).

1.6. Eventos hidrometeorológicos

a. Ciclones tropicales

Los ciclones tropicales son fenómenos climáticos que ocurren e impactan anualmente el territorio nacional. El Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos de América (NHC, por su sigla en inglés), define como Ciclón Tropical: “una circulación cerrada atmosférica que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en sentido horario en el hemisferio sur” (NHC, 2019a), caracterizada por grandes masas de aire cálido y húmedo con intensos vientos, alrededor de una zona de baja presión (Rosengaus-Moshinsky et al., 2002). Estos fenómenos se pueden caracterizar y clasificar de acuerdo a la temporalidad de su ocurrencia y sus propiedades físicas, entre las que destacan: intensidad (magnitud), medida en función de la velocidad máxima de vientos sostenidos y mínima presión atmosférica, trayectoria (localización), precipitación, duración, velocidad de recorrido, entre otras (IBTrACS, 2019b; Sánchez-Rivera et. al., 2020).

Con la finalidad de estimar los daños materiales que pudieran ser provocados por los vientos asociados a los ciclones tropicales, el ingeniero Herb Saffir y el meteorólogo Bob Simpson crearon la “escala de daño potencial *Saffir-Simpson*”. La escala clasifica a los meteoros en cinco categorías de huracán (Cuadro 6).

Cuadro 6: Escala de daño potencial Saffir-Simpson de los ciclones tropicales

Tipo	Categoría	Mínima Presión Atmosférica [hPa]	Vientos Máximos Sostenidos	Características de los Posibles Daños Materiales Provocados por el Viento
Depresión tropical	DT	> 980	< 39 mph; 34 nudos; 63 km/h	
Tormenta tropical	TT	> 980	40 - 73 mph; 34-63 nudos; 64 - 118 km/h	
Huracán	1	980 -994	74-95 mph; 64-82 nudos; 119-153 km/h	Árboles pequeños caídos; daños al tendido eléctrico.
Huracán	2	965-980	96-110 mph; 83-95 nudos; 154-177 km/h	Adicionalmente a los daños del Categoría Uno: Daño en tejados, puertas y ventanas; desprendimiento de árboles.
Huracán	3	945-965	111-129 mph; 96-112 nudos; 178-208 km/h	Adicionalmente a los daños del Categoría Dos: Grietas en construcciones.

Huracán	4	920-945	130-156 mph; 113-136 nudos; 209-251 km/h	Adicionalmente a los daños del Categoría Tres: Desprendimiento de techos en viviendas.
Huracán	5	< 920	> 157 mph; > 137 nudos; > 252 km/h	Adicionalmente a los daños del Categoría Cuatro: Daño muy severo y extenso en ventanas y puertas. Falla total de techos en muchas residencias y en construcciones industriales.

Fuente: Adaptado de SMN (2019).

Para identificar las áreas en las cuales se presentan los efectos de mayor intensidad como resultado de los vientos asociados a los ciclones, el NHC define una zona de impacto (*Strike*) a partir de una distancia máxima denominada “radio máximo de vientos” (NHC, 2019a), lo que resulta en un área de impacto dentro de una circunferencia de 231.5 km de diámetro, con un centro desfasado a 23.15 km a la derecha del ojo del huracán (en función de la trayectoria) y una extensión promedio de 139 km a la derecha del centro y a 92.6 km a la izquierda (Figura 2). De acuerdo con (Jiménez-Espinosa et al., 2003) es dentro de la zona delimitada por el “radio máximo de vientos”, donde ocurren las principales afectaciones y daños a los ecosistemas y centros de población (Figura 3).

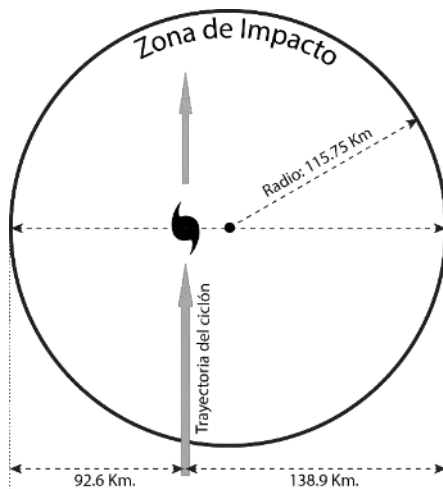


Figura 2: Zona de impacto definida por el Centro Nacional de Huracanes (NHC)

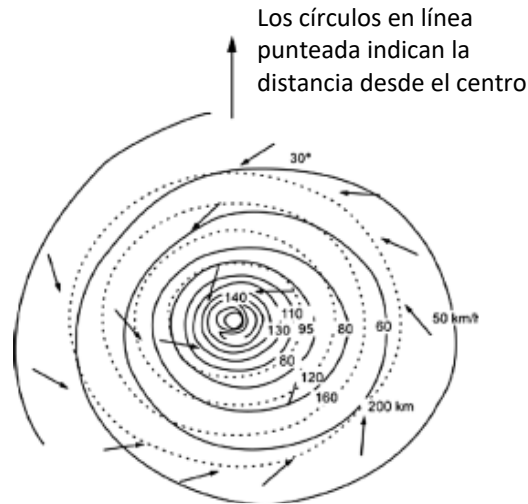


Figura 3: Campo de vientos de un ciclón tropical. Fuente Jiménez et al. (2003)

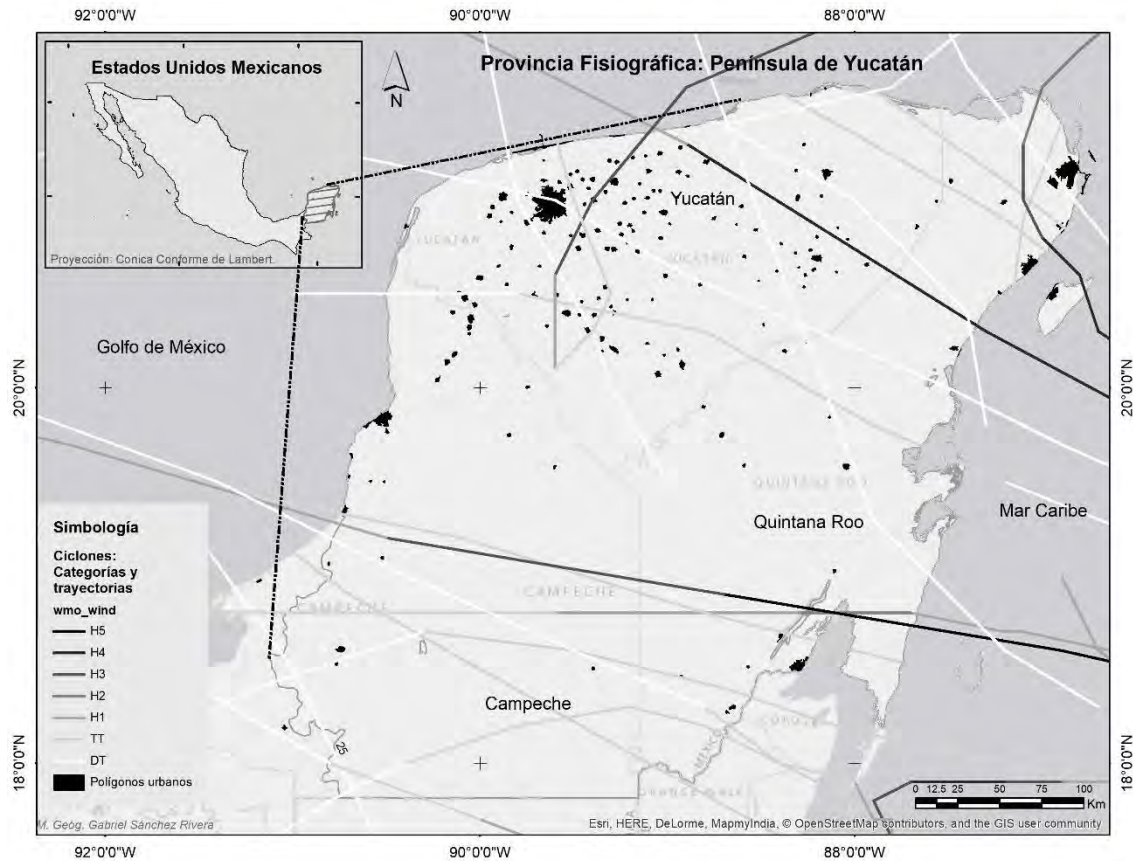
El país se encuentra expuesto al embate de estos fenómenos hidrometeorológicos, debido a que por su localización geográfica se ubica entre dos zonas ciclogénicas de gran actividad, hacia el oeste la Región Pacífico y al este la Región del Atlántico Norte.

Durante el período comprendido entre 1871 y 2013, unos 50 huracanes azotaron la costa oriental, mientras que 45 huracanes pasaron por la península de Yucatán (NOAA, 2019).

Anualmente, se estima que se presentan un promedio de 12.1 tormentas tropicales y 6.4 huracanes en la cuenca del Atlántico, mientras que en el Pacífico noreste y central un promedio de 16.6 tormentas tropicales y 8.9 huracanes, de acuerdo con los registros reportados por la Agencia Nacional para la Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés), (NOAA, 2014).

En los mismos registros de la NOAA, se reporta que, en el caso de la cuenca del Atlántico, el año en el que se presentó el mayor número de ciclones intensos fue el 2005, con cuatro en categoría de huracán, de acuerdo con la escala Saffir-Simpson (Servicio Meteorológico Nacional (NOAA, 2014; SMN, 2019). Siendo el año 1914 cuando se registrará el mínimo absoluto. En el caso de la cuenca del Pacífico, el año que presentó el mayor número de ciclones de alta intensidad fue el 2015, con 11 huracanes.

La península de Yucatán se encuentra rodeada hacia el norte por el Golfo de México y hacia el este con el Mar Caribe, lo que la sitúa en la zona donde se presenta la mayor actividad climática relacionada con la formación de ciclones tropicales (Figura 4).



Fuente: Elaboración propia con datos del IBTrACS, 2019b.

Figura 4: Localización de la península de Yucatán y trayectoria de ciclones 2000-2012.

Entre los principales efectos (daños) ocasionados de manera directa por el impacto de ciclones tropicales en categoría de huracán se presentan los siguientes: daños por el viento y objetos volantes, daños por los oleajes de tormentas y su depresión, erosión costera por el efecto de “*over-wash*”, inundaciones como consecuencia de las lluvias y aumento en el número de incendios forestales en la siguiente estación seca (Ihl & Frausto-Martínez, 2014). Ejemplos de ello es el registro del impacto del huracán *Janet* en 1955, el cual causó grandes perturbaciones en la zona sur del estado de Quintana Roo, especialmente en Chetumal, capital del estado; el huracán *Gilbert* en 1988, cuyos efectos provocaron grandes daños en la zona norte de Quintana Roo, particularmente en la ciudad de Cancún y zonas aledañas (Rosengaus-Moshinsky et al., 2002).

En 2005, el huracán *Wilma* cruzó el noreste de la península de Yucatán, impactando en territorio del estado de Quintana Roo, atravesando inicialmente la isla Cozumel para posteriormente internarse en el continente por el municipio de Solidaridad,

tomando rumbo hacia el norte (municipio de Benito Juárez), dada su trayectoria causó estragos en las ciudades de Cozumel, Playa del Carmen y Cancún (Chatterjee & Mozumder, 2015). *Wilma* se forma el 15 de octubre del 2005 y se disipó el día 26 del mismo mes, alcanzando velocidades máximas de vientos de 256 km/h y una presión mínima de 882 Mb, la más baja registrada hasta ahora (estimada mediante radiosonda en paracaídas), lo que lo posiciona como el Ciclón Tropical más intenso formado en la cuenca del Atlántico Norte (NOAA, 2014), con una distancia total recorrida de 5,668.83 km. Tocó tierra el 19 de octubre, con una velocidad máxima de vientos de 222 km/h, recorrió una distancia sobre tierra de aproximadamente 100 km, de acuerdo a los registros de la base de datos del *International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS por sus siglas en inglés) administrada por la NOAA. (IBTrACS, 2019a).

Debido a la intensidad y fuerza del ciclón, *Wilma*, provocó grandes afectaciones, tanto en las comunidades vegetales, como en los sistemas urbanos y medios de producción, generando pérdidas económicas significativas (Zenteno Casas et al., 2006). Posterior al paso del ciclón, el número total de víctimas reportadas fue mayor a las 2,280; 23 de ellas fallecidas, con pérdidas económicas totales estimadas en \$128 billones (USD), cifra que, actualizada en 2009 ascendía a \$141.3 billones (USD), la más alta para la cuenca del Atlántico Norte (Hernández Aguilar, 2014).

Si bien la atención sobre los efectos negativos provocados por los vientos y lluvias asociados a las formaciones ciclónicas se centran en los daños directos provocados en las zonas urbanas por las afectaciones que éstos ocasionan en la infraestructura y en la pérdida de vidas humanas (Rosengaus-Moshinsky et al., 2002), es importante no dejar de lado los efectos sobre el medio natural, no solo por las afectaciones que pudiesen tener en la biodiversidad de la región desde el punto de vista de la ecología, sino que los efectos pueden tener repercusiones directas sobre la sociedad (van de Pol et al., 2017) representando para esta última grandes costos económicos (Solow, 2017).

Ciclones tropicales en categorías de huracán presentan un impacto directo en la dinámica forestal relacionada con la captura y el almacenamiento de carbono (Bhaskar et al., 2018), asociado a la apertura del dosel y daños estructurales de los troncos y ramas, lo

que provoca la deposición masiva de escombros no estacional al suelo de bosques y selvas (Martínez-Yrizar et al., 2018). Los árboles de mayor estatura (altura y diámetro) son los más propensos a sufrir daños por el impacto del huracán (Bhaskar et al., 2018).

Para México, el problema de las selvas ante la exposición a eventos climáticos extremos, por su ubicación geográfica, se ve agravado por un historial de deforestación y un cambio continuo en la cobertura del suelo, lo que conlleva que las zonas costeras del país sean altamente susceptibles a los efectos de los huracanes (Anderson-Teixeira et al., 2015; IPCC, 2007; Ponette-González et al., 2010; Sánchez-Sesma, 2009). Y en el caso de la península de Yucatán, esto se agrava aunado a la falta de relieve como son barreras montañosas, las cuales favorecen la disminución del flujo de los vientos (Boose et al., 2003; Sánchez-Sánchez et al., 2007).

b. Lluvias y sequía

La Organización Mundial Meteorológica (WMO & UNESCO, 2012) define precipitación o lluvia como “Elementos líquidos o sólidos procedentes de la condensación o sublimación del vapor de agua que caen de las nubes o son depositados desde el aire en el suelo” y a la sequía meteorológica como la “ausencia prolongada o escasez acusada de precipitación”.

Dos tipos de climas principales se presentan en la región, el primero de tipo cálido húmedo al oriente, con intervalos de temperatura promedio de 24 a 26 °C y el segundo, muy cálido, al occidente con temperaturas entre 26 y 28 °C. Septiembre es el mes de mayores lluvias (superiores a 200 mm) generalmente asociados a ciclones tropicales, mientras que durante los meses de noviembre a abril se presentan lluvias escasas asociadas a los “nortes” (Orellana et al., 2009; Vidal-Zepeda, 2005).

Con relación a las sequías, la región presenta dos períodos claramente identificados, la pre-estival o de primavera, entre los meses de enero a abril y la intraestival o canícula durante los meses de julio y agosto (Orellana et al., 2009).

Como resultado de la variabilidad climática, la península se encuentra doblemente expuesta, tanto a la ocurrencia huracanes como sequías (Orellana et al., 2009), por lo que de acuerdo con Hernández Cerda et al. (2000), se encuentra catalogada dentro de las

cinco zonas con sequía severa del país, como resultado de la variabilidad en la ocurrencia de lluvias y ciclones tropicales. Así mismo, es catalogada como de riesgo alto a la incidencia de ciclones entre los meses de junio a octubre, esto de acuerdo con la Clasificación del Centro Nacional de Prevención de Desastres dado que pertenece a la zona ciclogénica del Atlántico Norte, donde se generan los ciclones tropicales del Caribe (Jiménez-Espinosa et al., 2003).

La variabilidad entre los períodos húmedos y secos, se ve influenciada por la presencia del Niño-Oscilación Sur (ENSO), la cual provoca alteraciones en los patrones regulares climáticos, de acuerdo con lo reportado por Alexander et al. (2002) y Ropelewski & Halpert (1996).

Bárcena et al. (2010) señalan que los escenarios de cambio climático reportan una disminución de la precipitación anual entre el 10% y 15% y superior al 30% durante la estación seca y lluviosa con respecto al promedio del periodo 1980-1999.

Diversos escenarios de cambio climático (Orellana et al., 2009; Pereira-Corona et al., 2016) apuntan hacia un incremento en la intensidad de las sequías, desde fuerte en la zona centro y sur hasta severo en la zona noroeste de la península, como resultado de los cambios graduales (incremento y/o disminución) de los patrones de precipitación a través de los años (J. Méndez et al., 2008).

Por otra parte, diversos autores como son Shukla et al. (1990) y Kanae et al. (2001), señalan que la constante deforestación de la selva tropical, actúa como factor en la disminución de la precipitación, al provocar una menor fuente de evapotranspiración para producir la humedad y formación de nubes.

c. Incendios forestales

Entre los principales agentes perturbadores de la selva tropical se encuentran los huracanes y las sequías, las cuales causan considerables daños estructurales, contribuyendo con la acumulación de grandes volúmenes de biomasa seca, la cual tiene la capacidad de actuar como combustible para la generación de incendios forestales (Sánchez-Sánchez et al., 2015).

Durante los meses de abril a junio se reportan los mayores eventos de incendios (87%), lo cual se relaciona con las bajas precipitaciones que se presentan en la región, justo posterior a la temporada de ciclones, que como resultado del impacto provocado por los vientos asociados a éstos, concentran grandes cantidades de materia orgánica que al secarse se convierte en combustible natural. Los incendios generados pueden llegar a cubrir cientos o miles de hectáreas (López-Portillo et al., 1990).

Islebe, Calmé, León-Cortés, y Schmook (2015) reportaron para el periodo 1993 a 2004 una diferencia sustancial de áreas siniestradas por fuego relacionadas con la presencia previa de ciclones tropicales, donde 8,132 ha se incendiaron sin la presencia de ciclones, contra 97,560 ha incendiadas posterior a la presencia de éstos. Es decir, del total de hectáreas incendiadas (105,692), el 92% ocurrió tras el paso de huracanes.

En cuanto al origen de los incendios, Snook y Negreros-Castillo (2004), reportan que en su mayoría se deben a la falta de medidas de contención durante las operaciones de “roza, tumba y quema”, así como al descuido de las personas que tiran colillas de cigarro encendidas o fogatas no apagadas adecuadamente.

d. Niño-Oscilación Sur (ENSO)

Fenómenos que inciden en los eventos de sequía son el del Niño y la Niña, en el caso de México, estos se encuentran relacionados con la ocurrencia de sequías intensas, como las que se presentaron en los años 1982-83 (Suplee, 1999).

El Niño y La Niña representan condiciones anómalas con respecto al valor promedio en la temperatura del océano en el Pacífico tropical del este. Trenberth (1997) define al Niño como el período en que la temperatura de la superficie del mar, en la región localizada entre las coordenadas 4°N a 4°S, 150°W a 90°W, conocida como “Niño 3”, oscila durante al menos seis meses consecutivos, por arriba de la anomalía de +0.5 (eventos cálidos), en contraparte, La Niña corresponde a los registros por debajo de la anomalía de -0.5 (eventos fríos), (Figura 5).

De acuerdo con Magaña (1999), es durante los años que se presenta El niño, cuando se registran los mayores descensos en la cantidad de lluvia que precipita.

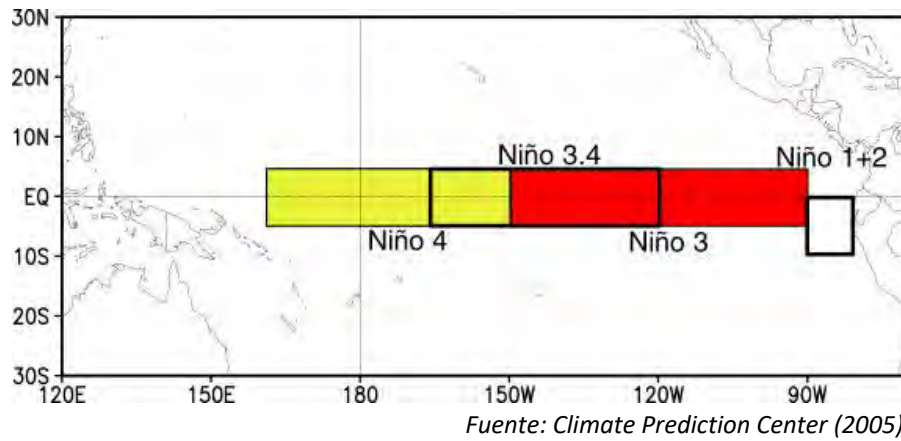


Figura 5: Regiones de El Niño.

1.7. Selva Tropical

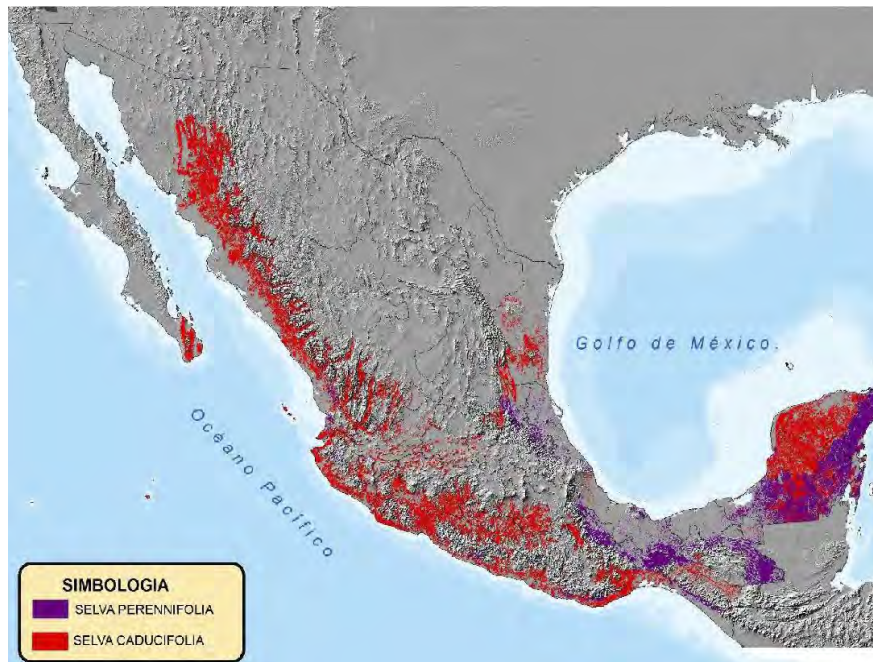
Si bien la variabilidad climática a escala regional resalta por su importancia en las zonas tropicales, al relacionarse con la presencia de eventos climáticos extremos como es el caso de los ciclones tropicales, los cuales pueden suponer un episodio en el que se superan sustancialmente las capacidades de aclimatación de la selva tropical (Décamps, 2008). Tal es el caso reportado por Whigham, Olmsted, Cano, y Harmon (1991), donde mencionan que para el caso de Quintana Roo, dos años posteriores al paso del huracán Gilberto, se tenía reportada una disminución del 33% en el número de individuos y de un 12% en el área basal, y donde los árboles pertenecientes a clases de diámetro pequeño representaron el 96% de los caídos. Por otra parte, no se debe dejar de lado los efectos provocados por perturbaciones generadas por múltiples eventos extremos de origen antropogénico, ante las cuales, la vegetación de tipo selva es cada vez más propensa a sufrir sus efectos, tal es el caso donde en 2017, solo el 20% de las selvas tropicales restantes se consideraron no perturbadas y estructuralmente intactas (Potapov et al., 2017), siendo probable que esta proporción disminuya bajo la presión humana futura (Lewis et al., 2015).

La deforestación representa un proceso de cambio de la cobertura y uso de suelo, pasando de áreas con cubiertas naturales a áreas para el desarrollo urbano, agrícola y pecuario o industrial y comercial (Evangelista et al., 2010; Rosete et al., 2008). El Programa de Evaluación de los Recursos Forestales (FRA por sus siglas en inglés) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés)

la define como “la conversión de los bosques a otro tipo de uso de la tierra o la reducción permanente de la cubierta de dosel, por debajo del umbral mínimo del 10 por ciento” (FRA, 2015).

En México, las estimaciones de las tasas de deforestación para el periodo 1990-2000 fueron de 0.5% (354,000 ha/año), mientras que para el periodo 2005-2010, éstas fueron del orden de 0.24 % (155,000 ha/año), (FAO, 2010). A nivel nacional, de acuerdo con La información de uso del suelo y vegetación correspondiente a la Serie VI publicada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2017a), de 1985 a 2014, la vegetación primaria ha tenido una pérdida cercana al 20%, mientras que la vegetación secundaria muestra un incremento alrededor del 30%. La tendencia hacia la baja (pérdida de vegetación) se estabilizó a partir del año 2002 (INEGI, 2017a).

Con respecto a la vegetación de tipo selva, en el periodo 1985-2014, las pérdidas reportadas por el INEGI (2017a) fueron del orden del 30%, teniendo la mayor tasa entre 1985 y 2002, para posteriormente reducirse y tender a la estabilización. Las selvas perennifolias y caducifolias ocupan cerca del 17% del territorio nacional. Siendo éstas, el tipo de vegetación predominante en la península de Yucatán (Figura 6).



Fuente: Distribución de la vegetación primaria de tipo selva, (INEGI, 2017a).

Figura 6: Distribución de las selvas perennifolias y caducifolias.

De acuerdo con INEGI, (2017a), el sistema de clasificación utilizado en la Serie VI de información de Uso del Suelo, se basa en la adaptación de los trabajos realizados por: Miranda y Hernández-X. (1963); Rzedowski (1978) y, Rzedowski y de Rzedowski (2005). Organizando la información en grupos y tipos de vegetación, donde el primer orden corresponde a los grupos, los cuales integran la vegetación con afinidad ecológica y fisonómica, y como tipos de vegetación, se refiere a las diferentes agrupaciones vegetales (INEGI, 2017b).

- Grandes grupos de vegetación (pérdida de follaje anual): selva perennifolia (0%), selva subcaducifolia (del 50% al 75%) y selva caducifolia (más del 75%).
- Tipos de vegetación: selvas alta, mediana y baja perennifolia, selvas alta, mediana y baja subperennifolia, selvas mediana y baja caducifolia y selvas mediana y baja subcaducifolia. Donde: Alto = mayor a 30 metros, Mediana = entre 15 y 30 metros y Baja = de 4 a 14 metros.

El cambio climático en la selva tropical

Uno de los servicios ecosistémicos más relevantes provisto por las selvas y bosques es la regulación del clima dado su rol en el ciclo del carbono, por lo que su funcionamiento se encuentra intrínsecamente relacionado. La selva tropical —por delante de los bosques templados— representan el mayor depósito terrestre natural de carbono, donde los árboles tropicales cumplen con la función de sumideros⁴. Su deterioro y destrucción propician la liberación a la atmósfera de grandes volúmenes de CO₂ en ellos almacenados, disruptiendo la cadena natural del ciclo (Granados, 2007; Seymour y Busch, 2016). Las selvas tropicales a nivel mundial almacenan aproximadamente 470 millones de toneladas del carbono terrestre, valor cercano al doble del acumulado en la atmósfera desde comienzos de la revolución industrial (IPCC, 2013).

La selva tropical de la península ocupa una superficie aproximada de 11 millones de hectáreas (FCCPY, 2020) que alberga una alta riqueza de recursos naturales, por lo que, desde los años 70, ha sido objeto constante de degradación derivado del continuo desarrollo económico y crecimiento poblacional de la región (Challenger y Soberón, 2008).

⁴ Los sumideros son espacios que absorben más carbono del que expulsan y que por lo tanto reducen la cantidad de carbono emitido a la atmósfera (Granados, 2007).

Procesos que se originan a partir de programas federales de desmontes, colonización e impulso agropecuario, aunado a la promoción del desarrollo turístico de Cancún y la Riviera Maya en el estado de Quintana Roo, lo que se tradujo en un permanente proceso de pérdida y deterioro de los ecosistemas costeros, integrados por dunas, manglares, selvas y con la respectiva amplia biodiversidad que la conforma (Challenger y Soberón, 2008).

De acuerdo con (Ellis et al., 2015) la península presentó una pérdida de la cobertura forestal de 279,152 ha en el período 2001-2013. Datos del *Programa Especial de Cambio Climático* (PECC, 2014), estiman en 12.4% el total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) nacional para 2006, de los cuales entre 8 y 11% corresponden a las actividades relacionadas con la deforestación y degradación forestal —cambios de uso—. Aunado a lo anterior, los efectos asociados al calentamiento global, representan una amenaza emergente para la persistencia y el funcionamiento de los ecosistemas tropicales (Murray-Tortarolo et al., 2016), lo que está revirtiendo la función de las selvas al convertirse en fuentes emisoras, desplazando la función original como reservorios y sumideros de carbono (Seymour y Busch, 2016).

Las principales presiones sobre la selva tropical están asociadas a la extracción selectiva de plantas, introducción de especies invasoras, fragmentación de las selvas⁵, explotación de acuífero, calentamiento global, cambios en la composición atmosférica y en la tasa de reposición de los árboles (Granados, 2007).

Los escenarios del Atlas de cambio climático de la península de Yucatán alertan sobre dos situaciones graves para la región y de consecuencias directas para la cobertura forestal: cambios drásticos en la distribución de los tipos de climas y el incremento de la superficie para las zonas áridas (Orellana et al., 2009), por lo que, para contrarrestar tales efectos es necesario llevar a cabo acciones tendientes a la reducción de las emisiones de GEI derivadas de la deforestación y degradación de la selva, al tiempo que se apliquen acciones de conservación y de manejo sustentable (Benavides, G. et al., 2017).

Para enfrentar esta situación se pone en marcha el programa para la *Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación* (REDD+) (INECC, 2019), del cual se deriva la

⁵ La fragmentación de selvas por deforestación incrementa hasta en un 40% la mortalidad de los árboles adultos (Granados, 2007).

Estrategia REDD+ del Estado de Quintana Roo. Estos programas tienen como objetivo primordial la reducción de emisiones derivadas de la deforestación y degradación de las selvas —medidas de mitigación— y la protección y conservación a través del manejo sustentable de las selvas — medidas de adaptación—, con lo que se busca reducir la vulnerabilidad e incrementar la resiliencia de los ecosistemas y las poblaciones (Benavides, G. et al., 2017).

Los vientos asociados a huracanes extremos provocan daños en la estructura de las selvas, generando enormes cantidades de materia orgánica, que durante la época de secas pueden convertirse en combustible para la generación de incendios forestales (Pereira-Corona et al., 2013). Esta situación se vería agravada, toda vez que, de acuerdo con los modelos de circulación general (MCG) realizados por (Appendini et al., 2019), existe una clara tendencia a que eventos ciclónicos de mayor intensidad se vuelvan más frecuentes debido al CG.

Por otro lado, dada la relación funcional entre las selvas tropicales como contenedores de carbono y reguladores del clima, cualquier alteración en ambos sistemas tendrá graves repercusiones en el funcionamiento del otro, es decir, los cambios en el clima global aumentan la vulnerabilidad de las selvas para cumplir con su función como repositorios de carbono (Seymour y Busch, 2016).

En el caso específico de México, para que cumpla con su contribución a las metas del acuerdo de París —limitar a 2 °C el aumento de la temperatura— es indispensable atender la degradación de la selva tropical, a través de medidas de mitigación y adaptación que permitan garantizar la estabilidad y la salud de estos ecosistemas y de los servicios ecosistémicos que de ellos se obtienen. La protección, conservación y restauración de la selva, tendrán un impacto directo en los esfuerzos para alcanzar las metas de los ODS's 2, 3, 6, 7, 13, 14 y 15⁶.

Vegetación terrestre vs costera

⁶ ODS's: 2.hambre cero; 3.salud y bienestar; 6.agua limpia y saneamiento; 7. Energía asequible y no contaminante; 13. Acción por el clima; 14. Vida submarina; 15. Vida de ecosistemas terrestres.

La península de Yucatán está conformada por una extensa superficie llana con variaciones altitudinales poco significativas, sobre un complejo sistema kárstico, el cual debido a sus características forma conductos y cavernas a través de las que fluye el agua subterránea, lo que caracteriza a la península por la ausencia de corrientes superficiales (Pérez-Ceballos et al., 2012). El acuífero kárstico representa por un lado el principal reservorio de agua dulce de la península al tiempo que conforma una compleja red subterránea que interconecta los diversos ecosistemas que abarcan desde el interior (tierra adentro) hacia la costa, selvas altas, medianas y bajas, lagos kársticos de agua dulce, lagunas salobres, lagunas costeras estuarinas hasta lagunas de arrecifes (Hernández-Arana et al., 2015).

Hernández-Arana et al. (2015) denominan a este sistema de conexión subterránea como: “Corredor costero transversal”, el cual está conformado por intrincada red de interconexión subterránea que ha dado como resultado la conformación de sistemas costeros únicos en su tipo caracterizados por el intercambio de energía y materiales a través de conductos transversales que van desde tierra adentro hasta las zonas costeras. Siendo particularmente para la región, la conectividad hidrológica la más importante para los ecosistemas fluviales, costeros y terrestres (Freeman et al., 2007).

Las amenazas naturales, principalmente las relacionadas con el impacto de tormentas y huracanes que alteran y modifican la hidrodinámica de la cuenca y las aguas subterráneas; promoviendo el intercambios e interacciones físicas, químicas y biológicas a través del corredor transversal desde los ambientes terrestres hasta las zonas costeras (Hernández-Arana et al., 2015).

Gavin et al. (2015) hacen énfasis en que la conservación y la gestión de los recursos naturales requiere un enfoque multidimensional y cuyas estrategias para alcanzar los objetivos planteados deben considerar que el proceso de conectividad puede representar un factor determinante para la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas.

1.8. Índice espectrales

a. Índice Normalizado de Vegetación (NDVI)

A partir de hace poco más de medio siglo, con el desarrollo de instrumentos capaces de obtener datos de la superficie terrestre desde el espacio (percepción remota) con

sensores diseñados para registrar diferentes rangos del espectro electromagnético, se ha visto un aumento en la combinación algebraica de bandas espectrales, lo que se ha denominado como “índices”, entre ellos se han desarrollado varios capaces de detectar variaciones en la cubierta vegetal, por lo que reciben el nombre de “índices verdes”. Tales combinaciones son capaces de proveer valiosa información sobre la estructura de la vegetación, el estado de la cubierta vegetal, la capacidad fotosintética, la densidad y distribución de las hojas y el contenido de agua en las hojas (Yengoh et al., 2016).

La cantidad de índices de vegetación que se han desarrollado a lo largo del tiempo supera los 150, sin embargo, pocos de ellos han sido corroborados y aprobados de forma sistemática (Bennett et al., 2012; Higginbottom & Symeonakis, 2014; Verrelst et al., 2006).

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), forma parte de los denominados “Índices Verdes”, siendo uno de los más antiguos y conocidos, utilizado ampliamente en la detección de cambios espacio-temporales de la vegetación (Gilabert et al., 1997) y para estimar la degradación de la tierra (Rishmawi & Prince, 2016). Ejemplo de ello fue el trabajo desarrollado por “La Evaluación Global de Degradación de la Tierra”, en la cual se identificó la degradación en función de los cambios en el verdor de la vegetación (medido por el NDVI) y la eficiencia del uso de la lluvia de 1981–2006 (Yengoh et al., 2016). Así mismo, Achard et al. (2007) indican que, este es “utilizado para identificar e interpretar una gama de métricas fenológicas que describen eventos periódicos del ciclo de vida de las plantas y cómo estos están influenciados por variaciones estacionales e interanuales en el clima y el hábitat”.

El NDVI fue propuesto por Rouse, Hass, Schell, y Deering (1973) como la diferencia normalizada de dos bandas espectrales, cuya variación estandarizada queda dentro de los valores -1 a +1.

El NDVI, detecta la actividad fotosintética en la zona para la cual se calcula, los valores cercanos a -1, representan cuerpos de agua profundos, mientras que valores cercanos a +1, representan cubiertas vegetales con crecimiento activo y una cobertura del suelo al 100%, el valor cero significa ausencia de vegetación. Dada la facilidad para su cálculo, el NDVI ha sido ampliamente utilizado en proyectos para la detección de cambios

y estado de la vegetación como son: salud de cultivos, fenología, indicadores de sequías, humedad del suelo, índices de superficie de follaje, monitoreo de carbono, entre otros (Cui et al., 2013; Field et al., 1995; Gómez-Mendoza, 2007; Gómez-Mendoza et al., 2008; Prince & Goward, 1995; Simoniello et al., 2008; Vlek et al., 2010). Para la determinación del NDVI, se requiere contar con dos bandas espectrales: rojo e infrarrojo cercano (Ecuación 1):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde: NIR = Infrarrojo cercano y R = Rojo

Ecuación 1: Determinación del NDVI

El algoritmo del NDVI combina las características de reflectancia donde la vegetación verde refleja menos luz visible y mayor luz en el espectro del infrarrojo cercano (NIR), en contra parte, la escasa vegetación (menor verdor) refleja una menor cantidad de luz en el espectro del infrarrojo cercano (NIR), lo que lo relaciona directamente con la capacidad fotosintética (Achard et al., 2007).

La implementación de técnicas como la del NDVI utilizadas a mayor escala, permiten identificar y estimar la degradación y recuperación del paisaje a través de medidas indirectas de la cubierta de copas de los árboles o la cubierta forestal (Ghazoul & Chazdon, 2017), procesos de deforestación, fragmentación de los bosques, desertificación y el uso no sostenible de la tierra a los cambios en la configuración y la calidad (fragmentación) de la cobertura de las selvas, lo que altera el flujo de especies, nutrientes, energía o materiales, de tal forma, que interrumpen el funcionamiento de los ecosistemas en toda la región (Sloan, 2008).

Las técnicas de detección remota facilitan la estimación de la biomasa, particularmente durante las primeras etapas, lo cual cobra importancia dado que las propiedades funcionales que dan forma a los procesos del ecosistema se encuentran estrechamente relacionados con la acumulación de biomasa (Lohbeck et al., 2015). Indicadores comúnmente considerados en escalas regionales para la estimación de la degradación y recuperación de los ecosistemas incluyen la identificación de paisajes forestales fragmentados, tamaño (dimensiones), distribución, aumento de los bordes de

los hábitats, pérdidas de conectividad y cambios entre las vecindades (Pardini et al., 2010; Zahawi et al., 2015).

Si bien las técnicas a través de la percepción remota ofrecen un amplio potencial para el estudio del territorio, es importante no perder de vista la relación intrínseca entre las capacidades técnicas de resolución de los sensores utilizados y la escala espacial que se pretende estudiar, esto debido a que se corre el riesgo de perder la capacidad de detección de aquellos cambios estructurales que se den en escalas por debajo de las capacidades de los instrumentos utilizados (Shimizu et al., 2017).

La capacidad del sistema ecológico para retornar a estados previos ante la ocurrencia de perturbaciones de gran magnitud, pueden ser estimados considerando como indicadores los recursos ambientales que caracterizan a los ecosistemas, y mediante la implementación de técnicas de percepción remota (Walker et al., 2014), como es el caso del NDVI, el cual, junto con la Productividad Primaria Neta (PPN) del suelo lo convierte en un indicador útil para medir la resiliencia del ecosistema (Renschler et al., 2010).

b. Índice Estandarizado de Precipitación (SPI)

El índice estandarizado de precipitación (SPI) fue desarrollado por McKee et al. (1993) como una herramienta para el monitoreo y diagnóstico de las sequías (Svoboda et al., 2012) y es principalmente utilizado como un indicador espacial que permite estimar la rareza del fenómeno en una escala temporal determinada (Wilhite & Svoboda, 2000). También útil para estimar períodos anómalamente lluviosos.

El índice parte del análisis de los registros de lluvia existentes para evaluar la probabilidad de la precipitación dada en un tiempo y lugar determinados. El SPI corresponde a una transformación estandarizada de la probabilidad de la precipitación observada en escalas temporales, entre las que destacan 3, 6, 12, 24 y 48 meses.

Para el caso de las anomalías de lluvia relacionadas con variabilidad intraestacional, Méndez y Magaña (2010) recomiendan usar SPI-3 o SPI-6. Entre las principales características del índice destacan las siguientes:

- Se relaciona únicamente con la probabilidad de la lluvia.

- Puede ser usado para calcular el déficit de lluvia para el período estimado.
- Representa una distribución normal.
- El SPI está normalizado de modo que climas húmedos o secos son representados de una manera similar para su comparación.

Los valores resultantes del cálculo del índice corresponden a la cantidad de desviaciones estándar que cada registro se desvía del promedio histórico, por lo que los resultados pueden tomar valores tanto positivos, como negativos, lo que a su vez, puede representar un superávit o un déficit de humedad respectivamente. El cálculo del SPI se realiza aplicando la fórmula citada por Agnew (2000), (Ecuación 2):

$$SPI = \frac{X_{ik} - \bar{X}_i}{\hat{O}_i}$$

Dónde: \hat{O}_i = Desviación estándar de estación observada;
 X_{ik} = Precipitación de la estación observada y observación histórica; \bar{X}_i = Precipitación media de la estación observada.

Ecuación 2: Determinación del SPI

Existen diversas escalas para interpretar los valores resultantes del SPI, entre las que destacan la escala propuesta por Haslinger, Koffler, Schöner, & Laaha (2014), la cual distingue entre períodos húmedos y secos (Cuadro 7). Otra escala de interpretación es la del National Drought Mitigation Center (2006), la cual se enfoca en categorizar las condiciones de sequía derivadas del déficit de lluvia y los posibles impactos (Cuadro 8).

Cuadro 7: Clasificación del Índice normalizado de precipitación.

SPI	Clase
2,0 y más	Extremadamente húmedo
1,5 a 1,99	Muy húmedo
1,0 a 1,49	Moderadamente húmedo
-0,99 a 0,99	Normal o aproximadamente normal
-1,0 a -1,49	Moderadamente seco
-1,5 a -1,99	Severamente seco
-2 y menos	Extremadamente seco

Fuente: Haslinger et al. (2014).

Cuadro 8: Clasificación de la sequía de acuerdo a valores de SPI.

Categoría	Posibles Impactos	Rango de SPI
Condición normal	Condiciones normales de precipitación.	0 a -0.5

seco		
Condición anormal seco	Inicia la sequía, período corto en que se secan lentamente las siembras, cultivos y pastizales, empieza a haber peligro de incendios, déficit de agua, pasturas y cultivos no se recuperan completamente.	-0.5 a -0.8
Sequía moderada	Algo de daño a cultivos y pastizales, riesgo alto de incendio. Corrientes, represas y pozos con bajo nivel de agua, escasez de agua inminente, lo que implica la petición del cuidado del agua.	-0.8 a -1.3
Sequía severa	Posible pérdida de cultivos y pastos, riesgo de incendio alto, escasez de agua común, restricciones en el uso del agua.	-1.3 a -1.6
Sequía extrema	Pérdida mayor de cultivos/pasto, peligro extremo de incendios, restricciones estrictas de uso del agua.	-1.6 a -2.0
Sequía excepcional	Pérdida de cultivos/pasto excepcional y extendida, riesgo inminente de incendios, escasez de agua en represas, corrientes y pozos, creación de un estado de emergencia	-2.0 o menor

Fuente: National Drought Mitigation Center (2006)

c. Anomalías estandarizadas

Para poder analizar e interpretar los cambios estacionales y los vértices obtenidos a partir de la aplicación del modelo LT-GEE, se determinaron las anomalías estandarizadas del NDVI, lluvia, temperatura de la superficie terrestre y puntos de calor.

De acuerdo con Wilks (2011) este tipo de transformación resulta especialmente útil cuando se trata de comparar variables que pueden estar relacionadas, pero cuyas dimensiones no son estrictamente comparables. La anomalía estandarizada (Z) se calcula restando la media muestral de los datos brutos X , divididos entre la desviación estándar (σ) de la muestra correspondiente (Ecuación 3).

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x}$$

Dónde: Z = anomalía estandarizada; x = valor a normalizar; \bar{x} = media o promedio muestral; y σ = Desviación estándar muestral.

Ecuación 3: Determinación del coeficiente de correlación de Pearson

En el caso del NDVI, el método pretende caracterizar la condición de la vegetación de un instante dado, con relación a la media histórica del periodo (considerada como condición normal), de forma tal, que valores positivos de las anomalías del NDVI (aNDVI) representan un aumento en el vigor de la vegetación, mientras que valores negativos un estado inferior al esperado por la media.

En general, la normalización trata de eliminar las influencias de la ubicación y la dispersión de una muestra de datos. Entre las características de este procedimiento

destaca que los valores resultantes presentan unidades adimensionales y que la muestra estandarizada exhibirán una media de cero y una desviación estándar de uno.

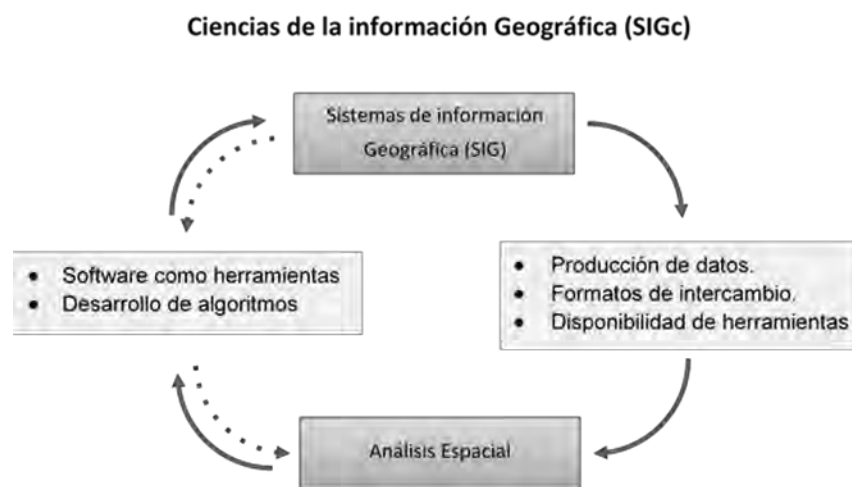
CAPÍTULO II. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología y los modelos considerados para alcanzar los objetivos planteados.

Marco de las ciencias de la información geográfica (SIGc)

El proyecto se desarrolla en el marco de las ciencias de la información geográfica (SIGc), el cual incorpora el concepto de “análisis espacial”, que tiene como principio utilizar información de localización y ubicación mediante técnicas estadísticas que permitan comprender los procesos que generan los valores de los atributos observados, reconociendo que estos en su mayoría poseen propiedades espaciales (Fotheringham & Rogerson, 2009).

De acuerdo con Goodchild (1992), en la literatura es común la generalización del término Sistema de información Geográfica (SIG) para referirse tanto a las “ciencias de la información geográfica”, “Análisis espacial” y por ende, a los “sistemas de información geográfica”. Para aclarar las diferencias, Goodchild (2000), define los sistemas de información geográfica como “un sistema para crear, almacenar, manipular, visualizar y analizar información geográfica”. Por su parte, Fotheringham y Rogerson (1993), especifican que el análisis espacial, es inherente a los procedimientos analíticos que permitan revelar, caracterizar y analizar patrones y procesos explícitamente espaciales (Figura 7).

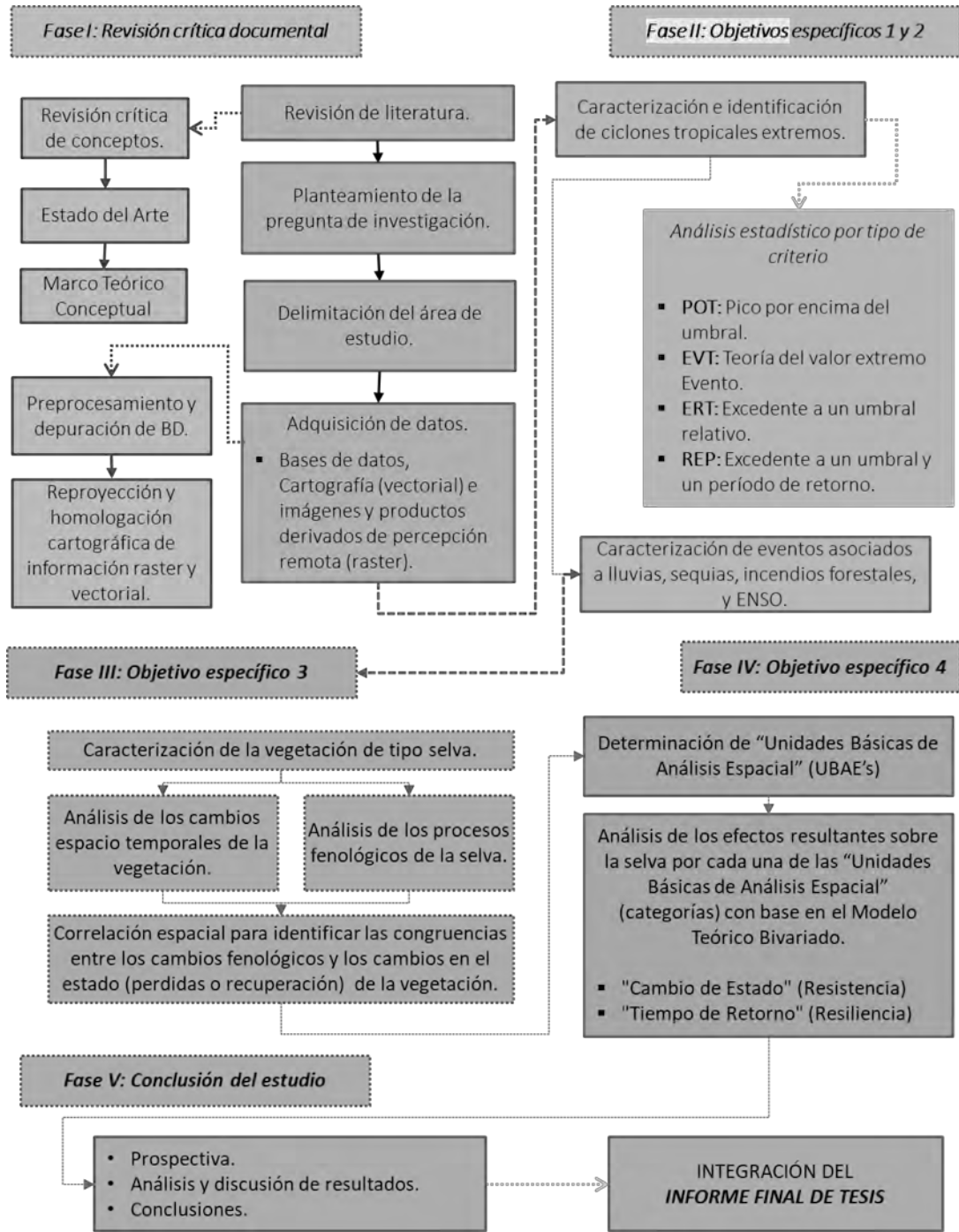


Fuente: Adaptado de: Martin (2009).

Figura 7: Relación entre las ciencias y sistemas de información geográfica, y el análisis espacial.

Diagrama metodológico

Para responder y cumplir con cada uno de los objetivos planteados en la investigación, los trabajos se dividieron en cinco (5) fases principales. En la Figura 8, se presenta el diagrama metodológico propuesto, clasificado por fases.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8: Diagrama metodológico general.

Los métodos, técnicas y datos propuestos para cada una de las fases programadas se presentan a continuación:

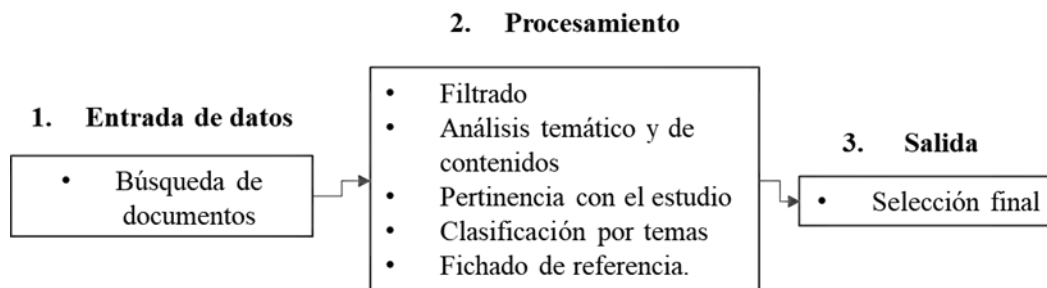
II.1. Primera fase: Revisión crítica de información

a. Investigación documental

Se llevó a cabo una revisión crítica de los conceptos que conforman el marco teórico y el estado del arte del tema de la investigación, basando la búsqueda de publicaciones científicas en el sistema del Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica (CONRICYT) y el buscador *SCIENCE DIRECT*, así como en diversas instituciones gubernamentales, académicas y de investigación nacionales y extranjeras. A partir de los documentos adquiridos

Se revisaron los resúmenes y contenido de cada uno de ellos para identificar la relevancia con relación al presente estudio, posteriormente, se clasificaron por temas y se procedió a una lectura crítica de cada documento con la finalidad de identificar las diferentes perspectivas teóricas y conceptuales en torno al tema central de la presente propuesta de investigación. Finalmente se efectuó el fichado de referencia para cada caso.

Como resultado de la revisión crítica de la información se generó el estado del arte en torno al tema, lo que permitió consolidar y validar la pregunta de investigación y el enfoque propuesto para el estudio. Lo anterior se llevó al cabo siguiendo el proceso sugerido por Levy y J. Ellis (2006), integrado por tres etapas como se muestra en la Figura 9:



Fuente: Adaptado de Levy y J. Ellis (2006).

Figura 9: Etapas del proceso de revisión de la literatura

Finalmente se integró el marco teórico-conceptual del estudio, los conceptos y algunos de los autores considerados en cada uno de los temas principales se muestran en el Cuadro 9.

Cuadro 9: Conceptos y ejemplos de autores consultados

Conceptos	Autores
<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo sostenible 	(ONU, 2016); (Allen et al., 2016); (Oliveira Neto et al., 2018); (Gusmão Caiado et al., 2018); (Purvis et al., 2018).
<ul style="list-style-type: none"> • Resiliencia <ul style="list-style-type: none"> ● Resistencia ● Adaptabilidad ● Tasa de recuperación 	(Holling, 1973); (Holling, 1996) (Calvente, 2007); (Gómez-Mendoza, 2004); (Connell & Ghedini, 2015); (Brand & Jax, 2007); (Becoña Iglesias, 2006); (Calvente, 2007); (Zhou et al., 2010); (Reyes & Ballesteros, 2011); (Youn et al., 2011); (Proag, 2014); (Hodgson et al., 2015, 2016); (Nimmo et al., 2015); (Palekiene et al., 2015); (Allen et al., 2016); (Connell et al., 2016); (Sundstrom et al., 2016); (Yeung & Richardson, 2016); (Oliver et al., 2016); (Hosseini et al., 2016); (Peng et al., 2016); (Cerè et al., 2017); (Pereira-Lindoso, 2017); (Parker et al., 2018); (Ingrisch & Bahn, 2018); (Pillay, 2018).
<ul style="list-style-type: none"> • Eventos climáticos extremos • Eventos extremos 	(de Bruijn et al., 2017); (van de Pol et al., 2017); (Wang et al., 2017); (Camuffo et al., 2018).
<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo <ul style="list-style-type: none"> ● Amenaza (peligro) ● Vulnerabilidad ● Adaptabilidad 	(Bogardi et al., 2005); (Hinkel, 2011); (Proag, 2014); (Kelman et al., 2016); (Reyes Rivero et al., 2017); (Peña Alzate & Cañón Barriga, 2017); (Cai et al., 2018); (Berrouet et al., 2018).
<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas socioecológicos 	(Castillo-Villanueva & Velázquez-Torres, 2015); (Peña Alzate & Cañón Barriga, 2017); (Balvanera et al., 2017); (Berrouet et al., 2018).
<ul style="list-style-type: none"> • Perturbación <ul style="list-style-type: none"> ● Degradación ● Deforestación ● Restauración 	(Cruz-Huerta et al., 2015); (Everham & Brokaw, 1996); (FRA, 2015); (Islam et al., 2001); (Chazdon, 2003); (Bai et al., 2008); (Burger et al., 2008); (Sloan, 2008); (Bonilla-Moheno, 2010); (de Jong et al., 2011); (Cole et al., 2014); (Ghazoul et al., 2015); (Ghazoul & Chazdon, 2017); (Bahamondez & Thompson, 2016); (Moreno-Mateos et al., 2017); (Piponiot et al., 2018).

Fuente: Elaboración propia.

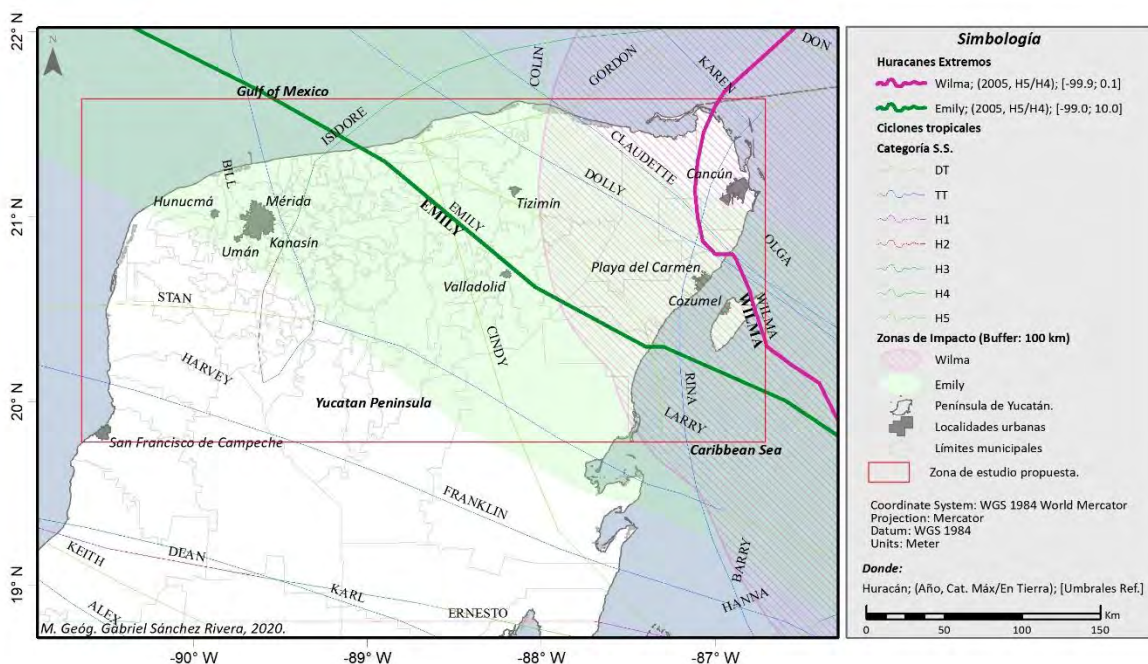
b. Área de estudio

La península de Yucatán se localiza entre los 17.8° y 21.6° de latitud norte y, los 86.7° y 92.4°, la rodean hacia el norte el Golfo de México y hacia el este el Mar Caribe, su relieve es escaso presentando las mayores altitudes (300 m) en la meseta tectónica de Zoh Laguna (Vidal-Zepeda, 2005), (Figura 10).

De acuerdo con INEGI (2009) la región presenta como tipos de vegetación predominantes selvas, pastizales, vegetación agrícola e hidrófila. Dos tipos de climas predominan, el primero de tipo cálidos húmedos al oriente, con intervalo de temperatura promedio de 24 a 26 °C y el segundo, muy cálidos, al occidente con temperaturas entre 26 y 28 °C. Septiembre es el mes de mayores lluvias (superiores a 200 mm) generalmente asociados a ciclones tropicales.

De acuerdo con la Clasificación del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Jiménez-Espinosa et al., 2003), la península se cataloga como de riesgo alto a la incidencia de ciclones tropicales entre los meses de junio a octubre, ya que pertenece a la zona ciclogénica del Atlántico Norte, donde se generan los ciclones tropicales del Caribe.

Durante los meses de noviembre a abril se presentan lluvias escasas asociadas a los “nortes” (Orellana et al., 2009; Vidal-Zepeda, 2005). Entre los principales ciclones que han impactado contra la península, destacan el huracán *Janet* en 1955, el cual causó daños en la zona sur del estado de Quintana Roo. El huracán *Gilbert* en 1988, cuyos efectos provocaron daños en la zona norte de Quintana Roo, particularmente en la Ciudad de Cancún y zonas aledañas, y el huracán *Wilma* en la temporada 2005, impactando los municipios de Cozumel, Solidaridad y Benito Juárez, con vientos máximos sostenidos registrados en tierra del orden de los 222 km/h y un recorrido por tierra de aproximadamente 100 km.



Fuente: elaboración propia, con datos del IBTrACS, 2019

Figura 10: Delimitación del área de estudio

c. Adquisición y preprocesamiento de datos

La información requerida para realizar el proyecto, como son bases de datos, materiales cartográficos (vectoriales y *Raster*) y diversos productos derivados de percepción remota (según sea el caso), se adquirieron a través de la búsqueda de publicaciones provenientes de instituciones gubernamentales, académicas y de investigación, entre las que se cuentan entre otras: CENAPRED, INEGI, SEMARNAT, UNAM, CONABIO.

De igual manera se consultaron imágenes y productos derivados de satélites de percepción remota, así como de bases de datos provenientes de instituciones académicas y/o gubernamentales que contienen información relacionada con la presencia y efectos de eventos extremos naturales y antrópicos en la zona de estudio.

Los datos adquiridos para cada una de las fases que conforman el estudio se describen a detalle en las secciones correspondientes.

Las bases de datos y materiales cartográficos fueron sometidas a un preproceso para su validación y homologación. En el caso de las bases de datos se verificaron los contenidos, congruencia y origen de la información, en aquellos casos que lo requirieron

se efectuaron las conversiones al Sistema Internacional de Unidades (Ley Federal Sobre Metrología y Normalización Capítulo Único, 2012)

Con respecto a los materiales cartográficos además de corroborar su origen y validar la información presentada, se procedió a la reproyección y homologación cartográfica, Dependiendo de las escalas se utilizaron las proyecciones: Universal Transversa de Mercator (UTM) y Cónica Conforme de Lambert (CCL), en conformidad con lo recomendado por INEGI (1987) para estudios de carácter regional.

Los productos derivados de imágenes satelitales utilizados para la identificación de los eventos en categoría de extremos considerados en el presente estudio, fueron adquiridas y procesadas a través de las plataformas Giovanni (NASA, 2021) y Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017), las cuales ofrecen amplios repositorios de productos derivados de imágenes satelitales y robustas capacidades para el manejo de información geoespacial basada en la nube.

Para la operaciones de carácter cartográfico local, se utilizaron como herramientas los sistemas de información geográfica QGIS 3.2 (QGIS Development Team, 2022) y Arcgis (ESRI, 2022).

II.2. Segunda fase: Eventos hidrometeorológicos extremos

Las actividades desarrolladas en esta segunda fase permitieron cumplir con los objetivos específicos 1 y 2, los cuales consistieron en identificar las perturbaciones hidrometeorológicas extremas y sus principales características (tipo de evento extremo, localización geográfica, frecuencia e intensidad). Los eventos extremos considerados se clasifican según su origen en ciclones tropicales, lluvias, sequías e Incendios forestales.

a. Ciclones tropicales

Para el cumplimiento de este objetivo se llevó a cabo un análisis de muy largo plazo sobre la actividad ciclónica en la cuenca del Atlántico Norte (CAN), lo cual permitió la caracterización de los ciclones extremos, de acuerdo con los criterios de la *World Meteorological Organization* (WMO, 2018), quien plantea que los acontecimientos considerados como “raros”, son los que superan los percentiles 90 y 95, mientras que los

considerados como “muy raros” excederían el rango de 99 o superiores. Por lo que se incluyó un criterio de referencia adicional (umbral extremo) del orden de 0.1 y 99.9 percentiles, con ello se buscó identificar eventos que puedan ser considerados como “extraordinariamente raros”.

La información sobre las características físicas y la trayectoria de cada ciclón se obtuvieron de los registros de los ciclones ocurridos en los últimos 168 años de la base de datos del *International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS, 2019a), versión “v04r00” del 08-09-2019. Los archivos se presentan en formato alfanumérico y vectorial, los cuales contienen 119,626 registros individuales que conforman 2,220 meteoros reportados entre el 23-06-1851 y el 05-09-2019.

Los datos son el resultado del reanálisis posterior a la temporada de ciclones, cuando se procesa toda la información disponible para cada evento, por lo que el registro histórico no es homogéneo en su construcción (Kenneth R. Knapp & Kruk, 2010), adicionalmente, el origen de los registros provenientes de diversas fuentes históricas elaboradas a partir de distintas técnicas y rangos de precisión, presentan diferentes variaciones espacio-temporales de origen en función de las agencias y fuentes de procedencia (K. R. Knapp et al., 2018).

Se consideran como variables de análisis la “velocidad máxima de vientos sostenidos” y “mínima presión atmosférica”. En el caso de la velocidad del viento el grado de incertidumbre medida en nudos disminuye temporalmente, pudiendo alcanzar los siguientes niveles máximos: años anteriores a 1965 de ± 30 , 1965 – 1978 de ± 20 ; 1978 – 1984 de ± 15 ; 1984 – 2000 de ± 10 ; y del 2000 a la fecha, baja a los ± 7 nudos. La presión atmosférica oscila en el orden de 1 mb y la posición se reporta a una resolución aproximada de 0.1° , lo que deriva en una incertidumbre de ± 10 km aproximadamente (IBTrACS, 2019b).

Con respecto a la presión atmosférica, la principal fuente de registros comienza a partir de finales de la Segunda Guerra Mundial con el uso de aeronaves tripuladas provistas de sensores para su medición y posteriormente con la incorporación de los satélites en la década de los 60's, por lo que destaca la ausencia de datos para más del

50% de los ciclones registrados en la CAN. Adicionalmente, variaciones espaciales también pueden presentarse como consecuencia de la intensidad de los fenómenos ciclónicos (Kruk et al., 2010).

Para identificar los ciclones que tocaron tierra, se utilizaron como referencia los archivos vectoriales de las costas a nivel mundial de la: “*A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database*” (Wessel & Smith, 1996, 2017) y los polígonos que delimitan la CAN y las subcuencas del Golfo de México y Mar Caribe del *Flanders Marine Institute* (2018).

Para la caracterización de los eventos extremos se aplicó el modelo estadístico “*excedente a un umbral relativo (exceeding a relative threshold)*”, propuesto por la WMO (2018) y reportado por Camuffo et al. (2018), tomando como referencia tres conjuntos de umbrales basados en los percentiles propuesto por el IPCC (2012, 2014) y Camuffo, della Valle, y Becherini (2018). El procedimiento utilizado fue el siguiente:

1: Procesamiento de datos. Se diseñó una base de datos correlacional en el programa *MS-Access* y mediante el lenguaje *SQL* se generaron diversas consultas para la clasificación y análisis de los meteoros, como son: número de eventos por año, por mes, por categoría, entre otras. La identificación de las zonas de impacto se realizó a través del geoprocesamiento de las capas vectoriales en el programa *ArcGis 10.3*, clasificándolas en cuatro clases: *a)* no tocaron tierra; *b)* impactaron tierras continentales e insulares; *c)* impactaron tierras mexicanas; y *d)* impactaron la península de Yucatán. Los resultados fueron integrados en la base de datos para la generación de consultas por tipo de zona de impacto.

2: Selección de modelos, variables y parámetros de referencia. Para identificar los patrones de tendencia de los eventos analizados, se aplicaron los modelos estadísticos de tasas de cambio, regresión lineal (mínimos cuadrados) y cálculo de coeficientes de correlación lineal de *Pearson* y *Spearman*. En la caracterización de la actividad ciclónica extrema se seleccionó el modelo “*excedente a un umbral relativo*”, considerando las variables “*velocidad de viento*” y “*presión atmosférica*”, tomando como umbrales de referencia los percentiles 10-90; 1-99 y 0.1-99.9.

A diferencia de la escala *Saffir-Simpson*, la cual estima los impactos socio-económicos y pérdidas de vidas humanas, el modelo estadístico propuesto, permite la caracterización de cualquiera de los eventos analizados en el presente estudio con base a la probabilidad de su ocurrencia, medida en función de los parámetros físicos y/o características específicas que los definen.³: *Análisis estadístico*. a) identificación de tendencias de cambio del número e intensidad de los ciclones, a través de consultas en la base de datos correlacional para la clasificación espacio-temporal, por décadas, categorías (intensidad) y zonas de impacto. los datos se exportaron al programa estadístico *MiniTab* para calcular la estadística descriptiva básica por variable de análisis, la función de densidad de probabilidad, las tasas de cambio en función de la ecuación de la línea de tendencia y los modelos de regresión y correlación lineal, lo que permitió estimar la distribución anual del número de ciclones vs intensidad y velocidad del viento vs presión atmosférica; b) identificación y caracterización de los huracanes extremos a partir del modelo “*excedente a un umbral relativo*” en dos niveles: i) variables independientes (velocidad del viento y presión atmosférica) y ii) variables compuestas (velocidad del viento vs presión atmosférica), contrastando los conjuntos de “*umbrales de referencia*” vs “*variables de análisis*”; y c) consultas en la base de datos correlacional para la identificación de huracanes extremos sobre la PY.

De este componente se obtuvo como subproductos de la presente investigación dos publicaciones, las cuales pueden ser consultadas en: Sánchez-Rivera et al. (2021b, 2021c).

b. Lluvias y Sequías

Los patrones de lluvia durante el período de estudio se analizaron a partir de la información de la base de datos *Global Precipitation Measurement (GPM) v6* (Huffman et al., 2019a), disponibles desde la plataforma Giovanni de la NASA (NASA, 2021).

Para estimar los períodos de sequía se utilizó como parámetro de referencia, la serie de tiempo del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) calculado a 3 meses (SPI-3M). La información fue adquirida de la base de datos de la

biblioteca de datos climáticos del *International Research Institute for Climate and Society* (IRI, 2022).

La caracterización de las lluvias y períodos de sequía como eventos extremos en función de su probabilidad de ocurrencia e intensidad, se obtuvo a través de la aplicación del modelo “excedente a un umbral relativo”, con umbrales de referencia de 99.9 percentiles, para los casos considerados “extremadamente raros” y 95.0 para “muy raros” (Sánchez-Rivera et al., 2021b).

El análisis de las lluvias como eventos extremos fue presentado en el Congreso Mesoamericano de Investigación UNACH, 2021, y el resumen puede ser consultado en (Sánchez-Rivera et al., 2021e).

c. Incendios forestales

Para estimar la cantidad de incendios ocurridos en la zona norte de la península, se utilizaron los datos de puntos de calor del *Fire Information for Resource Management System* (FIRMS) de la NASA (FIRMS, 2022), disponibles desde la plataforma *Google Earth Engine* (GEE).

Se adquirieron y procesaron desde GEE, 7,268 imágenes diarias, las cuales fueron agrupadas en períodos mensuales y filtradas para descartar la información con índice de confiabilidad menor al 80%.

Para la caracterización de los eventos en categoría de extremos en función de su probabilidad de ocurrencia e intensidad, se obtuvo a través de la aplicación del modelo “excedente a un umbral relativo”, con umbrales de referencia de 99.9 percentiles, para los casos considerados “extremadamente raros” y 95.0 para “muy raros” (Sánchez-Rivera et al., 2021b).

II.3. Tercera fase: Caracterización de la vegetación de tipo selva

Para dar cumplimiento con el objetivo número 3, se tomó como base el continuo nacional de “Uso del suelo y vegetación (USV), escala 1:250,000” de las series II a VI publicadas por el INEGI y pos-procesadas por el Programa Mexicano del Carbono (PMC, 2022).

El análisis de los cambios espacio-temporales de uso de suelo y vegetación de la selva, se realizó a través de un análisis espacial, tomando el método propuesto por Rosete et al. (2008), el cual supone dos pasos principales: a) detección e interpretación cartográfica y digital del cambio, y b) análisis de los patrones de cambio de cobertura y uso del suelo.

Para tasar los cambios en la vegetación de tipo selva, primeramente se procedió a la reclasificación de la información en 11 clases. Posteriormente, se estimaron los cambios en la cobertura por categoría vegetal, entre cada una de las series y el cambio total a partir de la comparación de las series II.5 y VI.5. Los cálculos se realizaron utilizando los métodos propuestos por Palacios-Prieto et al. (2004). La fórmula utilizada para determinar la tasa de deforestación fueron la siguiente (Ecuación 4):

$$\delta n = \left[\frac{S_2}{S_1} \right]^{1/n} - 1$$

Dónde: δn = tasa de cambio; S_1 = superficie en la fecha 1;
 S_2 = superficie en la fecha 2; n = número de años
entre las dos fechas. (FAO, 1996)

Ecuación 4: Tasa de deforestación

II.4. Cuarta fase: Resiliencia de la vegetación

El análisis e identificación de efectos resultantes de la interacción de múltiples eventos extremos sobre la vegetación de tipo selva, se realizó a través de la cuantificación de los cambios en la cobertura, tomando como criterio principal, la respuesta fotosintética de la vegetación, la cual se estimó mediante el análisis de series de tiempo del NDVI (IRI, 2019), lo que permitió evaluar la degradación de suelo y mediante el monitoreo de los cambios en la vegetación (Albalawi & Kumar, 2013; Anyamba & Tucker, 2005; Bai et al., 2008; Cook & Pau, 2013; de Jong et al., 2011; Shalaby & Tateishi, 2007; Symeonakis & Drake, 2004; Townshend et al., 2012).

En esta etapa del estudio se utilizaron productos derivados de imágenes satelitales, los cuales fueron adquiridos y procesados desde la plataforma de análisis espacial basada en la nube Google Earth Engine, las colecciones utilizadas⁷ fueron las siguientes:

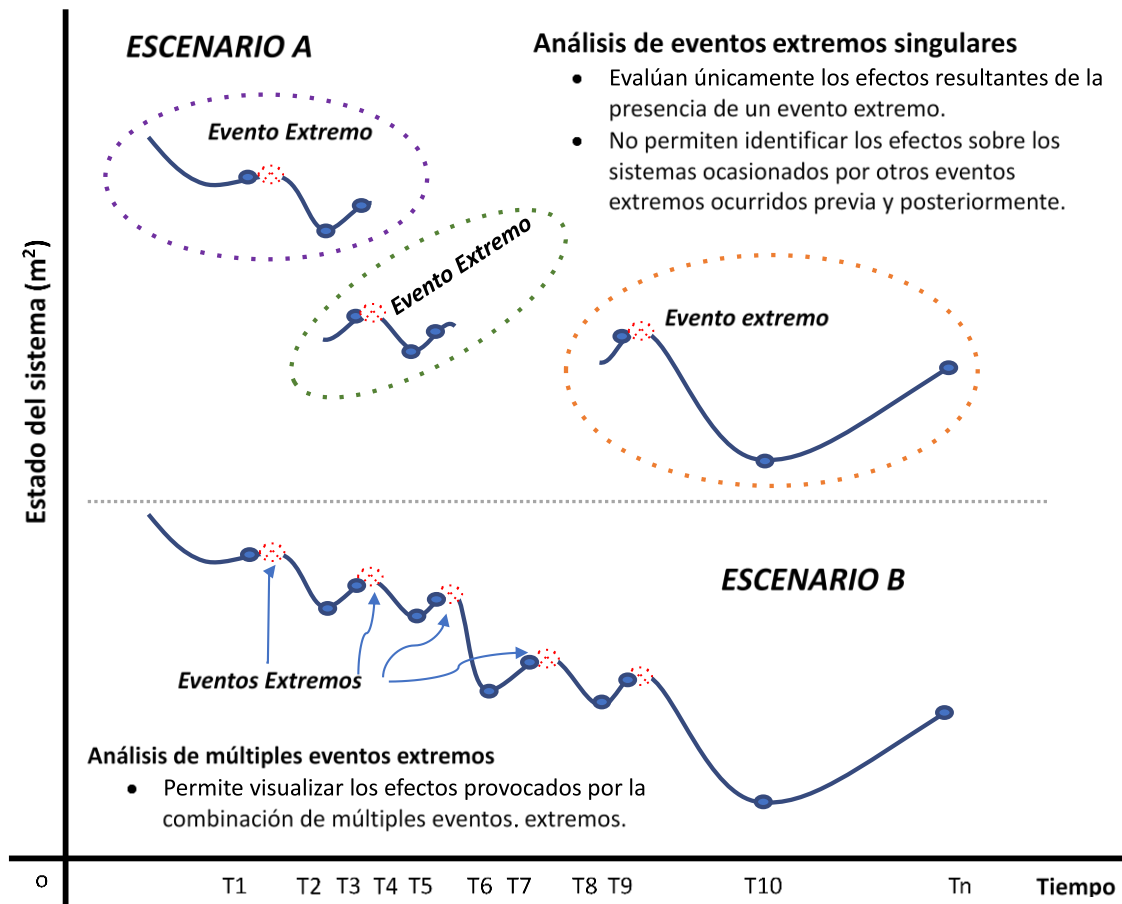
⁷ Disponibles en el catálogo de GEE: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets>

- *GPM: Monthly Global Precipitation Measurement (GPM). v6* (Huffman et al., 2019a).
- *CHIRPS Pentad: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data. V2.0 Final* (Funk et al., 2015).
- *MOD13Q1.006 Terra Vegetation Indices 16-Day Global* (USGS, 2022b).
- *MOD11A2.006 Terra Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day Global* (USGS, 2022b).
- *FIRMS: Fire Information for Resource Management System* (FIRMS, 2022).
- *USGS Landsat 5, 7 y 8. Surface Reflectance Tier 1* (USGS, 2022a).

Para estimar la resiliencia de la vegetación de tipo selva, se consideraron los siguientes modelos:

a. Modelo teórico bivariado

Buma y Wessman (2011), y Van de Pol et al. (2017), plantean que gran parte del conocimiento de las capacidades de resiliencia de los ecosistemas se tiene a partir del estudio de perturbaciones provocadas por eventos singulares, es decir, la mayoría de las investigaciones sobre el impacto de eventos extremos contemplan únicamente un suceso (Figura 11, escenario A). Para solventar lo anterior Hodgson et al. (2015) y Nimmo et al. (2015), proponen un modelo teórico bivariado (Figura 11, escenario B), en el cual la resiliencia se puede estudiar a partir de dos variables: "cambio de estado" (resistencia) y "tiempo de retorno" (Resiliencia), donde la resistencia está representada por la medida en que un sistema absorbe una perturbación externa, y la resiliencia se estima determinando la tasa de recuperación, que refleja la capacidad de retorno a condiciones equivalentes previas a la perturbación (Bhaskar et al., 2018).

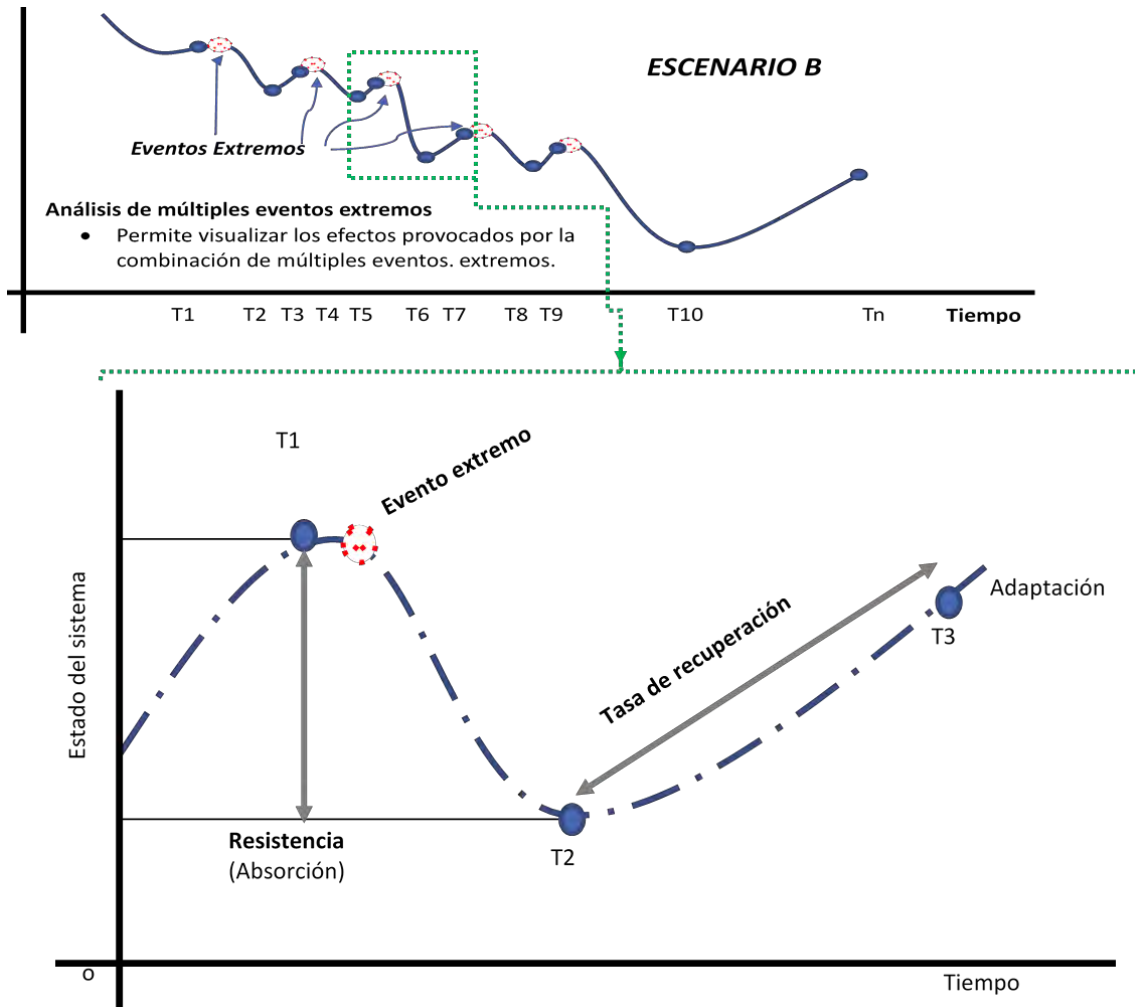


Fuente: adaptado de Vásquez-Grandón et al (2018).

Donde: T_1 a T_n = datos para el cálculo de los componentes de la resiliencia.

Figura 11: Representación del dominio de estudio basado en: eventos extremos singulares VS múltiples eventos extremos.

En la Figura 12 se presenta el diagrama que detalla el proceso del modelo bivariado, el cual se replica secuencialmente en función del número de perturbaciones extremas identificadas dentro de cada una de las “Unidades Básicas de Análisis Espacial” determinadas dentro de la zona de estudio.



Fuente: adaptado de Bhaskar et al. (2018).

Donde: T_1 a T_n = datos para el cálculo de los componentes de la resiliencia y Perturbación = Evento Extremo estudiado.

Figura 12: Modelo bivariado de resiliencia (resistencia – tasa de recuperación) asociado a un evento singular.

La cuantificación de los componentes de la resiliencia en el modelo propuesto se efectuará considerando las siguientes Ecuaciones (Ecuación 5 a Ecuación 7):

- Marco de resistencia-resiliencia.**

$$\text{Resistencia} = (T2 - T1)$$

Ecuación 5: Resistencia.

$$\text{Tasa de recuperación} = (T3 - T2) / \Delta T$$

Ecuación 6: Tasa de recuperación

Fuente: Bhaskar et al. (2018)

Adicionalmente se calculará un índice de resiliencia con la finalidad de comparar los efectos provocados por múltiples eventos extremos en una misma área con temporalidades distintas, de acuerdo con lo propuesto por Nimmo et al. (2015).

● **Cálculo del Índice de resiliencia.**

$$\text{Índ. Resiliencia} = \frac{T_3/T_1}{T_2/T_1}$$

Dónde: Coef. Cambio Neto = T_3/T_1

Coef. Resistencia = T_2/T_1

Nimmo et al. (2015).

Ecuación 7: Índice de resiliencia

Derivado del estudio de cada perturbación, se identificarán las áreas de impacto de cada una de ellas con relación a la zona de estudio.

Los resultados del índice de resiliencia pueden ser representados gráficamente para comparar de forma visual los cambios en la magnitud de la disminución (déficit) o ganancia (superávit) con respecto a la línea de recuperación total de una unidad ecológica (Figura 13)

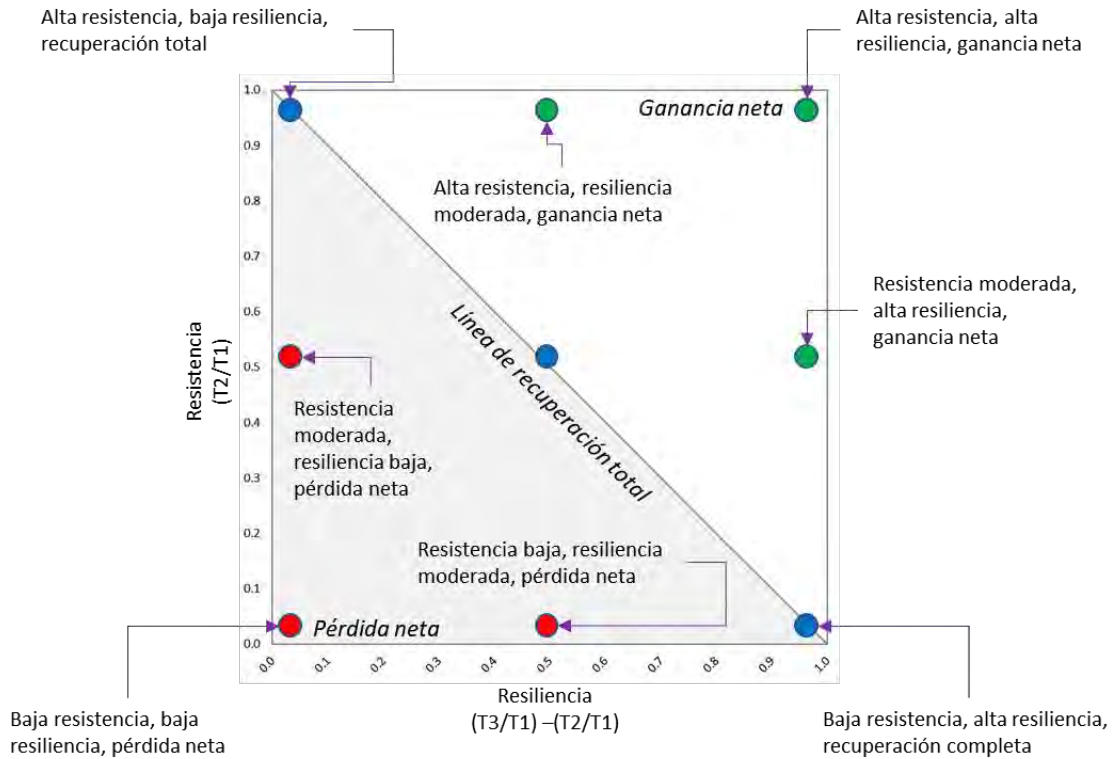


Figura 13: Diagrama del modelo bivariado de resiliencia (resistencia-resiliencia). Adaptado de Nimmo et al. (2015).

b. Modelo Land-Trendr (LT-GEE)

El modelo Land-Trendr (LT-GEE) es un conjunto de algoritmos desarrollados para la detección de cambios a partir de series temporales generadas de imágenes satelitales de moderada resolución moderada, que permite recrear la historia de un pixel o un área determinada, identificando los cambios en la masa forestal ahí representada, para ello toma como base una banda o un índice espectral para identificar los puntos de ruptura o interrupción (vértices) que separan los períodos de cambio duradero o estabilidad en la trayectoria espectral, registrando el año en que estos son registrados.

Dado que los algoritmos del modelo operan sobre cualquier banda o índice espectral, es posible segmentar series temporales para una misma región de interés para su comparación. A partir de la segmentación en función de las épocas en que se registran cambios en la cobertura forestal, se puede calcular para cada segmento entre vértices, tasa promedio de degradación o recuperación después de un evento (cualquiera) de perturbación. También, a partir del análisis de un conjunto de píxeles, es posible identificar la trayectoria que sigue un evento perturbador, como es el caso (por ejemplo) de los incendios forestales. En resumen, modelo Land-Trendr permite reducir una serie de tiempo en una pequeña cantidad de segmentos en función de los cambios de señal (Goeking & Menlove, 2017; Kennedy et al., 2018).

Para su operación, los algoritmos que integran el modelo LT-GEE, requieren de un preprocesamiento significativo, gestión de datos e importantes recursos computacionales, para sortear esos requerimientos el modelo ha sido integrado a la plataforma basada en la nube Google Earth Engine (GEE), lo que permite disminuir significativamente los pasos de preprocesamiento y los requerimiento de infraestructura de cómputo (Kennedy et al., 2018).

Si bien LT-GEE puede ser aplicado con cualquier conjunto de imágenes (bandas o índices espectrales) son los productos derivados de los satélites Landsat lo que ha sido utilizados ampliamente para el análisis de cambios en los datos de series temporales, ello aprovechando la disponibilidad del conjuntos de datos integrados en la plataforma GEE, entre los que destacan las colecciones de imágenes: Landsat 5,7 y 8 (Kennedy et al., 2018).

Por su parte, Cohen et al. (2018) destacan que los mejores resultados se obtiene al considerar un enfoque multispectral para la detección de perturbaciones forestales, en comparación con la selección mono banda.

El modelo se ejecuta a partir de la función “*Temporal Segmentation Land-Trendr*” integrada en el conjunto de algoritmos de GEE (2022b), a partir de la cual se determinan los puntos de interrupción (vértices), bajo un modelo estadístico armónico/lineal por partes. La ecuación utilizada es la siguiente (Ecuación 8).

$$Y = A + B * t + C * \cos(2 * \pi * \text{temp}(t)) + D * \sin(2 * \pi * \text{temp}(t)) + E * \cos(4 * \pi * \text{temp}(t)) + F * \sin(4 * \pi * \text{temp}(t)) + \dots$$

Dónde: t = hora de inicio de la imagen; $\text{temp}(t)$ = año fraccionario de la hora de inicio.

Fuente: GEE (2022b).

Ecuación 8: Determinación del coeficiente de correlación de Pearson

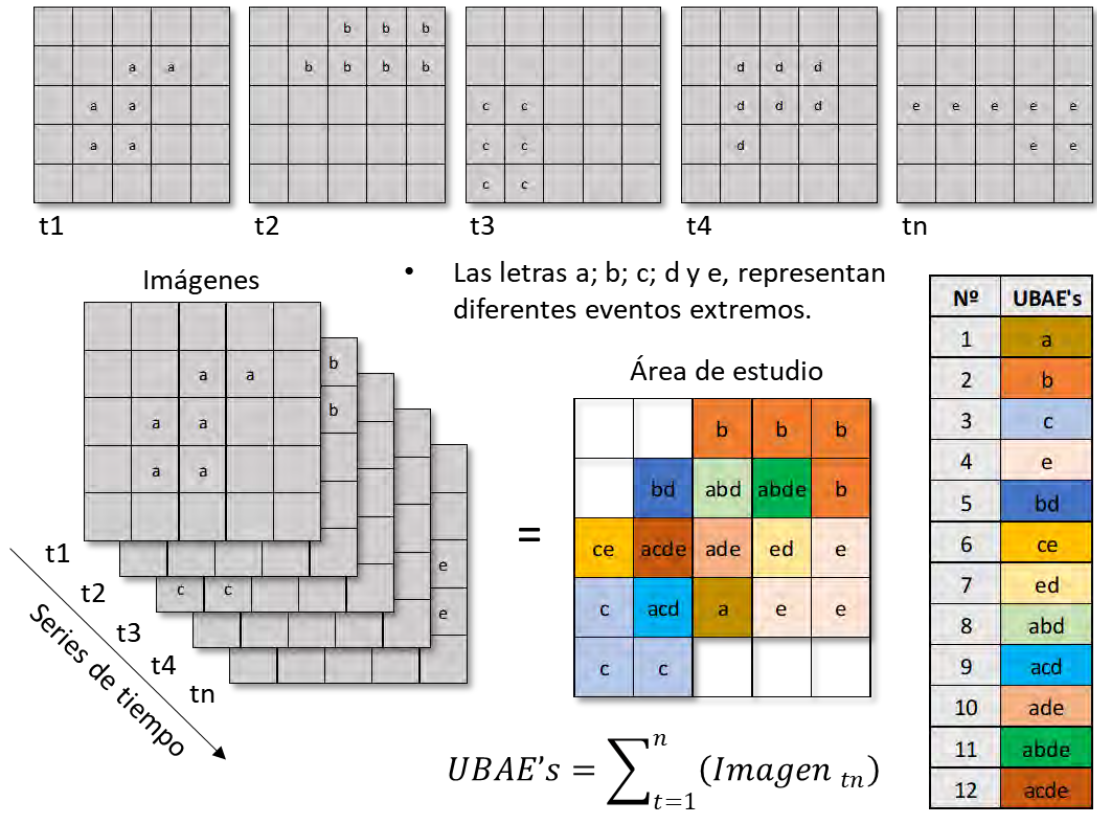
Land-Trendr en Google Earth Engine (LT-GEE) utiliza la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945) para evaluar tendencias monotónicas (sin estacionalidad) en datos discretos (no de punto flotante), con lo que busca detectar la existencia de tendencias crecientes o decrecientes y su magnitud -pendiente de Sen- (GEE, 2022a). Tal funcionalidad de los algoritmos del modelo, permitió la generación de un “análisis de tendencias no paramétrico”, dirigido a identificar cambios de carácter persistente -temporales- en la actividad fotosintética de la vegetación -en términos del NDVI- en zonas específicas de monitoreo dentro de la zona de estudio.

c. Determinación de “Unidades Básicas de Análisis Espacial” (UBAE’s)

Para poder analizar los cambios y respuesta de la vegetación ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos intensos o en categoría de extremos, se definieron áreas de monitoreo denominadas -para el presente estudio- “Unidades Básicas de Análisis Espacial (UBAE’s)”, las cuales se caracterizan por corresponder a delimitaciones territoriales con presencia de tipos de vegetación específica y diversos eventos hidrometeorológicos en categoría de extremos coincidentes espacialmente (ESRI, 2016; Pucha-Cofrep et al., 2017).

En la Figura 14 se muestra esquema del procedimiento metodológico para la delimitación de las UBAE’s.

Eventos extremos registrados dentro de la zona de estudio en diferentes estados espacio-temporales.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14: Esquema del procedimiento metodológico para la delimitación de las UBAE's.

La definición y selección de unidades de análisis, permitieron la aplicación del modelo Land-Trendr y la inclusión de los valores normalizados de los eventos relacionados con los procesos fenológicos de la vegetación presente en cada UBAE -medido en términos del NDVI-, y la de los eventos asociados a lluvia, temperatura de la superficie terrestre y puntos de calor.

II.5. Quinta fase: Integración del informe final

El análisis y discusión de los resultados, es un proceso que se viene dando de manera continua de forma preliminar, desde el momento en que se van procesando los datos, se examina la información a medida que se genera, clasifica, verifica y se construyen cuadros estadísticos, gráficos ilustrativos y mapas cartográficos para cada sección (Cáceres, 2009; Mora Vargas, 2005).

Para Cáceres (2009), la síntesis es el proceso de concentrar los análisis parciales que se han venido dando durante la etapa del procesamiento de la información,

permitiendo concentrar e integrarlos de manera coherente, de forma tal, que se obtenga un conjunto que adquiera pleno sentido. Por lo que, para el análisis y discusión final se procedió a la elaboración de una síntesis de los resultados, como lo siguieron Garcés-Paz (2000) y Cáceres (2009), lo que permitió analizar y discutir paralelamente, las relaciones entre la totalidad de las partes estudiadas, revisando metódicamente la información disponible, valorando su calidad y grado de certidumbre.

Las conclusiones del estudio se presentan poniendo especial atención en resultados obtenidos para responder al problema de investigación planteado (pregunta de investigación y objetivos) y que se siguieron los lineamientos plasmados en el marco teórico, para la adquisición de datos, su procesamiento y análisis (Cáceres, 2009).

De igual manera, como lo sugiere Saravia Gallardo (2006), se incluyen las reflexiones personales del autor, sobre las perspectivas en cuanto a la utilidad y aporte del estudio al acervo del conocimiento científico.

Una vez terminadas las conclusiones del estudio, como parte de ellas se plantean las posibles nuevas líneas a seguir en posteriores estudios y las posibles aplicaciones prácticas que los resultados del estudio pudieran ofrecer de acuerdo con lo sugerido por Saravia Gallardo (2006).

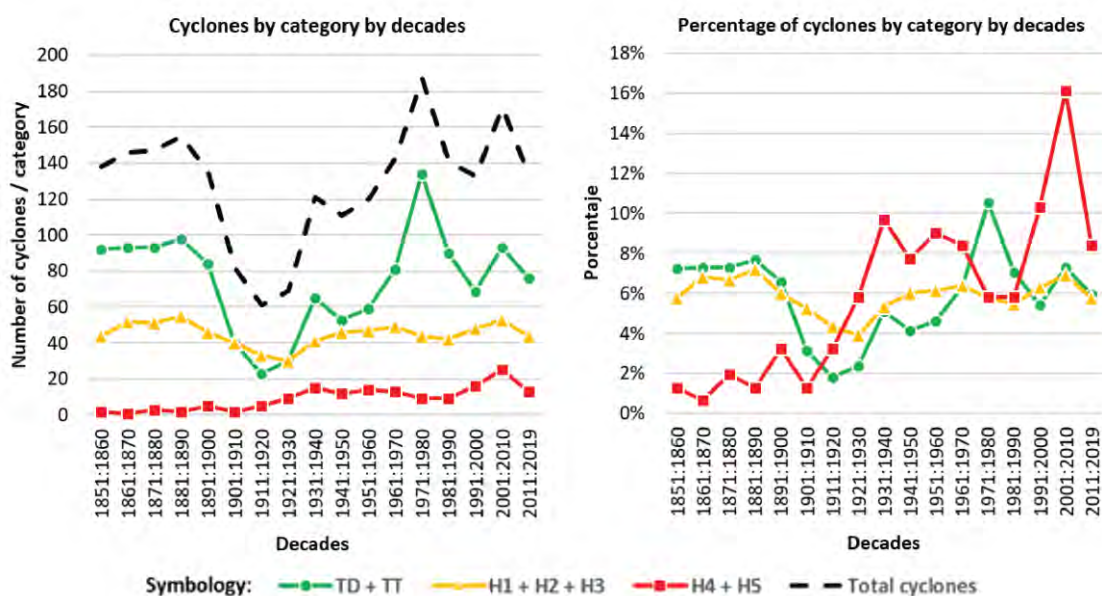
CAPÍTULO III. Resultados.

III.1. Caracterización de eventos hidrometeorológicos extremos

a. Ciclones tropicales extremos

Caracterización de las temporadas 1851 a 2019

Los registros del IBTrACS reportan para la CAN un total de 2,220 tormentas, de las cuales 2,193 (99%) alcanzaron la escala *Saffir-Simpson*. Para identificar las tendencias en número e intensidad, los ciclones se agruparon en tres categorías: *i*) depresiones y tormentas tropicales; *ii*) huracanes H1 a H3; y *iii*) huracanes H4 y H5 (Figura 15).



Nota: DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta tropical; y H = Huracán categorías 1 a 5. Fuente: Adaptado de Webster (2005), actualizada con datos del IBTrACS (2019a) a septiembre del 2019.

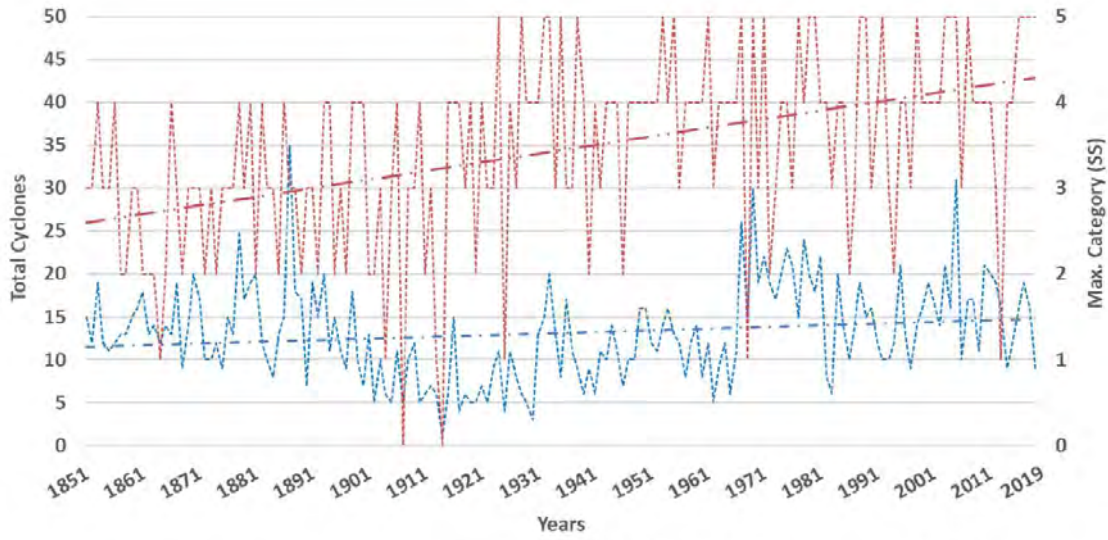
Figura 15: Intensidad de ciclones agrupados por categorías de acuerdo con la escala Saffir-Simpson por décadas en el período 1851-2019, donde: a) línea color verde, representa la suma de los ciclones que no alcanzan la categoría de huracán; línea amarilla suma de los huracanes categorías 1, 2 y 3; línea roja suma de huracanes categorías 4 y 5; y línea negra punteada, suma total de ciclones. b) equivalente a -a)-, pero representando el porcentaje con respecto al total de ciclones reportados por década.

Destacan los años 20's del siglo XX con la menor cifra (61 ciclones) y la primera en la que se registra un ciclón categoría H5, además de ser la única en que se registraron más huracanes H1 a H3, que depresiones y tormentas tropicales, hecho que puede deberse a la pérdida de registros en altamar durante y posterior a la Primera Guerra Mundial (Landsea et al., 2010). En contraste, la década de los 70's reporta la mayor cantidad con 200 ciclones.

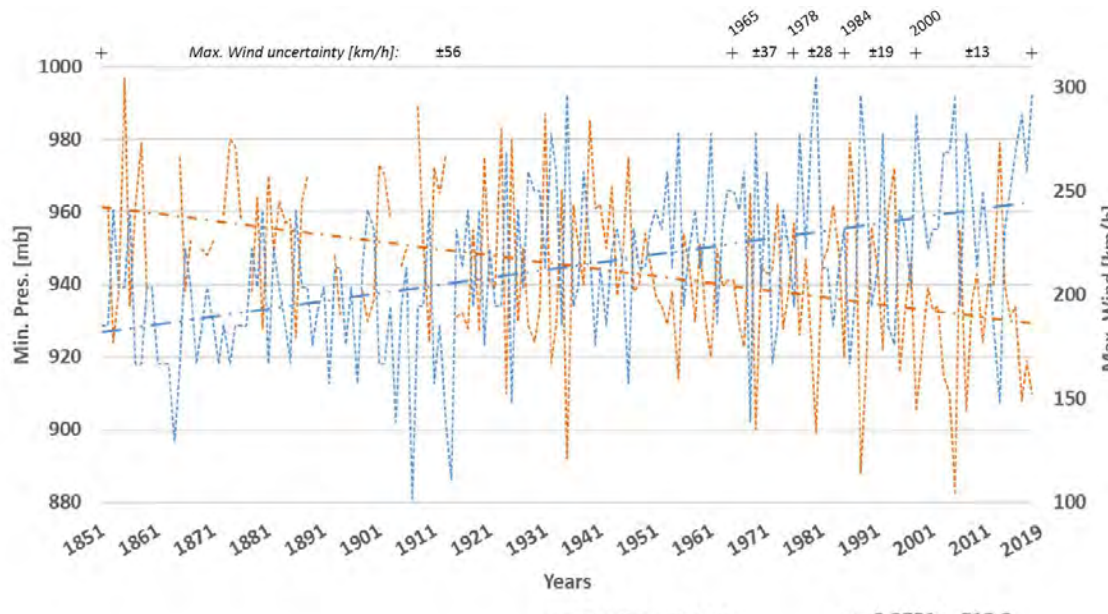
Para identificar el comportamiento en la intensidad de los ciclones se calcularon los porcentajes por grupos de categorías con respecto al total por decenio, en la Figura 16b se aprecia que entre 1930 y 1970 hubo un repunte de huracanes H4 y H5, pero es en las pasadas tres décadas cuando se presenta la mayor tendencia al incremento en proporción al total de meteoros formados por decenio. 2005 se caracterizó por presentar la máxima cuantía con 4 huracanes H5 (*Emily, Katrina, Rita y Wilma*), además de mantenerse como el año con la formación ciclónica más intensa registrada en la historia del Atlántico Norte, representada por el huracán *Wilma*.

El cálculo de la línea de tendencia para las variables número de ciclones y categoría, revela que los valores dada su variabilidad no presentan un ajuste significativo, devolviendo valores de R^2 del orden de 0.029 y 0.199 respectivamente (Figura 16a). Las tasas de cambio en función de las ecuaciones de las líneas de tendencia indican para el número de ciclones un incremento menor al 2% y para la intensidad (*Saffir-Simpson*) de tan solo 1%.

Considerando que la escala *Saffir-Simpson* representa rangos y no velocidades absolutas, para identificar el comportamiento de la intensidad de los ciclones se calculó la tendencia lineal de las variables "presión atmosférica" y "velocidad del viento", obteniendo valores de R^2 del orden de 0.17 y 0.2 respectivamente, lo que indica un bajo ajuste con relación a la línea de tendencia (Figura 16b). Por su parte el cálculo de las tasas de cambio en función de la ecuación de la recta de tendencia mostro una disminución promedio de -19% para la presión atmosférica y un ascenso cercano al 38% para la velocidad del viento.



a) $y = 0.0196x - 24.71$ $R^2 = 0.029$ $y = 0.01x - 15.958$ $R^2 = 0.1985$
 --- Total Cyclones --- Max. Category --- Linear (Total Cyclones) --- Linear (Max. Category)



b) --- Min. Pres. --- Max. Wind --- Linear (Min. Pres.) --- Linear (Max. Wind)
 Max. Wind uncertainty [km/h]: ±56

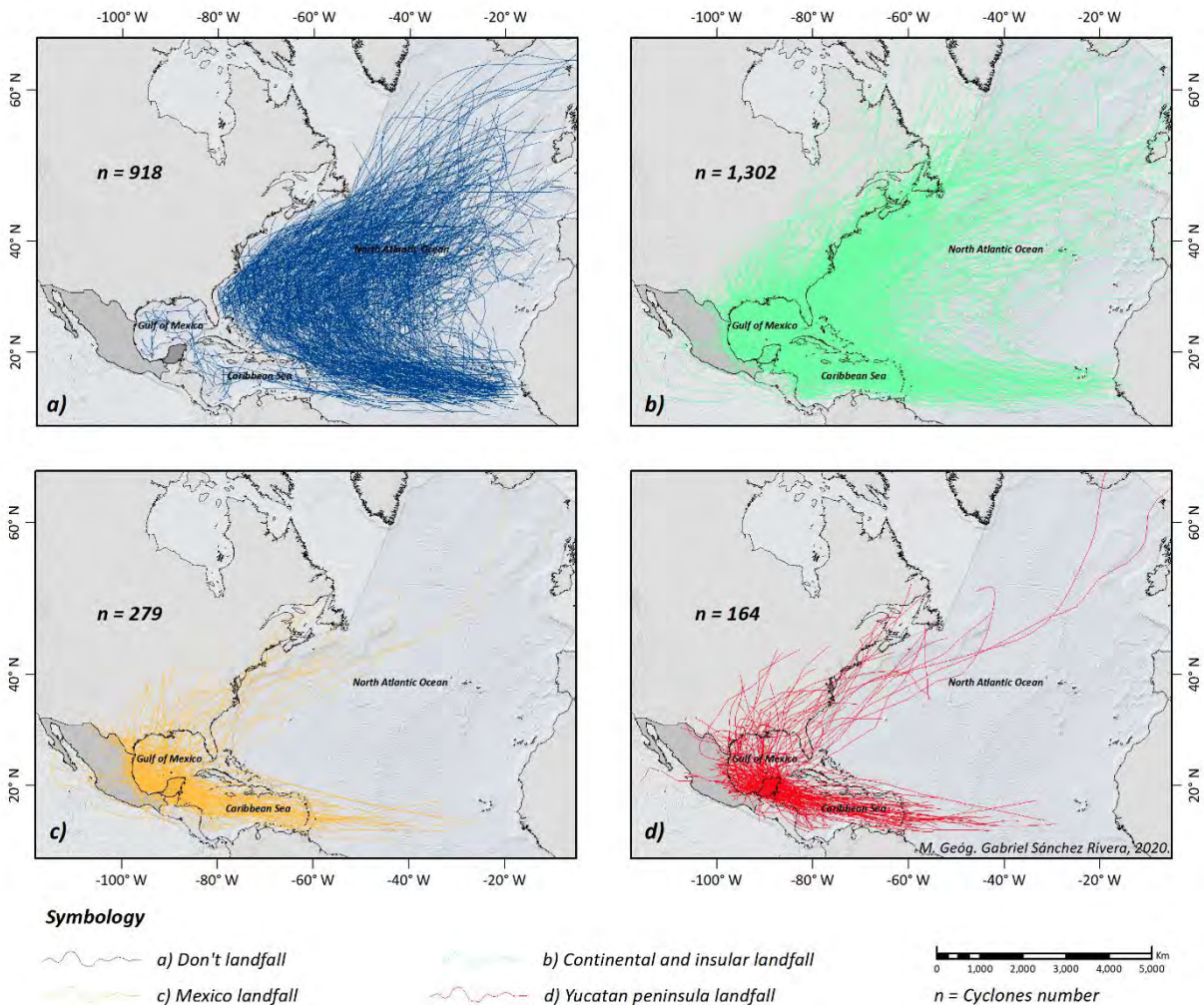
Nota: El coeficientes de correlación lineal de Pearson presenta un valor de $R^2 = -0.95$, lo que corrobora la relación inversa proporcional entre ambas variables.

Figura 16: Análisis de distribución anual y tendencia lineal en el Atlántico Norte: a) número e intensidad (categoría SS) de ciclones; b) velocidad de vientos máximos sostenidos y mínima presión atmosférica.

La regresión lineal indicó una relación inversamente proporcional significativa con un valor de R^2 de 89.5, congruente con los resultados del cálculo de coeficientes de

correlación lineal de Pearson y Spearman rho (valores de -0.95); lo que corrobora que a menor presión, mayor intensidad del viento, comportamiento conocido y descrito ampliamente en la literatura meteorológica (Farfán, 2004; Harper, 2013; Rey et al., 2019; Sanders, 2016).

De los sistemas tropicales registrados el 59% tocaron tierras continentales o insulares, de estos el 21% impactaron México y el 13% la península de Yucatán, la distribución espacial se presenta en la Figura 17 y en el Cuadro 10.



Nota: El número de ciclones que impactan tierras continentales e insulares, incluye México. A su vez, el número de ciclones que impactan México, incluye la península de Yucatán.

Figura 17: Trayectorias de los ciclones tropicales clasificados por zona de impacto. a) No impactaron tierra; b) impactaron tierras continentales e insulares; c) impactaron tierras mexicanas; y d) impactaron la península de Yucatán.

Cuadro 10: Número de ciclones por categoría y zona de impacto en el período 1851 – 2019.

Nivel	Fuera de SS		En escala Saffir-Simpson (SS)							Totales
	-3	-2	DT	TT	H1	H2	H3	H4	H5	
Total registradas en la Cuenca del Atlántico Norte	1	26	591	682	354	245	166	120	35	2,220
No Impactan tierras continentales e insulares		17	345	265	134	83	47	27		918
Impactan tierras continentales e insulares	1	9	246	417	220	162	119	93	35	1,302
Impactan tierras mexicanas.			57	90	44	40	19	16	13	279
Impactan tierras de la Península de Yucatán.			30	47	23	31	16	8	9	164

Donde:

- -3 = Disturbios diversos; -2 = Subtropical; DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta tropical; y H = Huracán categorías 1 a 5.
- El número de ciclones que impactan tierras continentales e insulares, incluye México.
- El número de ciclones que impactan México, incluye la península de Yucatán.

Caracterización de ciclones tropicales como eventos extremos

Para el caso de la velocidad del viento se cuenta con datos para 84% de los casos y para la presión atmosférica alrededor del 50% (Cuadro 11). En cuanto a los valores extremos la máxima velocidad de vientos reportada es de 305 km/h (huracán *Allen*, 1980) y la mínima presión de 882 mb (huracán *Wilma*, 2005).

Cuadro 11: Resultados de la estadística básica descriptiva por variable.

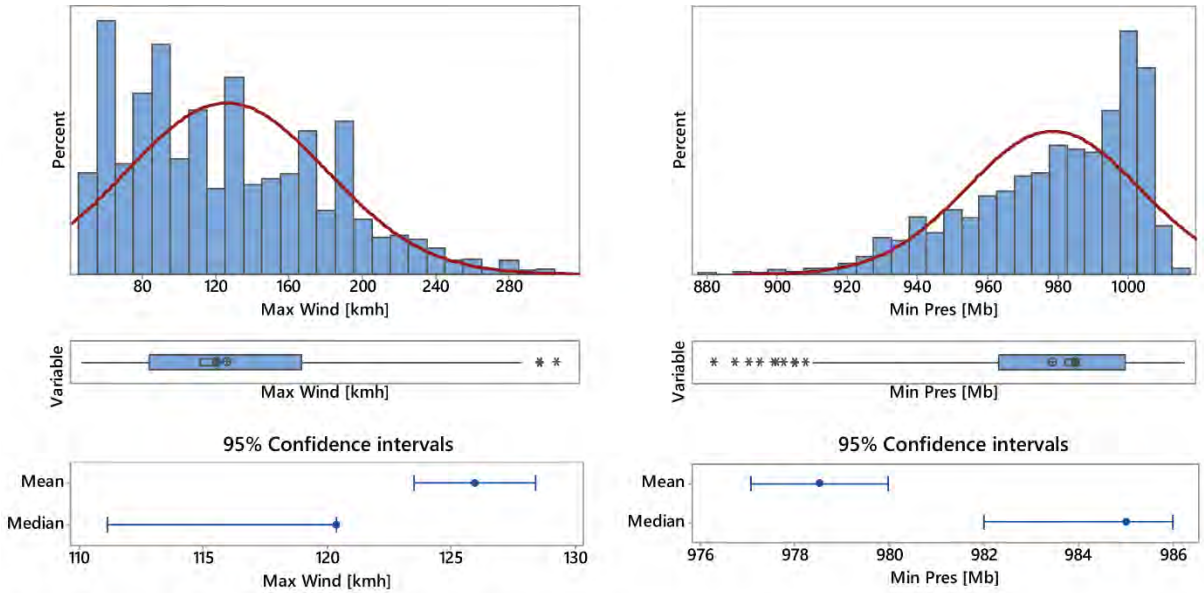
Variable	N	N*	Percent	Mean	StDev	Min.
Max Wind [km/h]	1,859.00	361.00	83.74	125.96	54.32	46.30
Min Pres [mb]	1,090.00	1,130.00	49.10	978.51	24.46	882.00

Variable	Max.	Q1	Q3	Mode	Skewness	Kurtosis
Max Wind [km/h]	305.58	83.34	166.68	92.60	0.61	-0.2
Min Pres [mb]	1,016.00	963.00	999.00	1,000.00	-0.91	0.27

Donde: N = registros con datos y N* = registros sin datos.

Para identificar los valores que exceden los umbrales relativos seleccionados, se analizó de forma independiente cada una de las variables de referencia mediante el modelo "Exceeding a relative threshold". En los diagramas de cajas (Figura 18) se aprecia que del total, 5 ciclones reportaron valores superiores a los 296 km/h y 10 inferiores a los 908 mb,

siendo considerados como atípicos dado que sobrepasan por más de 1.5 veces el rango intercuartil respectivo.



Individual standard deviations were used to calculate the intervals.

Figura 18: Resumen estadístico (Histograma y diagrama de cajas): a) Velocidad Máxima de Vientos Sostenidos [km/h]; b) Mínima Presión Atmosférica [mb].

Los valores que sobrepasan los umbrales establecidos y que son considerados como “raros” se obtuvieron mediante la función de densidad de probabilidad, en la Figura 19 se indican los rangos para los vientos máximos y mínima presión por conjunto de umbrales (percentiles) seleccionado.

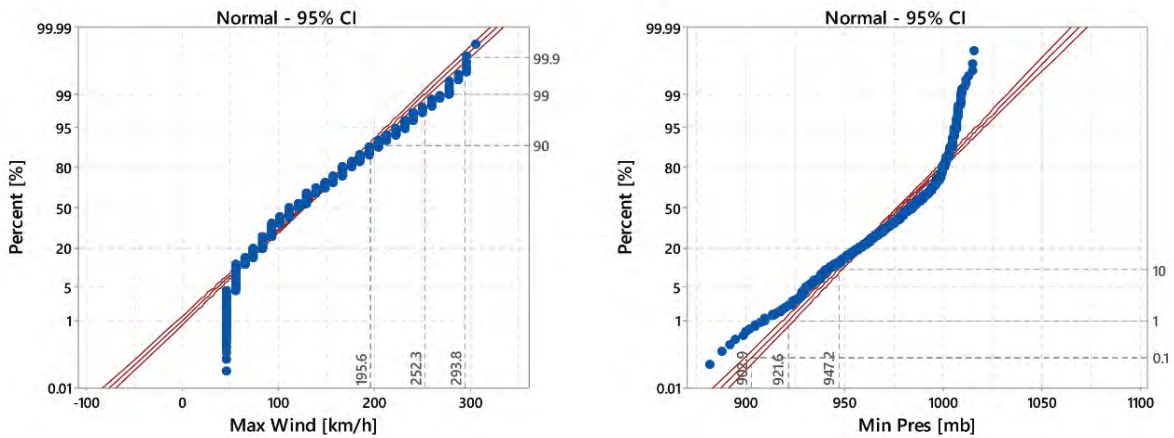


Figura 19: Función de probabilidad: a) Velocidad Máxima de Vientos Sostenidos [km/h]; b) Mínima Presión Atmosférica [mb].

La cantidad de eventos extremos con relación a cada variable analizada de manera independiente y en función de los umbrales propuestos por el IPCC (2012, 2014) es de 257 (11.58%) para la velocidad del viento y 132 (5.95%) para la presión atmosférica. El total de huracanes extremos de acuerdo con cada uno de los 3 umbrales seleccionados y sus trayectorias se presentan en las Figuras Figura 20 y Figura 21.

N.º	Key	Description	Max. Wind [km/h]					Min. Pres [mb]					
			< P 90.0 (< 192.24)	P 90.0 (192.24)	P 99.0 (247.40)	P 99.9 (287.89)	Subtotal	> P 10.0 (> 945.20)	P 10.0 (945.20)	P 1.0 (918.81)	P 0.1 (899.43)	Subtotal	
1	Total	North Atlantic	1,963	211	41	5	257	2,088	114	13	5	132	
1.1	NLf	Don't landfall	863	54	1	-	55	901	17	-	-	17	
1.2	Lf	Landfall	821	157	40	5	202	908	97	13	5	115	
1.2.1	MxLf	Mexico landfall	73	29	10	3	42	89	19	4	3	26	
1.2.2	YPLf	Yucatan p. landfall	135	20	7	2	29	148	10	4	2	16	
Donde:						Σ	[%]	Σ				[%]	
P = Percentile.						Exceed thresholds:		257	11.6		132		5.9
() = Reference units.						Don't exceed thresholds:		1,963	88.4		2,088		94.1
						Total cyclones:		2,220	100.0		2,220		1.0

Figura 20: Ciclones Extremos en el Atlántico Norte por umbrales, por variable de análisis.

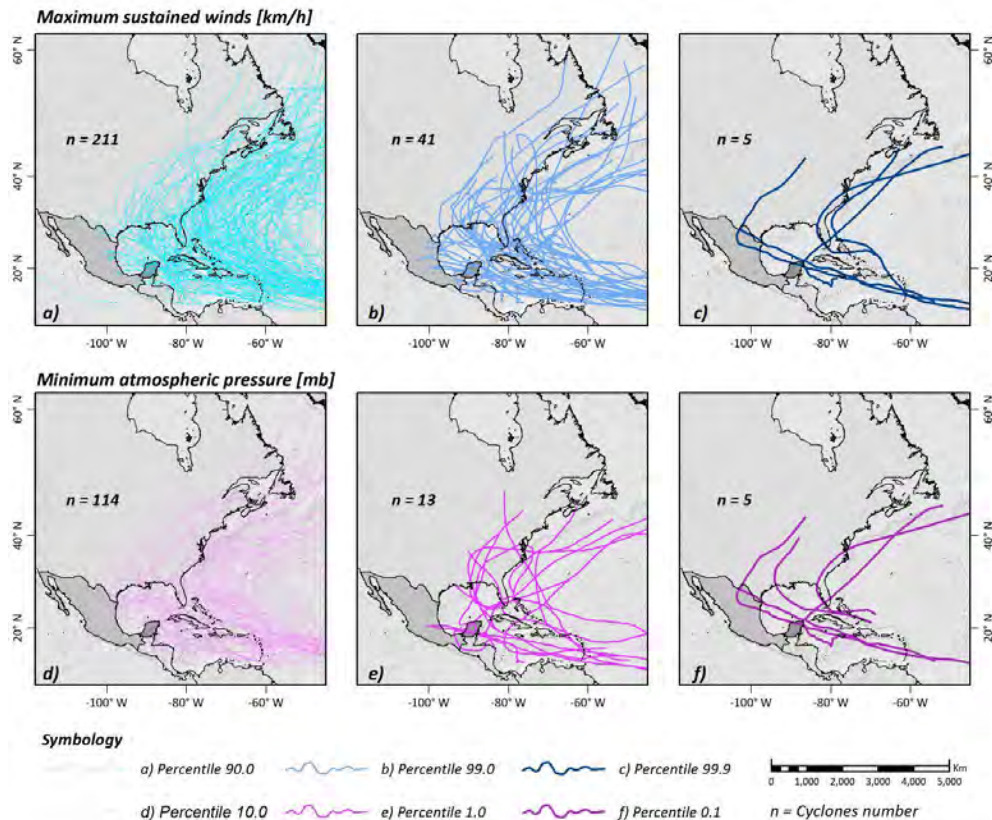
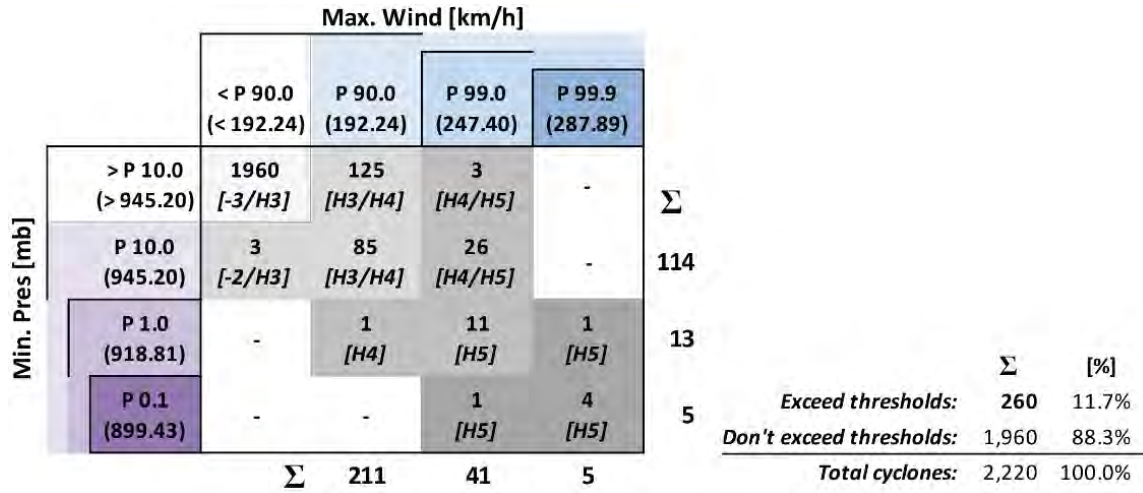


Figura 21: Trayectorias de los ciclones que exceden los umbrales por variable: a) ≥ 90.0 y < 99.0 ; b) ≥ 99.0 y < 99.9 ; c) ≥ 99.9 ; d) ≤ 10.0 y > 1.0 ; e) ≤ 1.0 y > 0.1 ; y f) ≤ 0.1

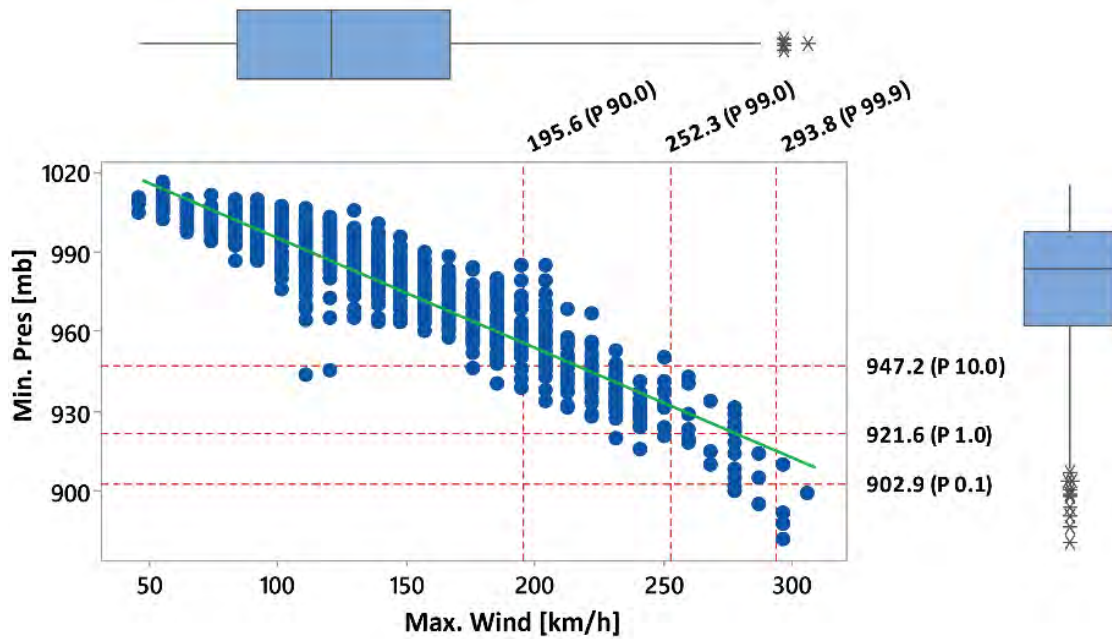
Al comparar los resultados de los umbrales para las variables seleccionadas, la cantidad de combinaciones resultante fue de 10, con un total de 260 ciclones que exceden los índices de referencia. El resumen por combinación y categorías (*Saffir-Simpson*) mínimas y máximas alcanzadas se muestra en la Figura 22.



Donde: P = Percentil; () = Unidades de referencia; y [] = Categoría Mínima y Máxima en la escala *Saffir-Simpson*.

Figura 22: Número de Ciclones Extremos por combinación de umbrales de referencia.

Los valores considerados como atípicos disminuyen en cantidad conforme los umbrales tienden hacia los extremos (85, 11 y 4 ciclones respectivamente). Resalta al observar la Figura 23 la presencia de 4 huracanes (*Sin Nombre*, 1935; *Allen*, 1980; *Gilbet*, 1988; y *Wilma*, 2005) categorizados como “extremadamente raros” al exceder los índices de referencia extraordinarios de 0.1 y 99.9, con equidistancia temporal entre ellos de 45, 8 y 17 años respectivamente, lo que no muestra un patrón definido en cuanto a la ocurrencia de eventos de tales características.



Donde: la ecuación de la regresión lineal es: “Mín. Pres. = 1036 – 0.4125 Vientos Máx.”, con un valor de R^2 del orden de -0.895 , lo corrobora la relación inversamente proporcional entre ambas variables.

Figura 23: Comparación entre la regresión lineal y los diagramas de caja para las variables “Velocidad Máxima de Vientos Sostenidos” vs “la Mínima Presión Atmosférica”.

Los porcentajes relativos para el total de ciclones caracterizados como eventos extremos, considerando los tres criterios seleccionados: IPCC (2012, 2014), Camuffo et al. (2018) y el umbral de referencia extremo propuesto se aprecian en el Cuadro 12.

Cuadro 12: Porcentajes relativos para el total de ciclones catalogados como extremos por escenario.

Nº Clave	Clasificación	Ciclones totales en el Atlántico Norte		Eventos Extremos por escenario (umbrales)					
		Total	% Relativos	IPCC		Camuffo et al.		De referencia extremo	
		Total	% Relativos	Total	% Relativos	Total	% Relativos	Total	% Relativos
1	Total Atlántico Norte	2220	100%	260	100%	47	100%	17	100%
1.1	NTT No tocan Tierra	918	41%	56	22%	1	2%	0	0%
1.2	TCl Tocan Tierra	1302	59% 100%	204	78% 100%	46	98% 100%	17	100% 100%
a	TMx Tocan México	279	21% 100%	43	21% 100%	14	30% 100%	6	35% 100%
b	TPY Tocan P. Yucatán	164	13% 59%	30	15% 70%	10	22% 71%	5	29% 83%

Donde: a) la columna “Nº”, representa el nivel jerárquico de anidación para el conteo de ciclones; y b) los valores para cada conjunto de umbrales en términos de percentiles son: IPCC (10 - 90), Camuffo et al. (1 - 99) y de referencia extremo (0.1 - 99.9).

Descartando los umbrales de referencia sugeridos por el del IPCC (2012, 2014), 47 ciclones que cumplen con la categoría de eventos extremos. Donde el huracán José (2017, H4) fue el único que no alcanzó tierras continentales o insulares. El número de ciclones

clasificados por zona de impacto y la lista con las características principales de cada evento, se presentan en los Cuadros Cuadro 13 y Cuadro 14.

Cuadro 13: Número de ciclones por combinación de umbrales de referencia y zona de impacto.

N.º	Clave	Clasificación	Max Wind [km/h]		Min Pres [mb]		P 99.9		Total	
			< P	P 99.0	P 99.0	P 99.0	P 99.9	P 99.9		
			P 1.0	> P	P 1.0	P 0.1	P 1.0	P 0.1		
1	Total	Atlántico Norte	1	29	11	1	1	4	47	
1.1	NTT	No tocan Tierra	1							1
1.2	TCI	Tocan Tierra	1	28	11	1	1	4	46	
a	TMx	Tocan México	1	7	3			3	14	
b	TPY	Tocan P. Yucatán	1	4	3			2	10	

Donde: P = Percentiles.

Cuadro 14: Listado de ciclones clasificados por combinación de percentiles [%] por variable.

Season	Name	Scale	Max Wind		Min Pres			Season	Name	Scale	Max Wind		Min Pres		
			[km/h]	[%]	[mb]	[%]	Zona				[km/h]	[%]	[mb]	[%]	Zona
1935	Not named	5	296.3	99.9	892	0.1	TCI	1961	Carla	5	277.8	99.0	931	>P	TCI
1980	Allen	5	305.6	99.9	899	0.1	TMx	1961	Hattie	5	259.3	99.0	920	>P	TCI
1988	Gilbert	5	296.3	99.9	888	0.1	TPY	1965	Betsy	4	250	99.0	941	>P	TCI
2005	Wilma	5	296.3	99.9	882	0.1	TPY	1967	Beulah	5	259.3	99.0	923	>P	TPY
2019	Dorian	5	296.3	99.9	910	1.0	TCI	1971	Edith	5	259.3	99.0	943	>P	TPY
2005	Rita	5	287.1	99.0	895	0.1	TCI	1977	Anita	5	277.8	99.0	926	>P	TMx
1924	Not named	5	268.5	99.0	910	1.0	TCI	1979	David	5	277.8	99.0	924	>P	TCI
1932	Not named	5	277.8	99.0	918	1.0	TCI	1992	Andrew	5	277.8	99.0	922	>P	TCI
1955	Janet	5	277.8	99.0	914	1.0	TPY	1998	Georges	4	250	99.0	937	>P	TCI
1969	Camille	5	277.8	99.0	900	1.0	TCI	1999	Floyd	4	250	99.0	921	>P	TCI
1998	Mitch	5	287.1	99.0	905	1.0	TPY	1999	Lenny	4	250	99.0	933	>P	TCI
2003	Isabel	5	268.5	99.0	915	1.0	TCI	2005	Emily	5	259.3	99.0	929	>P	TPY
2004	Ivan	5	268.5	99.0	910	1.0	TCI	2007	Felix	5	277.8	99.0	929	>P	TMx
2005	Katrina	5	277.8	99.0	902	1.0	TCI	2008	Gustav	4	250	99.0	941	>P	TCI
2007	Dean	5	277.8	99.0	905	1.0	TPY	2010	Igor	4	250	99.0	924	>P	TCI
2017	Irma	5	287.1	99.0	914	1.0	TCI	2015	Joaquin	4	250	99.0	931	>P	TCI
2017	Maria	5	277.8	99.0	908	1.0	TCI	2016	Matthew	5	268.5	99.0	934	>P	TCI
1928	Not named	5	259.3	99.0	929	>P	TCI	2017	Jose	4	250	99.0	938	>P	NTT
1929	Not named	4	250	99.0	924	>P	TCI	2018	Michael	5	259.3	99.0	919	>P	TCI
1930	Not named	4	250	99.0	933	>P	TCI	1932	Not named	5	259.3	99.0		>P	TCI
1933	Not named	5	259.3	99.0	940	>P	TMx	1964	Cleo	4	250	99.0	950	>P	TCI
1933	Not named	5	259.3	99.0	929	>P	TPY	1989	Hugo	5	259.3	99.0	918	>P	TCI
1938	Not named	5	259.3	99.0	940	>P	TCI	1995	Opal	4	240.8	<P	916	1.0	TPY
1953	Carol	5	259.3	99.0	929	>P	TCI								

Donde: TMx = Toca México; TPY = Toca península de Yucatán; TCI = Toca tierras insulares y continentales, y NTT = No toca tierra.

Las trayectorias por combinación de umbrales (percentiles) se muestran en la Figura 24.

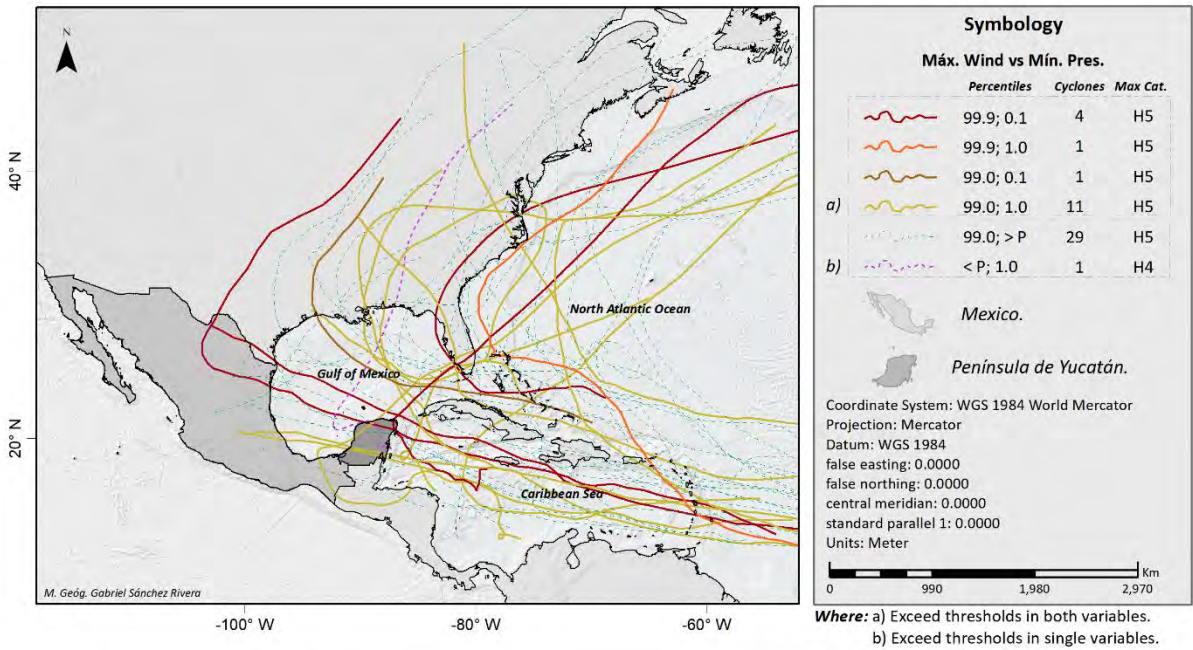


Figura 24: Trayectorias de los ciclones en el Atlántico Norte, en el período 1851- 2019, categorizados como eventos extremos por exceder los umbrales seleccionados para: a) ambas variables; y b) en una sola variable.

De acuerdo con los criterios del IPCC (2012, 2014) 30 ciclones extremos han impactado la península de Yucatán, 9 de los cuales alcanzaron categoría H5. Destacan los huracanes *Gilbert* (1988) y *Wilma* (2005) catalogados como “extremadamente raros”; y los huracanes *Janet* (1955), *Mitch* (1998) y *Dean* (2007) en categoría de “raros” al exceder los percentiles 1.0 y 99.0. Así como *Emily* (2005) y *Dean* (2007) que superaron el percentil 99.0 para la velocidad del viento (Cuadro 15). Al descartar los umbrales del IPCC el número de ciclones categorizados como eventos extremos se reduce a 10.

Cuadro 15: Número de Ciclones Extremos por combinación de umbrales de referencia.

		Max Wind [km/h]				
		< P 90.0 (< 192.24)	P 90.0 (192.24)	P 99.0 (247.40)	P 99.9 (287.89)	
Min Pres [mb]	> P 10.0 (> 945.20)	134 [DT/H3]	14 [H3/H4]	-	-	Σ
	P 10.0 (945.20)	1 [TT]	5 [H3/H4]	4 [H5]	-	10
	P 1.0 (918.81)	-	1 [H4]	3 [H5]	-	4
	P 0.1 (899.43)	-	-	-	2 [H5]	2
		Σ	20	7	2	

	Σ	[%]
<i>Exceden umbrales:</i>	30	18.3%
<i>No exceden umbrales:</i>	134	81.7%
<i>Total ciclones:</i>	164	100.0%

Fuente: Elaboración propia, con datos del IBTrACS.

Donde: P = Percentil; () = Unidades de referencia; y [] = Categoría Mín. y Máx. en escala SS.

El 80% (n=24) de los huracanes que han impactado en categoría de extremos cruzaron transversal y uniformemente la península en dirección sureste–noroeste. El 20% (n=6) ingresaron a tierra provenientes del norte con dirección suroeste (*Sin Nombre*, 1888; *Isidore*, 2002; y *Mitch*, 1988). Los ciclones: *Sin Nombre* (1906), *Opal* (1995), *Wilma* (2005) e *Isidore* (2002) presentaron trayectorias erráticas, particularmente *Isidore*, el cual ingresa a por la costa norte del estado de Yucatán con dirección sur, donde poco antes de alcanzar el estado de Campeche realizó un rizo de 360° para desplazarse al nornoroeste hasta salir al Golfo de México.

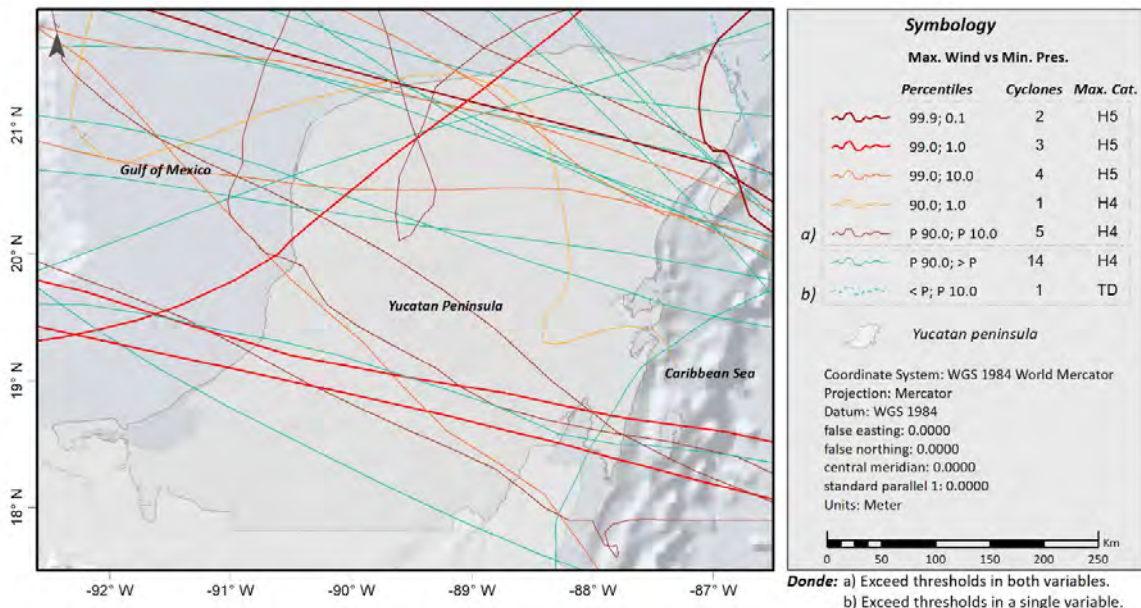
La relación de los ciclones extremos identificados para la península se puede observar en el listado del Cuadro 16 clasificados en función de los umbrales de referencia considerados.

Cuadro 16: Ciclones que impactaron la península de Yucatán, dentro de los umbrales indicados por el IPCC, Camuffo et al. y el índice de referencia extremo propuesto.

Season	Name	Scale		Max Wind		Min Pres		Season	Name	Scale		Max Wind		Min Pres	
		SS	[km/h]	[%]	[mb]	[%]	SS			[km/h]	[%]	[mb]	[%]		
1988	Gilbert	5	296.3	99.9	888	0.1	1855	Not named	3	203.7	90.0			> P	
2005	Wilma	5	296.3	99.9	882	0.1	1888	Not named	3	203.7	90.0			> P	
1955	Janet	5	277.8	99.0	914	1.0	1893	Not named	4	213	90.0	948		> P	
1998	Mitch	5	287.1	99.0	905	1.0	1903	Not named	3	194.5	90.0	958		> P	
2007	Dean	5	277.8	99.0	905	1.0	1906	Not named	3	194.5	90.0	953		> P	
1933	Not named	5	259.3	99.0	929	10.0	1909	Not named	3	194.5	90.0			> P	
1967	Beulah	5	259.3	99.0	923	10.0	1931	Not named	4	213	90.0			> P	
1971	Edith	5	259.3	99.0	943	10.0	1938	Not named	3	194.5	90.0	979		> P	
2005	Emily	5	259.3	99.0	929	10.0	1944	Not named	3	194.5	90.0	973		> P	
1995	Opal	4	240.8	90.0	916	1.0	1951	Charlie	4	213	90.0	968		> P	
1880	Not named	4	240.8	90.0	931	10.0	1955	Hilda	3	194.5	90.0	952		> P	
1974	Carmen	4	240.8	90.0	928	10.0	1970	Ella	3	203.7	90.0	967		> P	
2000	Keith	4	222.2	90.0	939	10.0	1975	Eloise	3	203.7	90.0	955		> P	
2002	Isidore	3	203.7	90.0	934	10.0	2010	Karl	3	203.7	90.0	956		> P	
2017	Harvey	4	213	90.0	937	10.0	1988	Keith	0	120.4	< P	945	10.0		

Fuente: Elaboración propia, con datos del IBTrACS.

Los eventos extremos se concentran principalmente en las zonas norte y sur, mientras que el centro de la península reportó la menor actividad ciclónica (Figura 25).



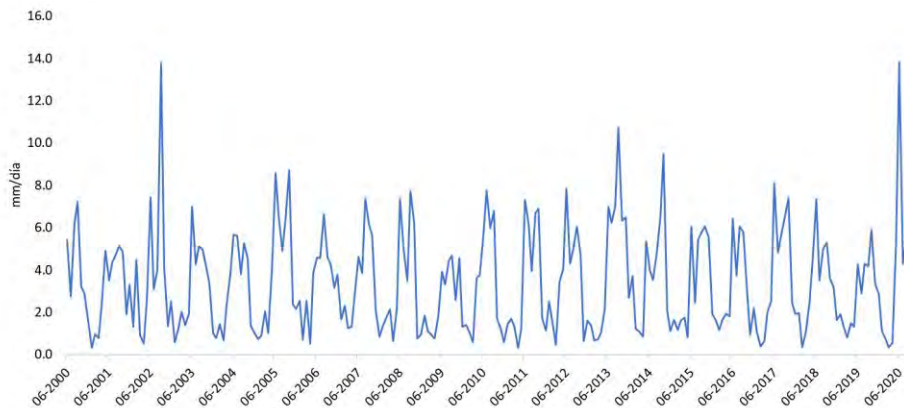
Fuente: Elaboración propia, con datos del IBTrACS.

Figura 25: Trayectorias de los ciclones que impactaron la península de Yucatán, en el período 1851- 2019, categorizados como eventos extremos por exceder los umbrales seleccionados para: a) ambas variables; y b) en una sola variable.

b. Lluvias y sequías extremas

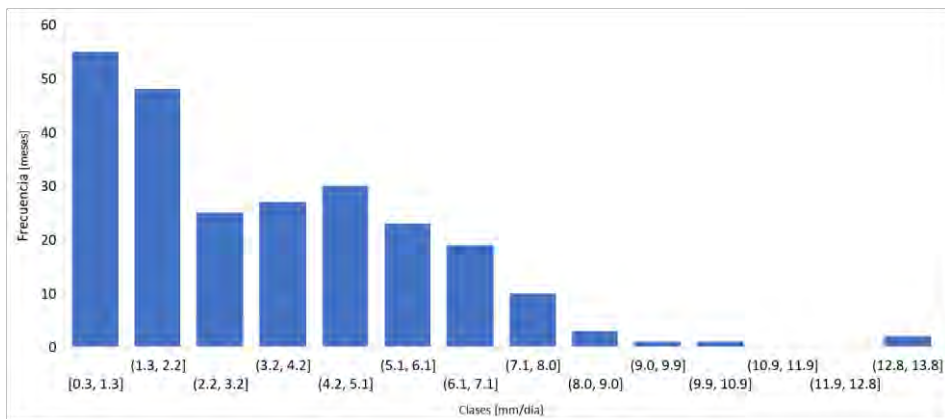
Lluvias en la zona norte de la península de Yucatán.

Durante el período 2001-2020 se registra en la zona de estudio una lluvia promedio de 3.43 ± 2.41 mm/d. Los meses que presentaron los valores máximos promedio corresponden a junio de 2020 (13.80 mm/d) y septiembre de 2002 (13.78 mm/d), seguidos por el mes de septiembre de 2013 (10.75 mm/d), siendo el mes de abril de 2011 donde se registra el valor promedio mínimo (0.31 mm/d). En la gráfica de la Figura 26 se aprecia el comportamiento de los valores medios mensuales para el período reportado.



Fuente: Elaboración propia con datos del “GPM 3IMERGM 06” (Huffman et al., 2019b).
 Figura 26: Lluvia promedio [mm/día] para el período 2000-2020.

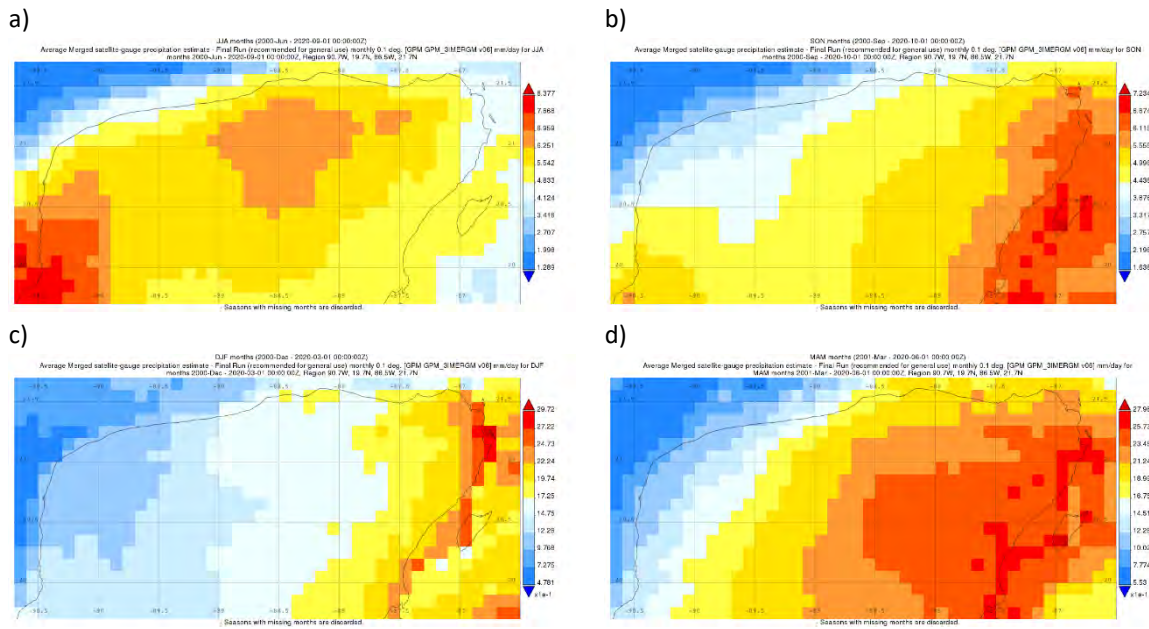
La distribución de los promedios mensuales reportados para el período 2000-2020, se presentan en el histograma de frecuencias de la Figura 27, donde se puede observar que los datos tienen una distribución sesgada a la derecha.



Fuente: con datos del “GPM 3IMERGM 06” (Huffman et al., 2019b).

Figura 27: Histograma de frecuencias de lluvia promedio mensual [mm/día] para el período 2000-2020.

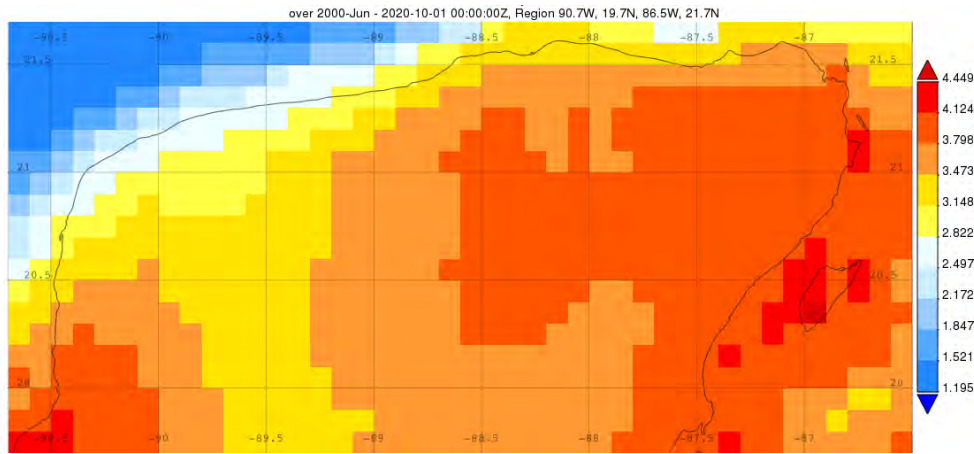
Los meses donde se registra el mayor volumen de lluvia medida en términos de los promedios mensuales reportados en mm/d, corresponden al período en que se presenta la temporada de ciclones del Atlántico Norte, siendo los meses de septiembre, octubre y noviembre (máxima actividad ciclónica) seguida por los meses de junio, julio y agosto (inicio de la temporada). Las lluvias mínimas se registran en los meses de diciembre, enero y febrero (Figura 28).



Fuente: con datos del “GPM 3IMERGM 06” (Huffman et al., 2019b).

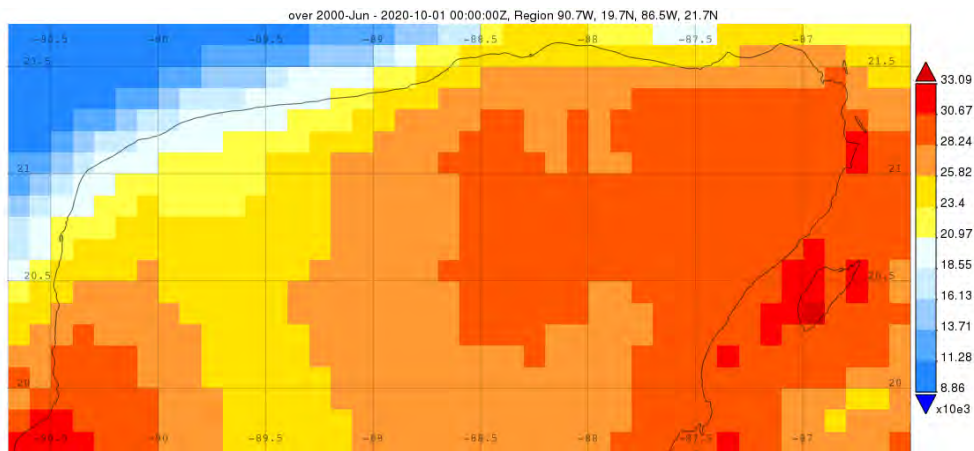
Figura 28: Lluvia promedio por temporada [mm/día] para el período 2000-2020. a) junio, julio y agosto (JJA), b) septiembre, octubre y noviembre (SON), c) diciembre, enero, febrero (DEF), d) marzo, abril y mayo (MAM).

En la Figura 29 se presenta el mapa de promedios mensuales de lluvia en mm/d para el período analizados. De ellos destaca que es la zona oriente de la península donde se concentran las mayores concentraciones, particularmente la isla de Cozumel y las zonas donde se localizan las ciudades de Cancún y Playa del Carmen. Ello se confirma al analizar los volúmenes de precipitación acumulados para los 244 meses considerados (Figura 30). Destacando la zona sur de la isla de Cozumel al reportar una acumulación total en 20 años del orden de 33 x 103 mm.



Fuente: con datos del "GPM 3IMERGM 06" (Huffman et al., 2019b).

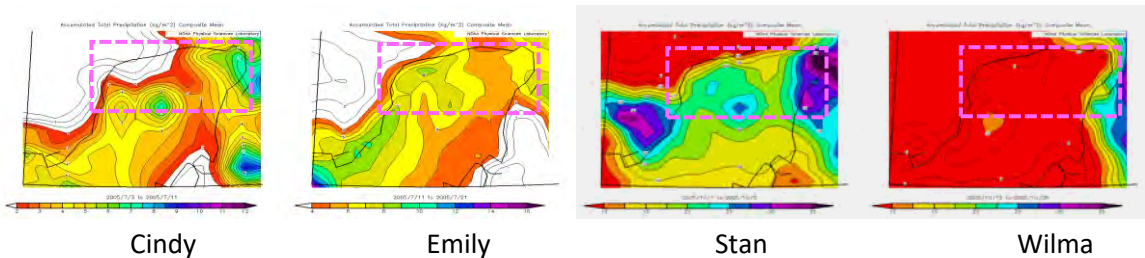
Figura 29: Lluvia promedio [mm/día] para el período 2000-2020.



Fuente: con datos del "GPM 3IMERGM 06" (Huffman et al., 2019b).

Figura 30: Lluvia acumulada [mm] para el período 2000-2020.

En la Figura 31 se presentan las lluvias acumuladas para cada uno de los eventos ciclónicos caracterizados como raro a extremadamente raros que impactarán la zona de estudio.



Fuente: Daily Average NCEP NARR Composites, accumulated total precipitation, (3hourly) data.

Figura 31: Lluvia acumulada por evento ciclónico [días/evento], 2000 – 2020.

El análisis de los valores promedio, mínimo, máximo y acumulado mensual para el período 2000-2020 se presentan en la Figura 32.

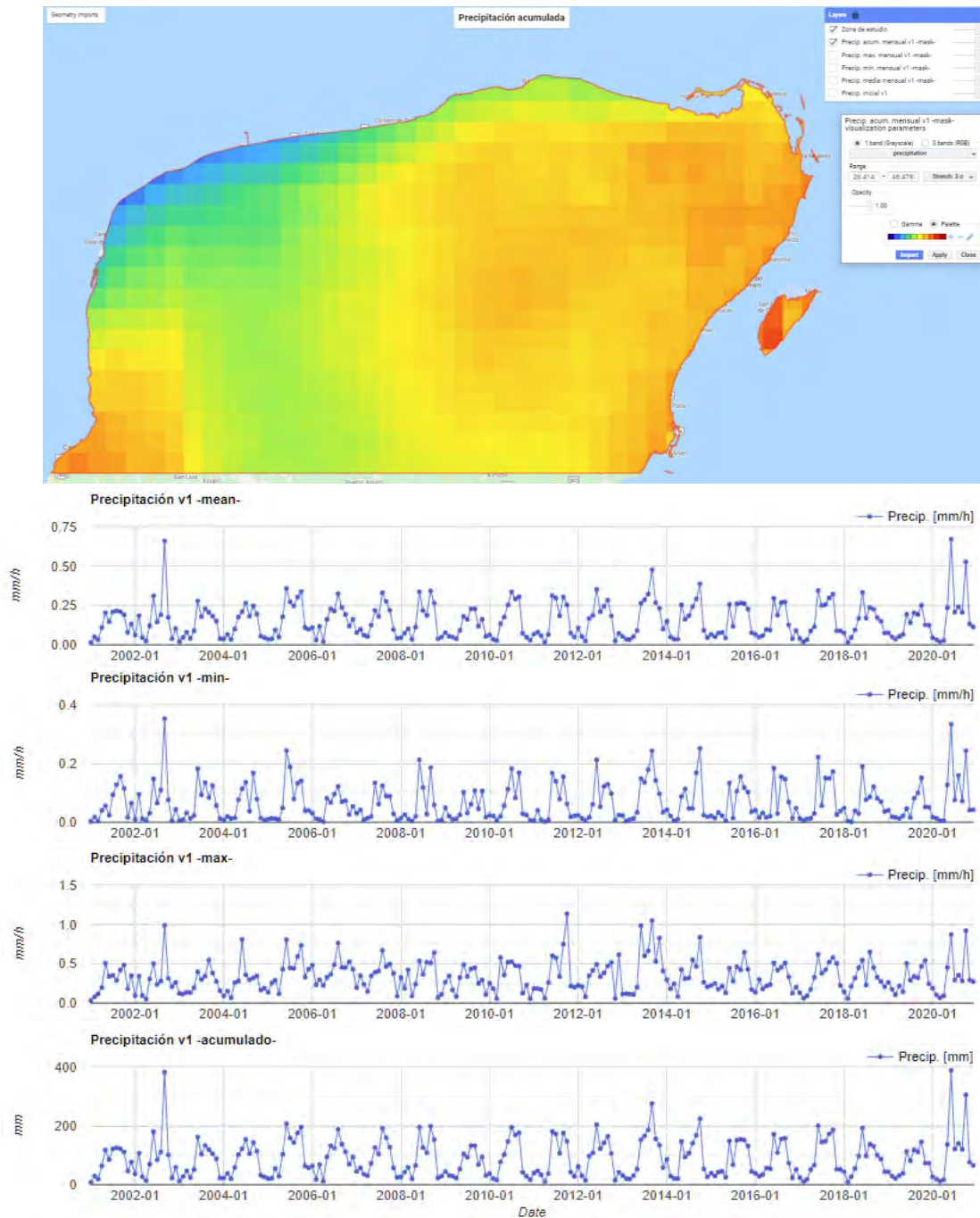


Figura 32: Lluvia promedio, mínimo, máximo y acumulado mensual para el período 2000-2020.

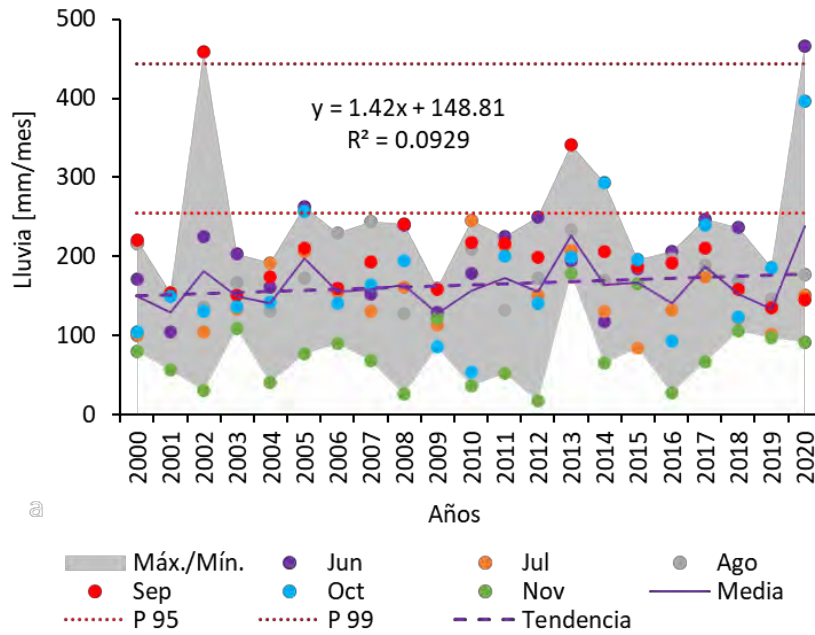
Para identificar los eventos de lluvia asociados a la presencia de ciclones tropicales en categoría de extremos, se analizaron los valores de lluvia para los meses que comprende la temporada de ciclones del Atlántico Norte. Los resultados indican que la temporada de ciclones 2020 superó los valores medios de las temporadas en el período 2000-2020, con un valor medio de 238.0 mm/mes, por arriba de la marca 226.0 mm/mes del año 2013. Los meses que registraron los valores máximos fueron junio y octubre del 2020 con 466.7 y 396.6 mm/mes, por lo que de acuerdo al modelo “excedente a un umbral relativo” el mes de junio pueden ser caracterizado como “extremadamente raro” al superar el umbral del percentil 99.9, y el mes de octubre como “muy raro” al encontrarse por encima del percentil 95.0. Por su parte el mes de septiembre del 2002 representa el segundo caso dentro del período estudiado, en la categoría de “extremadamente raro” al superar el percentil 99.9 con 459.1 mm. En la categoría de muy raros, se incluyen los meses de junio (262.26 mm/mes) y octubre del 2005 (257.65 mm/mes), septiembre de 2013 (341.08 mm/mes) y octubre de 2014 (294.12). La distribución de los valores medios mensuales por año se presenta en el Cuadro 17.

Cuadro 17: Lluvia media mensual para las temporadas de huracanes 2000 a 2020

Año	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov
2000	171.9	100.1	217.2	221.3	105.4	79.6
2001	105.4	152.4	154.8	154.4	149.4	57.6
2002	225.9	104.4	136.9	459.1	130.4	31.3
2003	203.9	133.5	167.5	150.6	136.2	108.9
2004	161.5	192.0	130.9	173.9	143.2	40.5
2005	262.3	205.7	172.7	210.7	257.6	77.5
2006	154.9	155.7	230.1	159.5	140.5	90.4
2007	152.4	131.1	243.5	192.9	164.7	68.1
2008	239.2	160.7	127.7	241.7	194.3	26.3
2009	128.8	113.7	160.2	158.0	85.7	122.5
2010	178.9	245.1	208.7	217.3	53.4	36.4
2011	225.4	213.5	132.7	216.3	200.6	52.1
2012	249.5	150.8	172.8	198.9	140.9	18.2
2013	195.2	208.5	234.6	341.1	199.7	178.1
2014	118.1	130.8	170.6	206.8	294.1	65.6
2015	184.9	84.2	187.0	187.6	196.3	166.3
2016	207.0	132.8	197.7	191.4	93.6	27.6
2017	246.5	175.1	188.3	211.3	239.9	66.4
2018	236.6	122.2	169.9	159.2	124.3	106.6
2019	137.1	101.2	146.8	135.0	186.2	97.2
2020	466.7	151.0	177.8	144.8	396.5	91.6

Fuente: Con datos del GPM_3IMERGM v06 (Huffman et al., 2019), donde: en negritas valores sobre el percentil 99.9 (443.3 mm).

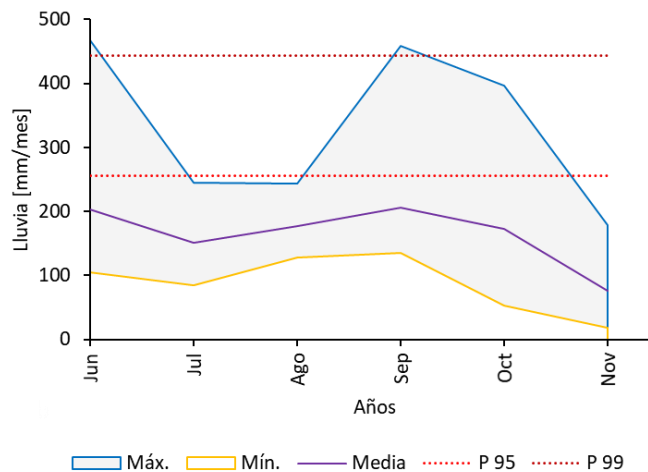
La distribución de los valores de lluvias media por año y por mes, con respecto a los umbrales de referencia seleccionados se muestran en la Figura 33.



Fuente: Datos del GPM_3IMERGM v06 (Huffman et al., 2019), donde: P = percentil.

Figura 33: Distribución de los valores de lluvia media por mes/año durante las temporadas de huracanes 2000 a 2020.

En la Figura 34 se pueden apreciar los dos tipos de regímenes pluviométricos que de acuerdo con Vidal-Zepeda (2005) imperan en zona norte de la península, el de verano [w(x') y m(f)] y el intermedio [m(f)], con la presencia de canícula caracterizada por una disminución en la cantidad de lluvia dentro de la temporada húmeda del año.



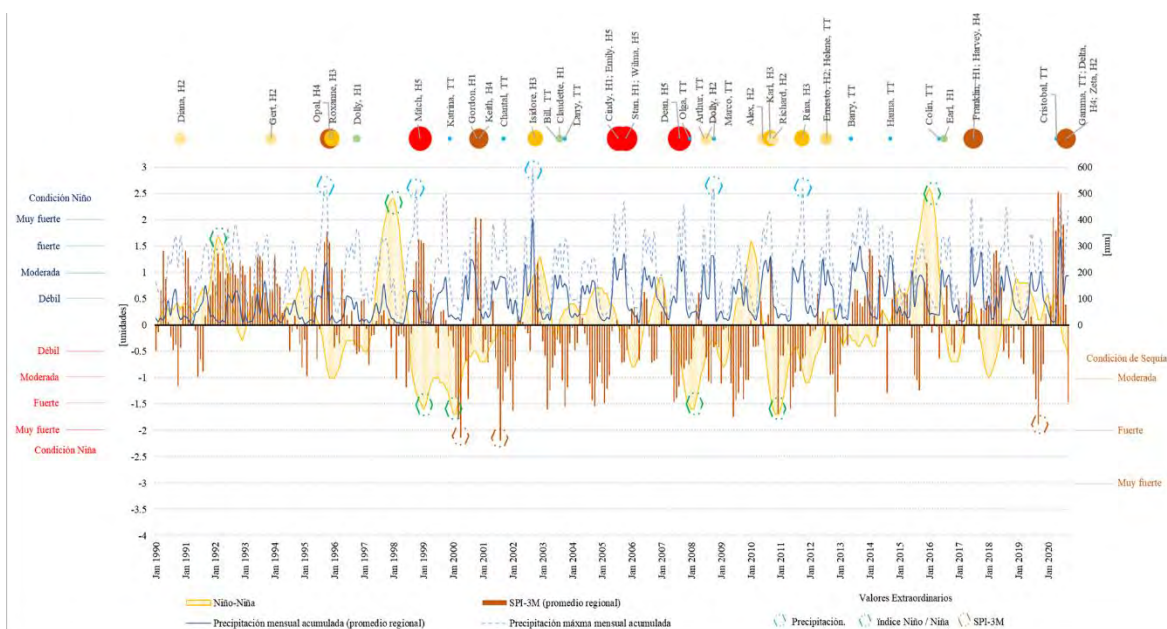
Fuente: Datos del GPM_3IMERGM v06 (Huffman et al., 2019), donde: P = percentil.

Figura 34: Distribución de los valores de lluvia media por mes durante las temporadas de huracanes 2000 a 2020.

Sequias en la zona norte de la península de Yucatán.

La península de Yucatán presentó durante el año 2019, valores del SPI mínimos por debajo de los registrados en el período estudiado, los niveles más cercanos se presentaron entre 2010 y 2011. Durante el año 2020 se presentan de manera contrastante las máximas lluvias registradas para la zona de estudio.

Con la finalidad de identificar patrones de correlación entre la ocurrencia e intensidad de ciclones tropicales, lluvia mensual acumulada, el índice estandarizado de precipitación (SPI-3m) y la ocurrencia del fenómeno del niño (ONI) durante el período 1990–2020, se graficaron los valores como se muestra en la Figura 35.



Fuente: Elaboración propia con datos del “GPM 3IMERGM 06” (Huffman et al., 2019), (IBTrACS, 2019a); (IRI, 2022), (NOAA, 2022).

Figura 35: Diagrama comparativo entre ciclones tropicales, lluvia mensual acumulada, SPI-3m y ONI. 1990 – 2020.

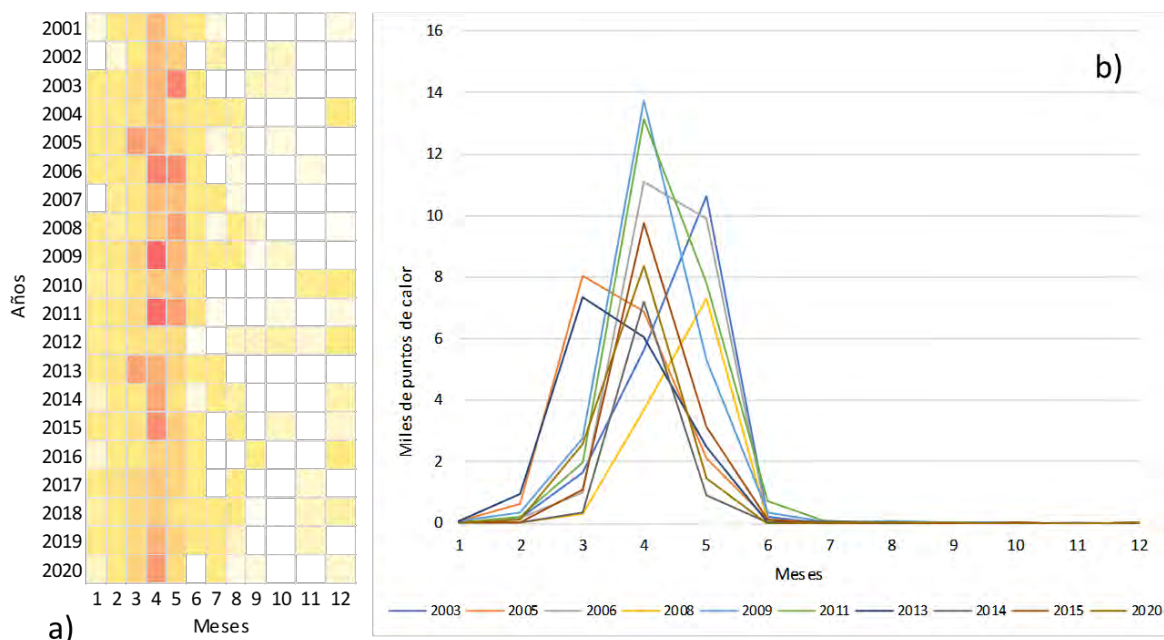
En el período de estudio 2001-2020 se presentaron un total de 10 eventos de El Niño, de los cuales 8 se clasificaron entre débiles y moderados, y únicamente los ocurridos entre los años 2007-2008 y 2010-2011, correspondieron a fuertes. En cuanto a la presencia de La Niña, se registraron 7 eventos, 6 clasificados entre débiles y moderados, y solo el de los años 2015-2016 como muy fuerte.

En el caso de la zona de estudio se identificó a través de la aplicación de la correlación múltiple de *Pearson*, a los resultados de las anomalías estandarizadas del NDVI (zNDVI), temperatura de la superficie terrestre (zTST) y lluvias (zLluvia), una relación significativa inversamente proporcional, entre la zTST vs zNDVI y zTST vs zLluvia, con valores de R^2 del orden de -0.654 y -0.428 respectivamente; y una relación moderada directamente proporcional entre las zTST vs zNDVI con un valor de $R^2=0.362$

c. Incendios forestales

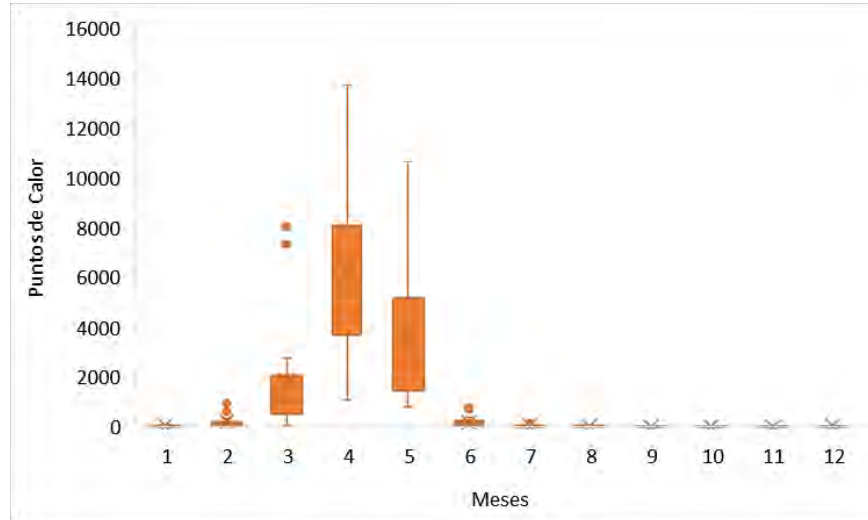
En el período comprendido entre el año 2001 y el 2020 se registraron en la zona norte de la península un total de 246,176 puntos de calor asociados a incendios forestales. Los años que presentan las mayores concentraciones fueron 2006, 2009 y 2011. Por su parte, los meses en los que se presentan la mayor cantidad de incendios son marzo a mayo, siendo abril el mes con la mayor cantidad de eventos registrados (Figura 36a).

En la Figura 36b se presenta el comportamiento de las series de tiempo mensuales para los diez años que presentaron la mayor cantidad de puntos de calor.



Fuente: Elaboración propia con datos del “Active Fire Detections MCD14DL”(FIRMS, 2022).
 Figura 36: a) diagrama de intensidad de eventos registrados; b) series de tiempo mensuales para los diez años con los máximos eventos registrados anualmente.

Los meses de abril y mayo destacan no solo por ser en los que se registra la mayor cantidad de ventos, sino también por la dispersión de los datos, lo que se puede observar en la Figura 37.



Fuente: Elaboración propia con datos del "Active Fire Detections MCD14DL"(FIRMS, 2022).

Figura 37: Distribución mensual de puntos de calor durante el período 2001-2020.

El aumento en la cantidad de incendios reportados coincide con la presencia del fenómeno de La Niña, en los años 2008-2009 y 2010-2011.

III.2. Caracterización de la selva tropical

En la península se encuentran cuatro grandes tipos de vegetación los cuales corresponden a selva, pastizal, agrícola y vegetación hidrófila, siendo la predominante la vegetación de tipo selva, la cual cubre más del 90% de la superficie de la península (INEGI, 2015).

En cuanto a la clasificación de los tipos de vegetación de selva, de acuerdo con la información de la sexta serie de Uso del Suelo y Vegetación (INEGI, 2015), en la península de Yucatán se registran los siguientes):

- Selvas alta y baja perennifolia,
- Selvas alta, mediana y baja subperennifolia,
- Selvas mediana y baja caducifolia, y
- Selvas mediana y baja subcaducifolia.

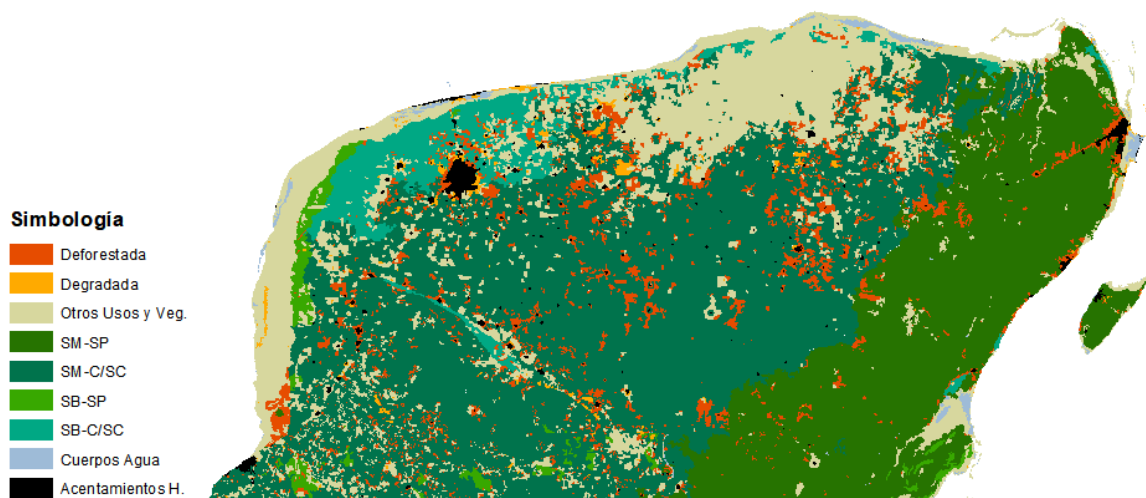
Para el presente estudio, la información derivada de las capas del continuo de uso de suelo y vegetación fueron reclasificadas en 11 clases (Cuadro 18).

Cuadro 18: Reclasificación de Usos de suelo y vegetación

ID_Clase	Cve_Clase	Clase	Cve_Union
1	SM-SP	Selva mediana subperennifolia	SMQ; VSA/SMQ; VSa/SMQ; VSh/SMQ
2	SM-CSC	Selva mediana caducifolia	SMC; SMS; VSA/SMC; VSA/SMS; VSa/SMC; VSa/SMS; VSh/SMC; VSh/SMS
3	SB-SP	Selva baja	SBQ; VSA/SBQP; VSA/SBQ; VSa/SBQP; VSa/SBQ; VSh/SBQ
4	SB-CSC	Selva baja caducifolia /subcaducifolia	SBC; SBS; VSA/SBC; VSA/SBS; VSA/SBK; VSa/SBC; VSa/SBS; VSa/SBK; VSh/SBC; VSh/SBS
5	PZT	Pastizal	PC; PH; PI
6	AGR	Agrícola	RA; RAP; RP; RS; RSP; TA; TAP; TP; TS; TSP; ACUI
7	VH	Vegetación hidrófila	VM; VSa/VM; VSA/VM; VT; PT; VSA/PT; VHH; VH
8	OV	Vegetación otra	BC; VPI; VS; VU
9	SV	Sin vegetación	ADV; DV
10	CA	Cuerpo de agua	H2O
11	AH	Asentamientos	AH; ZU

Fuente: Elaboración propia, con datos de Paz-Pellat et al. (2018)

Las nuevas categorías, mismas que son la base para determinar las capacidades de resiliencia de la vegetación son: selva baja subperennifolia; selva baja caducifolia y subcaducifolia; selva mediana subperennifolia, y selva mediana caducifolia y subcaducifolia. La distribución espacial dentro de la zona de estudio se presenta en la Figura 38.



Fuente: elaboración propia, con datos de INEGI (2015).

Figura 38: Distribución espacial de los usos de suelo y vegetación

Las selvas medianas subperennifolias ocupan el 23% de la superficie de la zona de estudio, mientras las caducifolia y subcaducifolia, el 44%, lo que da en conjunto un 66%

(4,965,146.40 ha). Por su parte, las selvas bajas representan tan solo el 6% de la superficie, donde las selva baja subperennifolia cubren solo el 1%, mientras las bajas caducifolia y subcaducifolia el 5%.

Los resultados de la estimación de las tasas de cambio y deforestación en el período comprendido entre las series II.5 (1999) y VI.5 (2016) arrojaron que los asentamientos humanos (4.05%), seguidos de la agricultura (1.93%), fueron los conceptos que registraron los mayores aumentos en superficie.

En cuanto a la vegetación, las selvas medias caducifolias fueron las que presentaron las mayores pérdidas en cuanto a cobertura con un estimado de aproximadamente 244 mil ha a una tasa de -0.41%/año (-6.97% total), seguidas por las selvas medias perennifolias, con una disminución cercana a las 49 mil ha a una tasa anual del -0.16% (-2.77% total).

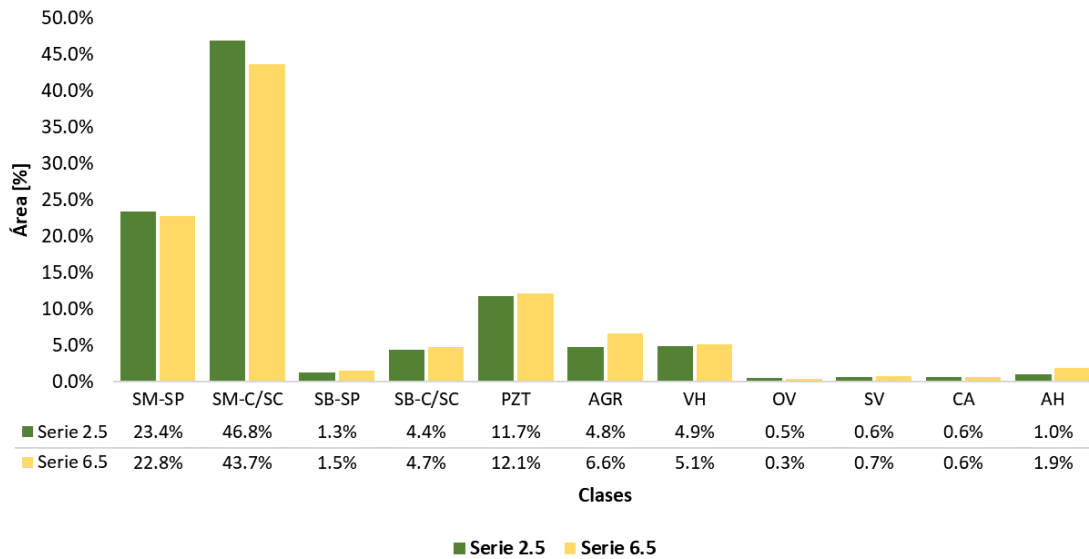
En contra parte, las selvas bajas presentaron los mayores incrementos, las de tipo baja caducifolias y subcaducifolias fueron las que más se incrementaron, a una tasa anual del 0.34% (5.82% total), alcanzando poco más de 19 mil ha. Por su parte, las de tipo baja subperennifolias aumentaron a una tasa anual del 0.68% (11.55% total), alcanzando poco más de 11 mil ha (Cuadro 19).

Cuadro 19: Matriz de cambios de usos de suelo y vegetación

S65	Row Labels	S25 Column Labels										Grand Total 65	TC	
		SM-SP	SM-CSC	SB-SP	SB-CSC	PZT	AGR	VH	OV	SV	CA			AH
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11		
Selva mediana subperennifolia	SM-SP	1,655,257.94	17,685.11	356.70	1,688.85	12,560.28	2,941.40	11,305.71	62.11	356.82	32.38	39.76	1,702,287.06	-0.16%
Selva mediana caducifolia /subcaducifolia	SM-CSC	15,618.09	3,100,834.94	3,467.08	5,776.91	70,593.90	62,520.79	824.67	2,626.69		164.97	431.30	3,262,859.34	-0.41%
Selva baja subperennifolia	SB-SP	37.99	1,874.13	87,802.99	1,732.02	7,539.38	1,829.42	1,117.77	8,084.84				110,018.55	0.68%
Selva baja caducifolia /subcaducifolia	SB-CSC	4,099.58	31,418.98	114.85	289,995.34	14,160.08	10,546.62	91.59				42.02	350,469.06	0.34%
Pastizal	PZT	5,486.85	149,892.86	1,351.95	8,686.56	728,081.38	10,057.40	971.30	234.35		94.65	153.60	905,010.89	0.21%
Agrícola	AGR	23,390.77	177,795.00	4,062.62	7,903.79	27,755.82	252,573.33		435.20			298.74	494,215.28	1.93%
Vegetación hidrófila	VH	19,965.96	3,506.34	678.48	1,660.07	5,376.00	106.43	342,263.89	2,875.96	3,637.49	737.25	71.52	380,879.38	0.23%
Vegetación otra	OV		424.11	225.89		2,818.37	1,428.27	149.58	18,889.57	250.67	104.85	26.81	24,318.12	-2.00%
Sin vegetación	SV	1,028.14	3,112.82		1,279.94	44.12	378.03	4,419.13	278.44	41,025.55	145.70	16.13	51,727.99	0.69%
Cuerpo de agua	CA	81.98	106.77			72.41	59.31	3,168.81	24.76	422.95	41,343.64	106.06	45,386.69	0.35%
Asentamientos	AH	25,155.97	12,261.25		11,958.10	4,345.53	14,397.92	1,685.96	746.92	344.61	134.70	71,375.28	142,406.24	4.05%
	Grand Total 25	1,750,123.27	3,498,912.30	98,060.55	330,681.59	873,347.28	356,838.92	365,998.40	34,258.84	46,038.10	42,758.13	72,561.23	7,469,578.60	5.92%

Fuente: elaboración propia, con datos de INEGI (2015).

La superficie y el porcentaje con el área total de la zona de estudio, por cada una de las clases de uso de suelo y vegetación (USV) consideradas, se muestra en la Figura 39.

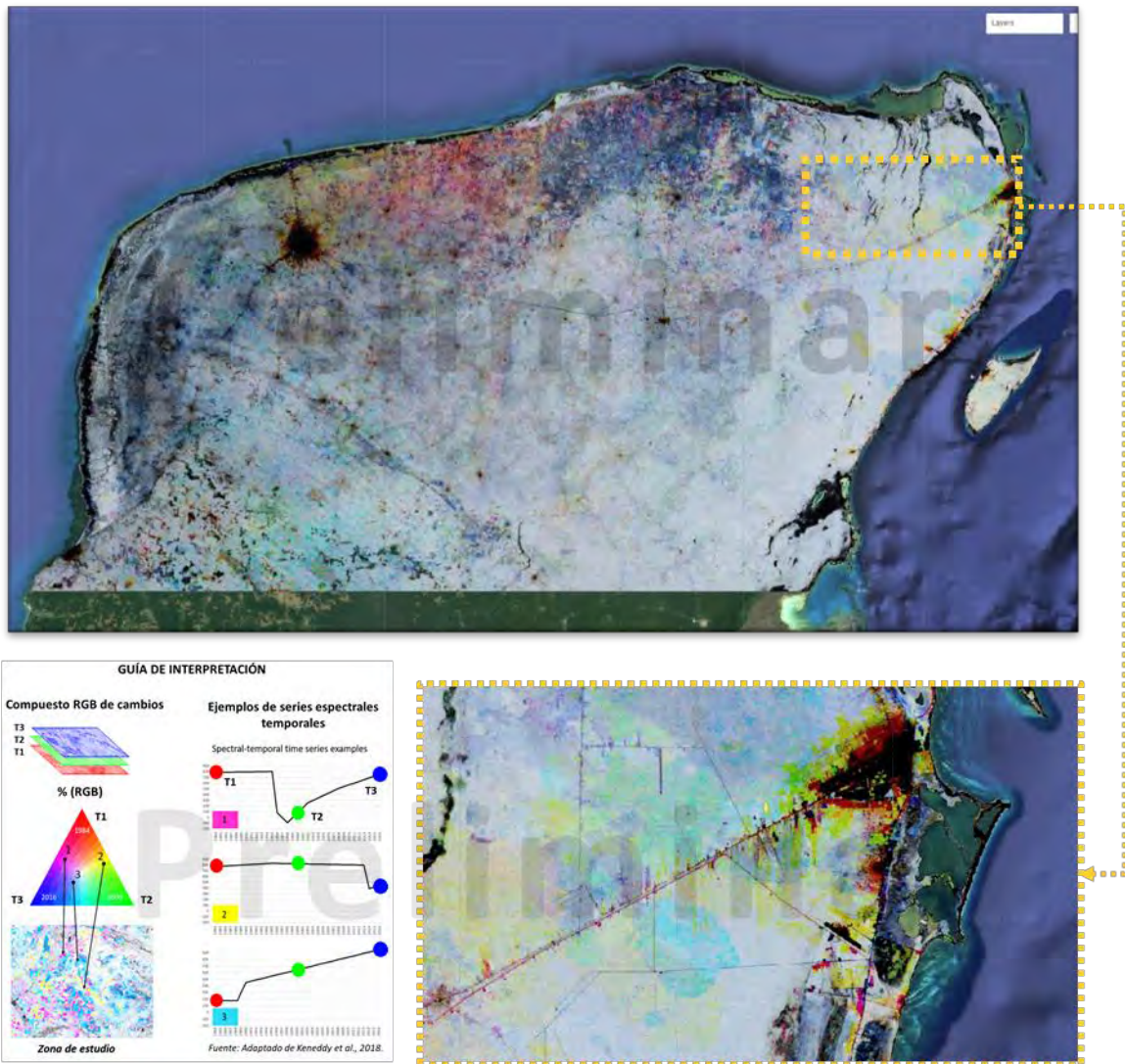


Fuente: elaboración propia, con datos de INEGI (2015).

Figura 39: Cambios en superficie por clases de USV entre las series I12.5 y VI.5.

Para analizar la distribución espacio-temporal de los cambios, se aplicó el modelo LT-GEE a nivel regional y se elaboró un mapa de tendencias mediante la técnica conocida como *Detección de cambio de fecha múltiple* (MCD), a partir de la combinación imágenes en escala de grises en los canales de color rojo, verde y azul (RGB). El resultado obtenido, es una imagen a color en la cual se puede apreciar espacialmente la temporalidad de los cambios ocurridos dentro del período seleccionado.

Se consideraron los años 2001, 2011 y 2020 para generar una imagen RGB en la cual se aprecia la magnitud -intensidad del color- y la temporalidad -tono- de los cambios ocurridos en el período 2001-2020 (Figura 40).



Fuente: elaboración propia con datos Landsat 5, 7, y 8 / Land-Trendr / GEE.

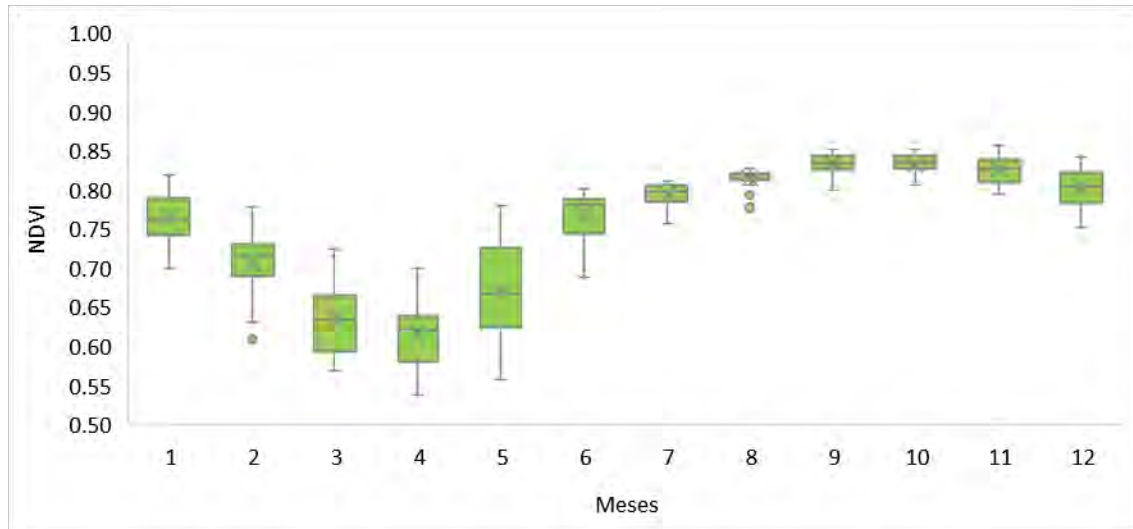
Figura 40: Análisis de tendencias de cambio 2020-2020

Destaca en la imagen que las áreas donde se concentran los mayores impactos a la vegetación son en primera instancia, las asociadas al desarrollo de infraestructura urbana y carretera, seguido de la zona centro de la península (en el estado de Yucatán), como resultado de los cambios de uso de suelo por las actividades agrícolas y pecuarias, así como de tala.

III.3. Estimación de la resiliencia de la selva tropical

Para poder estudiar e identificar la capacidad de resiliencia de la vegetación de tipo selva en el norte de la península de Yucatán, se procedió en primera instancia, a realizar una evaluación del comportamiento de la actividad fotosintética a escala regional (zona de

estudio), lo que permitió identificar la adaptación de la vegetación ante los eventos hidrometeorológicos que se presentan anualmente, como parte de la dinámica atmosférica que impera en la zona. Para ello se construyó una gráfica de cajas (Figura 41) que permitiera observar los patrones de dispersión de los valores mensuales del NDVI obtenidos para la zona y período de estudio.



Fuente: elaboración propia, con datos de INEGI (2015).

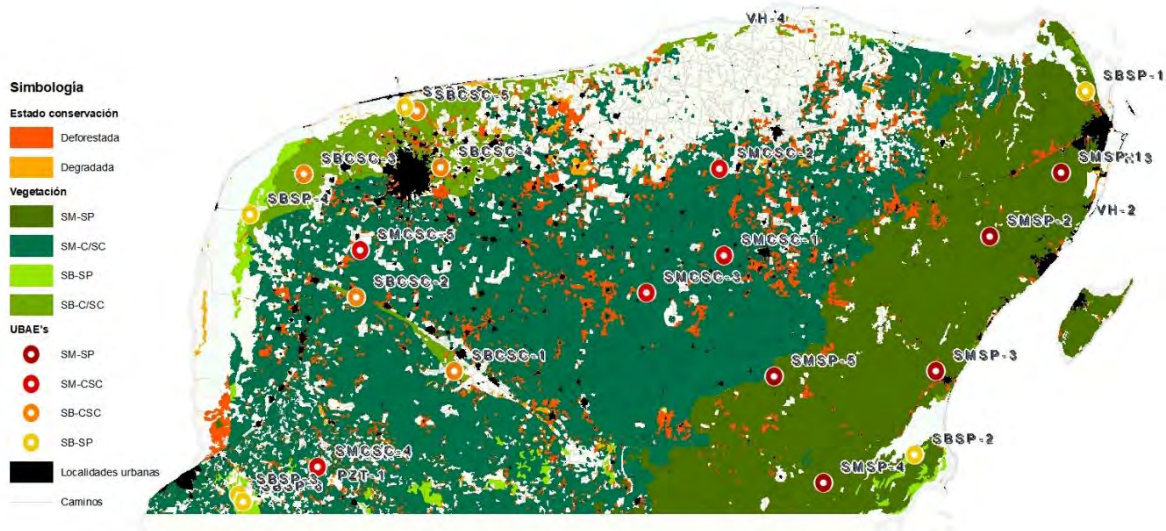
Figura 41: Cambios en superficie por clases de USV entre las series II2.5 y VI.5.

Al analizar la gráfica de la Figura 41, se aprecia que los períodos donde se presenta la mayor disminución y dispersión de los valores es entre los meses de marzo a mayo, que corresponden a la temporada de estiaje, posteriormente se observa como al comienzo de las lluvias asociadas a la temporada de huracanes (junio a noviembre) los valores del NDVI tienden a retornar (ascender) a niveles similares homogéneos (dentro del período de estudio). Posterior a los meses de septiembre y octubre, cuando se registra la mayor actividad ciclónica, se observa una ligera disminución, la cual dada la escala considerada, se puede deber al impacto local de los efectos asociados a los ciclones que impactaron tierra (lluvias y vientos), por último en los meses de diciembre y enero se observa una mayor dispersión de los valores del NDVI, la cual se asocia a las lluvias asociadas a la ocurrencia de frente fríos. Estos resultados indican que a nivel regional, la vegetación de la zona, responde de manera cíclica (estacional) ante los eventos hidrometeorológicos que se presentan anualmente como parte de la dinámica atmosférica que impera en la región, mostrando en términos generales una alta adaptación.

Para estimar de manera puntual la capacidad de resiliencia de la selva baja y mediana (subperennifolia y caducifolia/subcaducifolia), se llevó a cabo el análisis de los resultados derivados de la aplicación del modelo no paramétrico Land-Trendr y de las anomalías estandarizadas de los eventos hidrometeorológicos considerados para el presente estudios.

Se seleccionaron aleatoriamente 5 puntos monitoreo (UBAE's) por cada una de las cuatro clases de vegetación definidas. Cada unidad se delimito en un radio de 250 m a partir de su coordenada central. La selección de la distancia radial (*buffer*) responde a la resolución que ofrecen las imágenes MODIS Terra - MOD13Q1 (USGS, 2022b), a partir de las cuales se extrajeron los valores del NDVI para su posterior normalización y análisis del comportamiento estacional, en contraste con los resultados arrojados por el modelo LT-GEE. Para garantizar que cada una de las UBAE's correspondiera a sitios donde se presenta vegetación, se procedió a realizar una inspección de cada sitio mediante un proceso de fotointerpretación. En los casos en que los puntos seleccionados aleatoriamente no correspondieran a zonas de vegetación, se descartaron y se tomó un punto adicional.

En el mapa de la Figura 42, se presenta la localización de cada una de las UBAE's seleccionadas para cumplir con los objetivos del estudio:



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42: Localización de las UBAE's por tipo de vegetación.

A través del análisis combinado de las diferentes series de tiempo representadas en cada UBAE fue posible identificar y estimar las capacidades de resiliencia de la vegetación bajo el modelo bivariado propuesto por Bhaskar et al. (2018), Hodgson et al. (2015) y Nimmo et al. (2015).

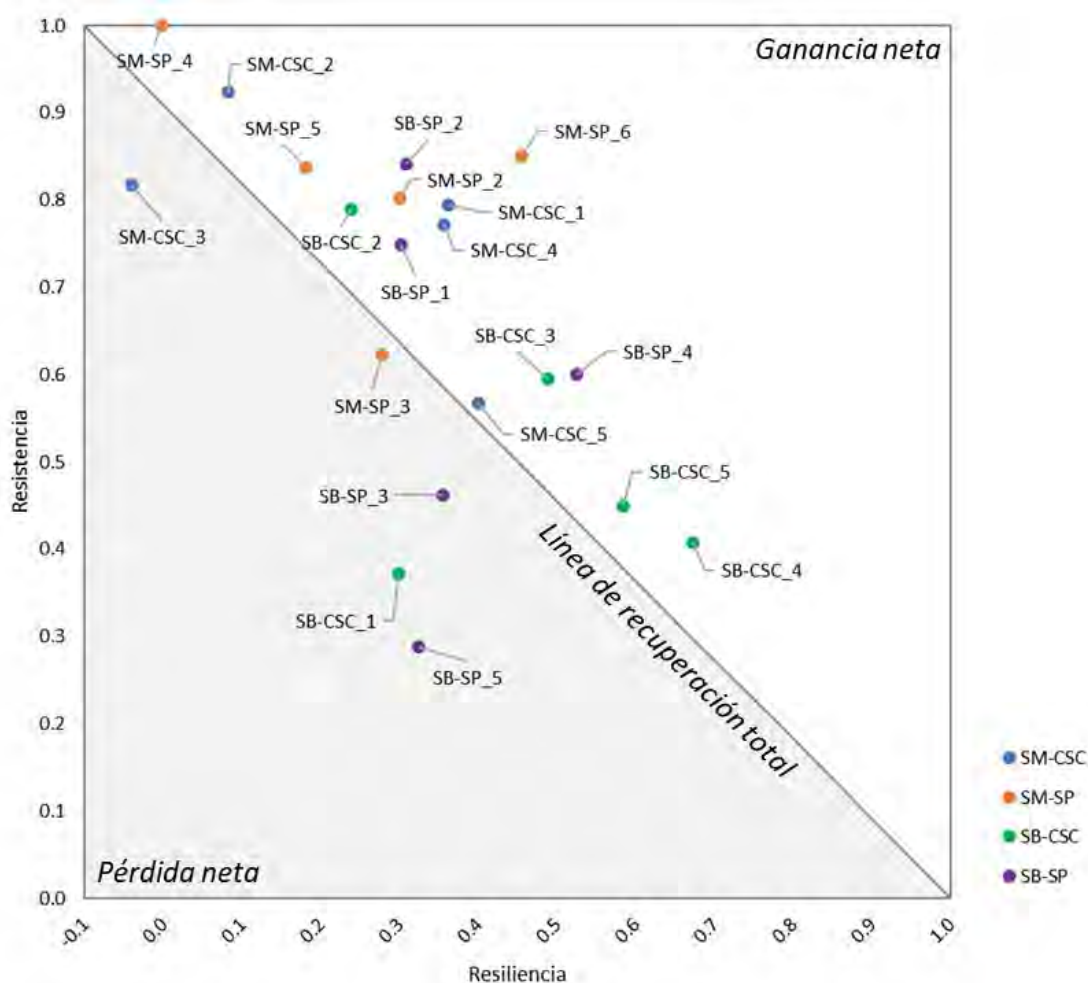
Como parte del análisis individual de la resiliencia de la vegetación en cada UBAE y con fines de comparación de las capacidades de recuperación de la vegetación en cada sitio evaluado, se incluyó el cálculo del *índice de resiliencia global (IR)*, el cual queda determinado a partir de considerar los siguientes valores: T1 = año 2021 (inicio del período de estudio), T2 = al año en que se presentó el menor valor registrado de NDVI (por UBAE) y T3 = año 2020 (fin del período de estudio). El IR representa el cambio -pérdida o ganancia- en función del porcentaje relativo de recuperación (resiliencia) de la vegetación, partiendo del punto base (T1).

Los resultados de la aplicación del modelo teórico bivariado (Resistencia-tasa de recuperación), así como la gráfica con las anomalías estandarizadas para las variables consideradas a escala regional (norte de la península de Yucatán) se presentan en el Cuadro 20 y Figura 43.

Cuadro 20: Resultados del modelo bivariado Resistencia-Resiliencia por UBAE.

Escenario Global (2001-2020) [T1; T3]			Año Máxima Perturbación	Coef. de Cambio Neto	Coef. De Resistencia	Resistencia	Tasa Recuperación	Resistencia (Perturbación)	Recuperación	Cambio Neto ¹	Índice de Resiliencia (IR)
Tipo. Veg	ID UBAE	UBAE	[T2]			[NDVI]	[NDVI/annual]	[%]	[%]	[%]	
SM-CSC ●	1	SM-CSC_1	2011	1.16	0.79	-0.153	0.030	-20.55%	36.22%	15.68%	0.36
	2	SM-CSC_2	2005	1.01	0.92	-0.054	0.004	-7.57%	8.22%	0.65%	0.08
	3	SM-CSC_3	2005	0.78	0.82	-0.132	-0.002	-18.29%	-4.05%	-22.33%	-0.04
	4	SM-CSC_4	2006	1.13	0.77	-0.173	0.019	-22.78%	35.66%	12.87%	0.36
	5	SM-CSC_5	2013	0.97	0.57	-0.269	0.035	-43.31%	39.95%	-3.36%	0.40
SM-SP ●	1	SM-SP_1	2006	1.10	0.80	-0.162	0.017	-19.81%	29.95%	10.14%	0.30
	2	SM-SP_2	2015	0.90	0.62	-0.291	0.043	-37.72%	27.72%	-10.00%	0.28
	3	SM-SP_3	2010	1.00	1.00	0.004	-0.001	0.46%	-0.66%	-0.20%	0.00
	4	SM-SP_4	2003	1.02	0.84	-0.141	0.009	-16.17%	18.09%	1.91%	0.18
	5	SM-SP_5	2005	1.30	0.85	-0.101	0.020	-14.99%	45.47%	30.48%	0.45
SB-CSC ●	1	SB-CSC_1	2013	0.67	0.37	-0.455	0.031	-62.87%	29.88%	-32.99%	0.30
	2	SB-CSC_2	2011	1.03	0.79	-0.159	0.020	-21.12%	23.82%	2.70%	0.24
	3	SB-CSC_3	2009	1.08	0.60	-0.288	0.032	-40.48%	48.84%	8.36%	0.49
	4	SB-CSC_4	2011	1.08	0.41	-0.406	0.051	-59.20%	67.31%	8.11%	0.67
	5	SB-CSC_5	2005	1.03	0.45	-0.413	0.029	-55.07%	58.42%	3.35%	0.58
SB-SP ●	1	SB-SP_1	2005	1.05	0.75	-0.205	0.016	-25.15%	30.11%	4.95%	0.30
	2	SB-SP_2	2001	1.15	0.84	-0.110	0.011	-15.81%	30.89%	15.08%	0.31
	3	SB-SP_3	2009	0.82	0.46	-0.300	0.018	-53.85%	35.44%	-18.42%	0.35
	4	SB-SP_4	2005	1.13	0.60	-0.254	0.022	-39.97%	52.51%	12.53%	0.53
	5	SB-SP_5	2013	0.61	0.29	-0.494	0.032	-71.24%	32.36%	-38.88%	0.32

¹ Valores positivos representan superávit, valores negativos déficit.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 43: Diagrama del modelo bivariado Resistencia-Resiliencia por UBAE por tipo de vegetación.

Los resultados muestran que del total de puntos analizados (n=20) para las cuatro clases de vegetación consideradas en el período 2011-2020, en el 40% (n=8) de los casos se registró una recuperación con superávit en términos de los valores del NDVI, de entre 5% al 30%. En el 35% de las UBAE's (n=7) la recuperación fue total, con valores del NDVI en el orden de $\pm 5\%$, y tan solo en el 25% (n=5) de los casos, se registró un déficit en los valores del NDVI de entre -10% a -40%.

En el 80% de los casos (n=16) se tuvo una recuperación por encima del 90%, 11 de los cuales la recuperación osciló entre un 90% y un 110%, mientras en los 5 restantes, la recuperación presentó un superávit entre el 110% y el 130%. En cuatro de los casos, la recuperación osciló entre un 60% y 80%, correspondiendo a las UBAE's: SB-SP_5, SB-SP_3, SB-CSC_1 y SM-CSC_3.

Lo anterior se resume en que en el 80% de los puntos de monitoreo la vegetación presentó estados de recuperación ante eventos perturbadores de origen natural, lo que indica una alta capacidad de resistencia y resiliencia de los sistemas forestales

Del análisis efectuado en cada una de las UBAE's se desprende que son los períodos de sequía los que mayores afectaciones provocan sobre la vegetación, dado que sus efectos se dan a nivel regional, caso contrario ocurre con los ciclones tropicales, cuyas lluvias y vientos asociados, tienen un impacto local en función de la trayectoria de cada meteoro, la cual está representada por la zonas expuestas a vientos huracanados *-strike zone-*, centrada con respecto al ojo del huracán (NHC, 2019b; Sánchez-Rivera et al, 2020, 2022).

Los resultados individuales por sitio de monitoreo (UBAE) se presentan en fichas técnicas diseñadas exprofeso (ver Anexo A), en las cuales se muestran los resultados del modelo Land-Trendr, las anomalías estandarizadas de cada una de las variables consideradas y la relación de los ciclones tropicales que impactaron la península. El número de escenarios por cada UBAE está determinado en función de la cantidad de puntos de interrupción (vértices) identificados por el modelo Land-Trendr. Se incluyen también, los resultados del modelo bivariado, con la estimación de las tasas de recuperación, cambio neto y capacidad de resiliencia.

Los resultados del análisis por UBAE para cada clase de vegetación estudiada se presentan a continuación:

Las selvas medianas caducifolias y subcaducifolias, se distribuyen en la parte central de la península, predominantemente en territorio del estado de Yucatán. De las 5 UBAE's analizadas, se identificó que en 3 de los sitios la vegetación se encuentra fuertemente adaptada a eventos naturales de diversas intensidades, reportando una tasa de recuperación mayor al 95% y solo en uno de los casos, se registra una recuperación cercana al 77%. Los eventos que mayores impactos provocaron fueron los períodos de sequía, que se caracterizan por un déficit en la precipitación y altas temperaturas de la superficie terrestre y cuyos efectos se presentan a nivel regional, seguido de los ciclones

tropicales, los cuales se acompañan de intensos vientos y lluvias, y cuyo impacto se refleja directamente en las zonas aledañas a la trayectoria de los meteoros.

En el caso de la UBAE SM-CSC_1 (Figura 44), la máxima disminución de los valores del NDVI fueron del orden del 30%, tras el paso de los huracanes Alex [H2], Karl [H3] y Richard [H2] en el año 2010. Teniendo una recuperación menor a 5 meses. En el caso de la UBAE SM-CSC_2, la disminución máxima del NDVI ocurrió entre los años 2018 y 2019, como consecuencia del período de sequía que se registró el 2018, los valores descendieron alrededor de un 34%, presentando tasas de recuperación al 100% en menos de un lapso aproximado de 4 a 6 meses.

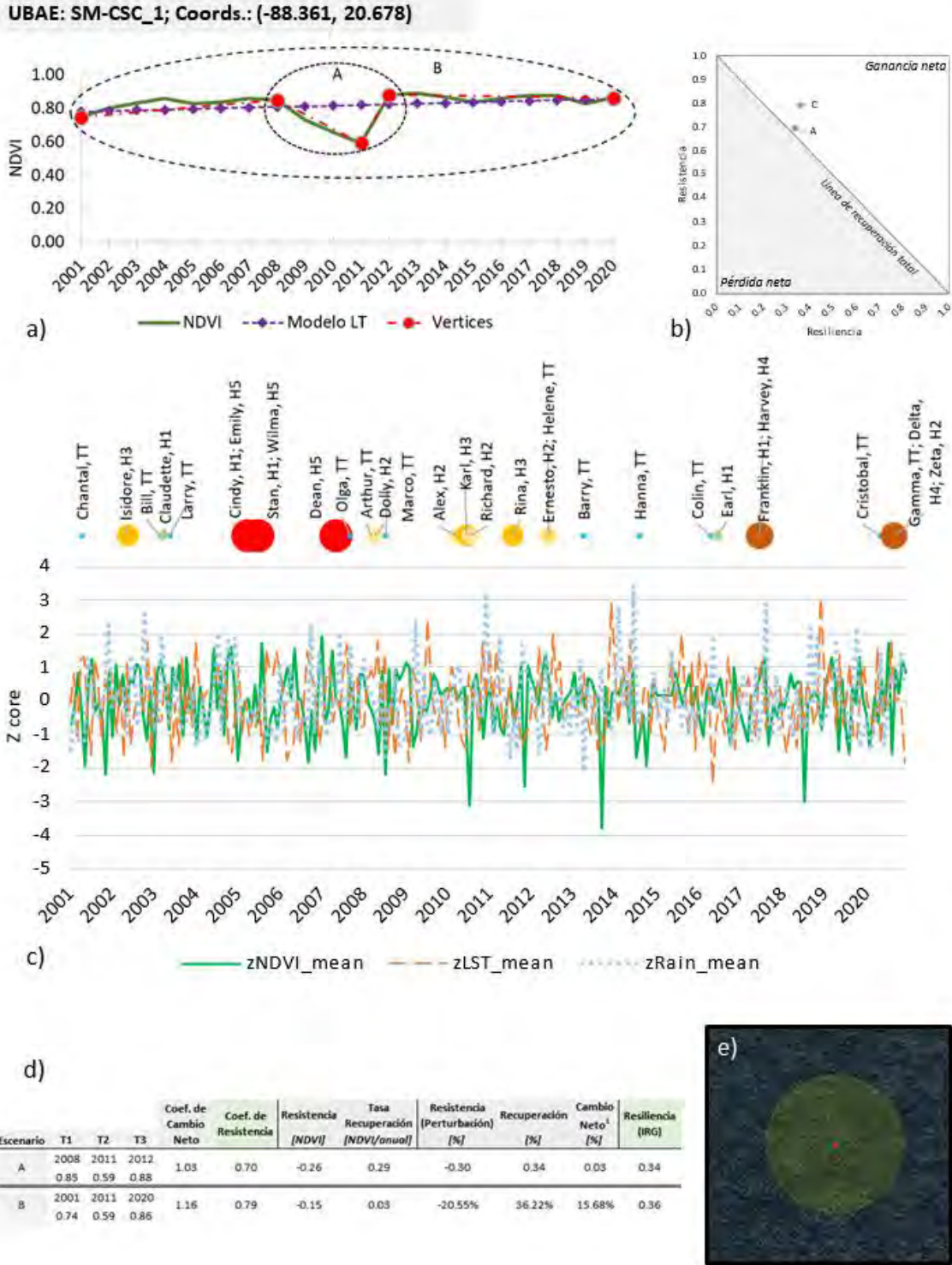
En la UBAE SM-CSC_3, similar a los sitios anteriores, la disminución del NDVI osciló entre un 20% y 30% -hasta antes del año 2017-, correspondiendo la mayor afectación al paso del huracán Wilma en 2005. Posterior al año 2017, se presenta en la zona un proceso de cambio de uso de suelo asociado a urbanización, lo que derivó una gran fragmentación de la selva, y por ende en la disminución de la capacidad de resiliencia del sistema, registrando una pérdida del orden del 26% y una recuperación del 78% global.

Para la UBAE SM-CSC_5, el principal cambio se dio entre 2010 y 2013, en el cual se presentaron dos períodos de sequía, con anomalías de temperaturas por encima de dos desviaciones estándar, y en el inter, la ocurrencia de los ciclones tropicales *Alex* [H2], *Karl* [H3], *Richard* [H2] y *Rina* [H3]. La vegetación registró caídas en los valores del NDVI del orden del 50%, con una tasa de recuperación cercana al 8% anual. La recuperación se da de manera continua hasta retornar a valores cercanos a los que se tenían previo a las perturbaciones en un lapso de entre 3 y 4 años -de acuerdo con los resultados del modelo LT-GEE-, al analizar los datos a nivel mensual, se aprecia que como parte del proceso fenológico -estacionalidad- la vegetación presentó en el inter, períodos de recuperación en períodos de 2 a 3 meses, que no representan cambios duraderos, pero que fueron acumulativos hasta alcanzar un nuevo estado de estabilidad hacia el año 2017.

La selva media subperennifolia se ubica al este de la península, predominantemente en el estado de Quintana Roo. Los resultados de las UBAE's analizadas indican que este tipo de vegetación se encuentra mejor adaptada, pues en la

mayoría de los casos la recuperación de la vegetación ante las perturbaciones consideradas en este estudio, alcanzo valores por encima del 90% y en casos del 100% o superior. Algunos caso de excepción son la UBAE SM-SP_1, la cual registra una perturbación importante asociada al impacto del huracán Wilma, registrando una perturbación – en términos del NDVI- del 20%. Posterior al paso del ciclón, la vegetación presenta una recuperación constante, con oscilaciones intermedias en función de la presencia de períodos de sequía y ciclones tropicales Figura 45.

En contraste, las selvas bajas subperennifolia y, caducifolia y subcaducifolia, se encuentran distribuidas hacia las zonas costeras de la península, principalmente hacia el estado de Yucatán, con escasa presencia, particularmente de las subperennifolias en la zona norte del Quintana Roo y hacia la región de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an (RBSK), ocupando cerca del 6% de la superficie de la zona de estudio -zona norte de la península de Yucatán-. Este tipo de vegetación si bien de acuerdo a los resultados obtenidos, registra mayores cambios ante la presencia de fenómenos perturbadores de origen natural, también se caracteriza por tener una alta elasticidad -resistencia y tasa de recuperación- (Figuras Figura 46 y Figura 47).

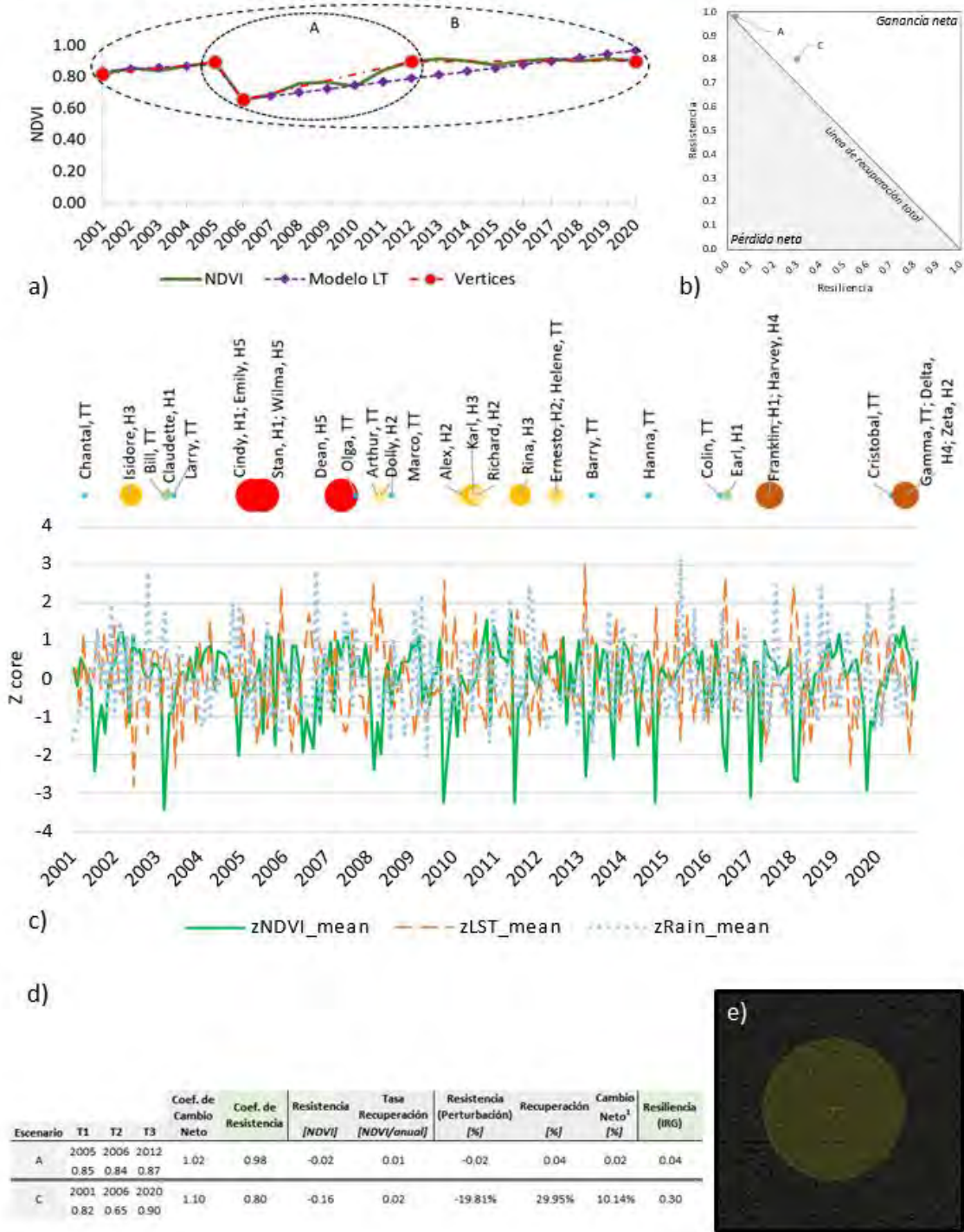


Donde: a) Diagrama del modelo Land-Trendr; b) Diagrama del modelo bivariado Resistencia-Resiliencia; c) comportamiento de las variables asociadas a eventos hidrometeorológicos (ciclones tropicales y anomalías estandarizadas del NDVI, Temperatura de la superficie terrestre y lluvia; d) imagen con la localización del punto de monitoreo en sombreado amarillo.

Fuente: Elaboración propia, productos utilizados descritos en la metodología.

Figura 44: Resultados del modelo de resiliencia para la UBAE: SM-CSC_1.

UBAE: SM-SP_1; Coords.: (-87.012, 20.991)

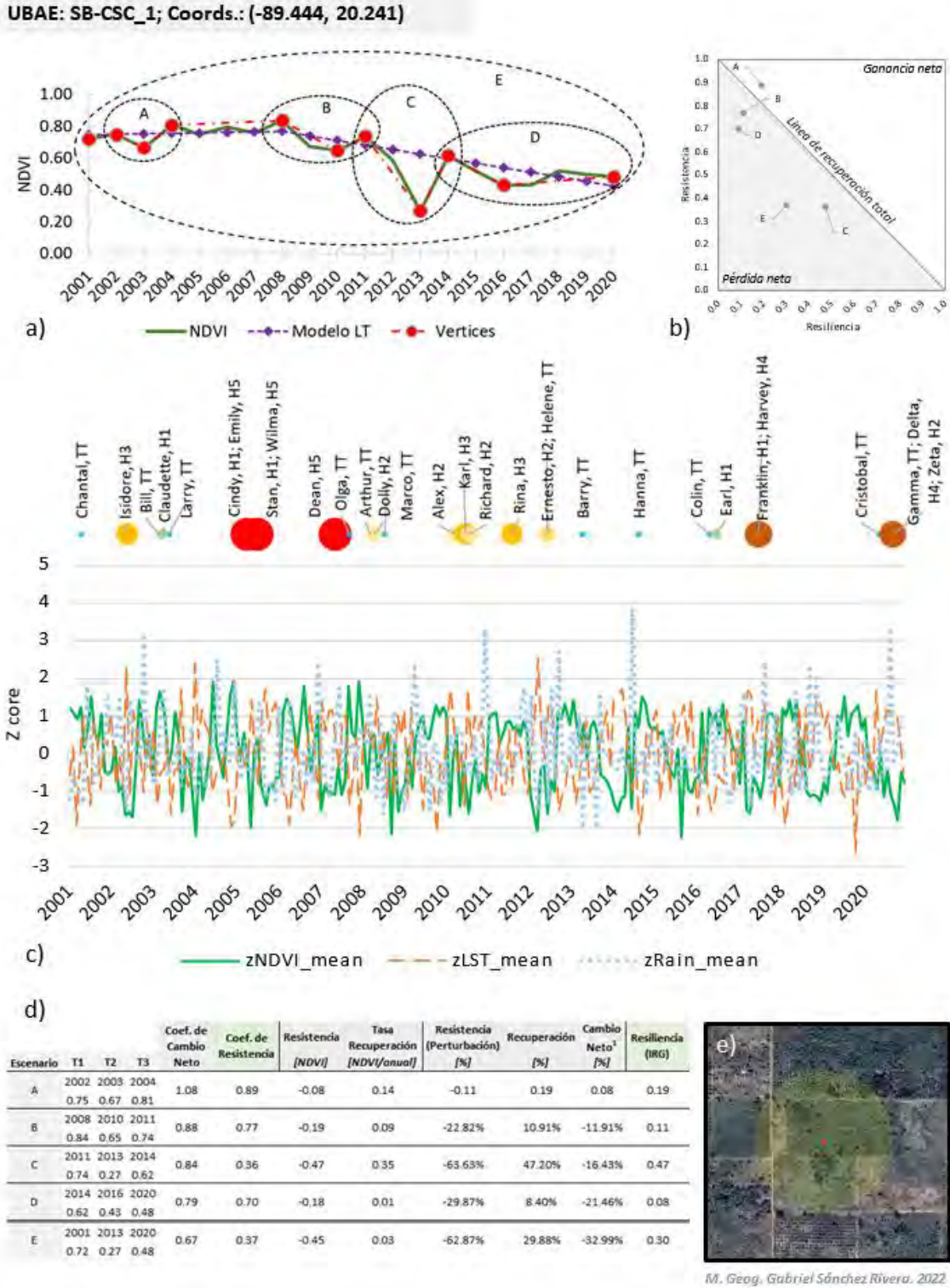


M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

Donde: a) Diagrama del modelo Land-Trendr; b) Diagrama del modelo bivariado Resistencia-Resiliencia; c) comportamiento de las variables asociadas a eventos hidrometeorológicos (ciclones tropicales y anomalías estandarizadas del NDVI, Temperatura de la superficie terrestre y lluvia; d) imagen con la localización del punto de monitoreo en sombreado amarillo.

Fuente: Elaboración propia, productos utilizados descritos en la metodología.

Figura 45: Resultados del modelo de resiliencia para la UBAE: SM-SP_1.

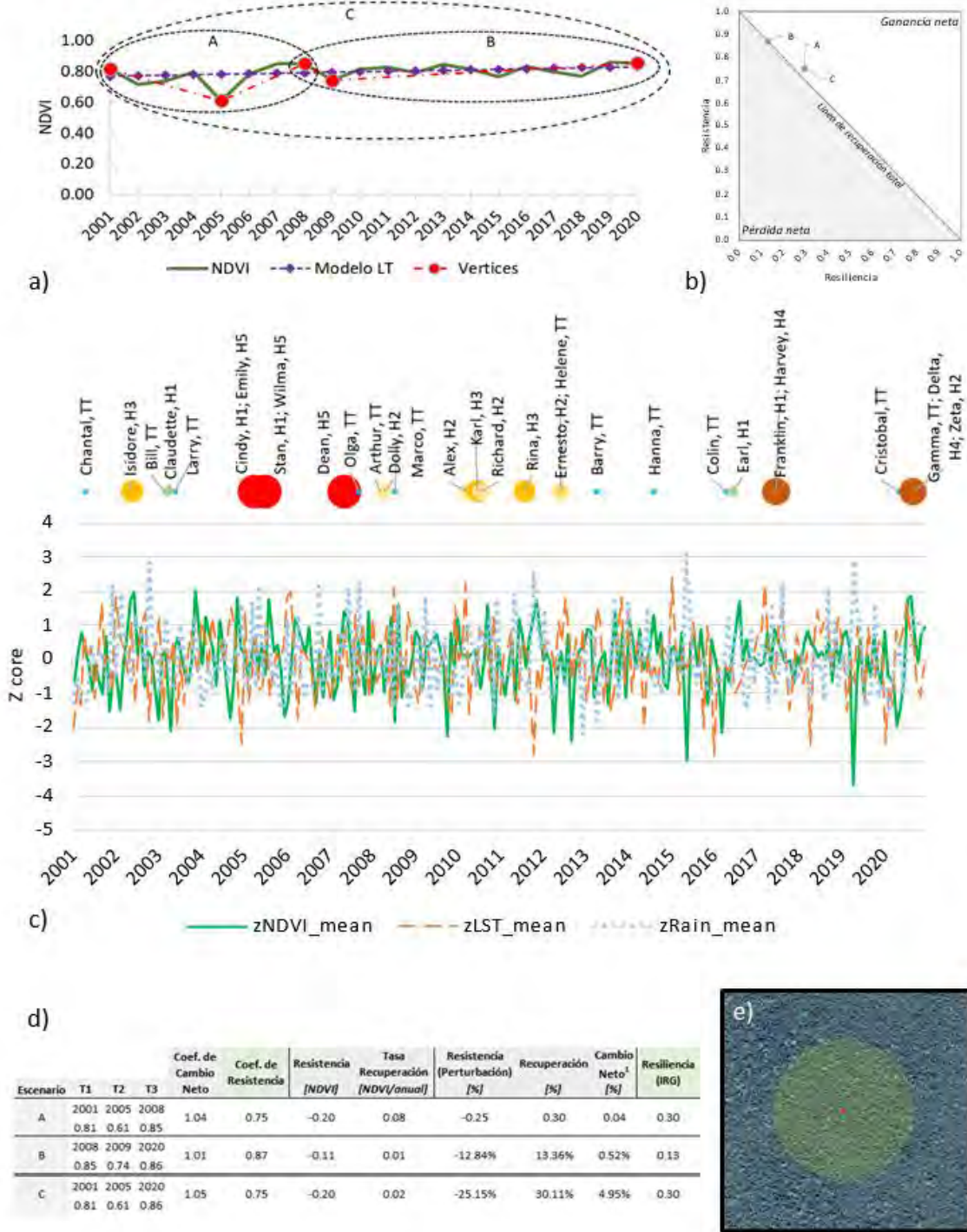


Donde: a) Diagrama del modelo Land-Trendr; b) Diagrama del modelo bivariado Resistencia-Resiliencia; c) comportamiento de las variables asociadas a eventos hidrometeorológicos (ciclones tropicales y anomalías estandarizadas del NDVI, Temperatura de la superficie terrestre y lluvia; d) imagen con la localización del punto de monitoreo en sombreado amarillo.

Fuente: Elaboración propia, productos utilizados descritos en la metodología.

Figura 46: Resultados del modelo de resiliencia para la UBAE: SB-CSC_1.

UBAE: SB-SP_1; Coords.: (-87.598, 19.926)



M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

Donde: a) Diagrama del modelo Land-Trendr; b) Diagrama del modelo bivariado Resistencia-Resiliencia; c) comportamiento de las variables asociadas a eventos hidrometeorológicos (ciclones tropicales y anomalías estandarizadas del NDVI, Temperatura de la superficie terrestre y lluvia; d) imagen con la localización del punto de monitoreo en sombreado amarillo.

Fuente: Elaboración propia, productos utilizados descritos en la metodología.

Figura 47: Resultados del modelo de resiliencia para la UBAE: SB-SP_1.

CAPÍTULO IV. Discusión.

Hosseini, Barker y Ramirez-Marquez (2016) afirman que el concepto de resiliencia es empleado cada vez con mayor frecuencia en diferentes ámbitos y disciplinas, lo que conlleva a la formulación de diversas definiciones del término. Sin embargo, el concepto de “resiliencia ecológica” propuesto por Holling (1996) de acuerdo a lo que afirman Cai et al. (2018) y Hosseini et al. (2016) es el que se mantiene vigente para efectos de estudios relacionados con la capacidad de adaptación y recuperación de los sistemas naturales. Este concepto implica a su vez, conceptos como la vulnerabilidad, adaptabilidad y capacidad de recuperación de los ecosistemas, por lo que es ampliamente utilizado para estimar los efectos de agentes que pudieran ser considerados como perturbadores, entre los que destacan ciclones tropicales, incendios forestales, lluvias intensas, entre otros.

Wang et al. (2017) mencionan que la estimación de la resiliencia puede ser tanto cuantitativa o cualitativa. De lo anterior para el presente estudio se toma como base de análisis el concepto de resiliencia ecológica, asumiendo como parámetro de estimación la actividad fotosintética de la vegetación de tipo selva, mediante el índice normalizado de vegetación (NDVI), el cual provee información cuantitativa en términos de la reflectividad antes y después de la ocurrencia de un evento hidrometeorológico y que puede ser vinculada con la capacidad de resistencia, adaptación y recuperación de los sistemas ecológicos en diversas escalas temporales, para lo cual se utilizó el Modelo teórico bivariado propuesto por Hodgson et al. (2015) y Nimmo et al. (2015)

Los resultados del estudio muestran concordancia con el concepto de resiliencia de Holling (1996), al ofrecer una estimación de la magnitud de los cambios asociados a la perturbación del sistema natural como consecuencia de la interacción con diversos eventos hidrometeorológicos en categoría de extremos, así como una estimación de las tasas de cambio para alcanzar nuevos estados estables. Los hallazgos muestran que la vegetación de tipo selva dentro de la zona de estudio, presenta una alta capacidad de resistencia y resiliencia, mostrando períodos de recuperación asociados a los procesos fenológicos de entre 1 a 3 meses y de 12 a 18 meses en el caso de efectos duraderos estimados a partir del análisis de los cambios anuales y descartando las variaciones fenológicas interanuales.

Los hallazgos del estudio proveen información que concuerda con las evidencias de los efectos derivados por las variaciones en los regímenes climáticos —contemporáneos— de la región asociadas al calentamiento global reportados por la ONU (2019), UNEP (2019), UNSDG (2018) y el IPCC (2018); entre los que se cuentan: el incremento en el número de días de calor extremo; incremento de temperaturas en superficie; mayor duración de la temporada de estiaje; lluvias más intensas por frentes fríos y ciclones; incremento en el número e severidad de incendios forestales; inundaciones por lluvias intensas en períodos cortos; entre otros.

En el caso de los ciclones tropicales, los resultados del análisis no muestran una tendencia significativa al aumento en el número de ciclones, por el contrario, destaca una gran variabilidad entre temporadas, lo que coincide con Walsh (2004) quien menciona que ha habido poco consenso en relación al aumento de meteoros. Sin embargo autores como Walsh et al. (2016) concuerdan en que debido al calentamiento global los escenarios del cambio climático prevén un aumento en la actividad ciclónica, la cual será evidente hacia los años 50's del presente siglo.

Lo opuesto ocurre con la intensidad -magnitud-, donde los resultados muestran un aumento con tasas de cambio del 37% aproximadamente en términos de la “velocidad máxima de vientos sostenidos” y del 19% para la “mínima presión atmosférica”. Si bien los resultados no pueden ser considerados como definitivos ni concluyentes debido a variabilidad de la incertidumbre de los datos especialmente para los años anteriores a 1965, nuestras estimaciones son congruentes con los pronósticos de los escenarios actuales (Goodess, 2013; IPCC, 2014; Solow, 2017; Tapia-Palacios et al., 2018; y Walsh et al., 2016). Ejemplo es el aumento en intensidad de los ciclones en categorías de huracán H4 y H5 reportados por Elsner, Kossin, y Jagger (2008), Emanuel (2005) y Webster (2005), quienes estudiaron períodos que van de los 25, 30 y 35 años, respectivamente. No obstante las diferencias en el tamaño de las series de tiempo consideradas, nuestro hallazgos son coincidentes con los resultados de tales estudios.

En contraste, Klotzbach (2006) y Kossin, Knapp, Vimont, Murnane, y Harper (2007) no encontraron evidencias de una tendencia al incremento de la magnitud de los

meteoros, lo que puede atribuirse a los limitados períodos analizados (20 años), ya que de acuerdo con Décamps (2008) la detección de cambios o tendencias estará en función de la temporalidad de los datos analizados y como lo sugiere la WMO (2018) se requieren períodos de al menos 30 años para estudiar el comportamiento de la atmósfera.

De acuerdo con la definición del IPCC (2012, 2014), 260 ciclones pueden ser caracterizados como eventos extremos, sin embargo al analizar individualmente las características de cada uno de ellos se encontró que el 39.62% apenas alcanzaron en algún momento de su trayectoria la categoría máxima H3, aún más, dentro de este rango, quedan incluidos el ciclón subtropical *Charlie* (1972) que no alcanza la escala *Saffir-Simpson* y la tormenta tropical *Keith* (1988), lo que concuerda con la postura de Camuffo et al. (2018) quienes sugieren que los eventos extremos debe estar al menos en el orden de los percentiles 1 y 99 o superiores.

Al analizar los eventos que superan los umbrales de referencia 1.0 y 99.0 (percentiles), todos alcanzaron categorías máximas de huracán H4 y H5, siendo causantes de los mayores daños y pérdidas económicas en la región de acuerdo con los estudios publicados por: Bonilla-Moheno (2010); CENAPRED (2005); y Rodríguez-Alarcón (2019), entre otros.

La principal diferencia entre los estudios encontrados en la literatura con el presente, radica en que el análisis y clasificación de los eventos extremos se realiza en términos de la intensidad en la escala *Saffir-Simpson* y en los efectos ocasionados por estos fenómenos, tal es el caso de los trabajos realizados por Palacio-Aponte (2010) donde evalúa los efectos del impacto de huracanes tomando como geo-indicador la morfología costera post-huracán y el estudio de Emanuel (2005) quien determina un índice de destructividad potencial de los huracanes a través de la correlación con la temperatura de la superficie del mar.

Es importante señalar que la evaluación y caracterización de los daños provocados por eventos ciclónicos debe considerar tanto el incremento de la población en las zonas susceptibles de ser impactadas, como de la calidad y tipo de infraestructura

(vulnerabilidad), por lo que la comparación entre las afectaciones en diferentes estadios espacio-temporales puede resultar subjetiva.

Al comparar los valores de lluvia de mayor intensidad con la ocurrencia de eventos ciclónicos en categoría de extremos, destaca el año 2005 por ser el único que se presentaron dos ciclones categoría H5 (*Emily* y *Wilma*) y dos H4 (*Katrina* y *Rita*), sin embargo la precipitación promedio para temporada (197.7 mm/mes) queda por debajo del percentil 90. A diferencia de la temporada 2020, donde se presentaron eventos de menor intensidad que en el 2005, con cuatro ciclones de los cuales, dos alcanzaron categoría de tormenta tropical (*Cristóbal* y *Gamma*) y dos la de huracanes, *Delta* (H4) y *Zeta* (H2), con el máximo promedio mensual de 238.0 mm entre los meses de junio y noviembre. Lo anterior concuerda con diversos estudios en lo que se destaca la alta incidencia de eventos meteorológicos extremos en la península de Yucatán como es el caso de los resultados reportados por Sánchez-Rivera et al. (2021b), en los que se destaca que de 1851 a la fecha cuatro huracanes pueden ser considerados como “extremadamente raros” al superar los rangos de los percentiles de <0.1 y >99.9 para la mínima presión atmosférica y velocidad máxima de vientos sostenidos, de los cuales, *Gilberto* (1988) y *Wilma* (2005) impactaron la PY en categoría H5 en la escala Saffir-Simpson.

Los resultados obtenidos no muestran una tendencia constante al aumento de los volúmenes de lluvia asociados a los eventos ciclónicos, toda vez que al observar la distribución de los datos se aprecia una gran variabilidad entre temporadas, por lo que los valores no se ajustan a la línea de tendencia estimada ($R^2 = 0.0929$), Sin embargo Walsh et al. (2016) y el IPCC, 2014 plantean que derivado del calentamiento global los escenarios del cambio climático prevén un aumento en la actividad ciclónica y por ende en el aumento de los volúmenes de lluvia asociados a estos fenómenos, situación que se presentará de manera paulatina hacia los años 50's del presente siglo.

En otro sentido, Vink y Ahsan, 2018, destacan que la presencia de eventos meteorológicos asociados a la actividad ciclónica, proveen una serie de beneficios a los ecosistemas, los cuales pueden ser caracterizados en función de los servicios

ecosistémicos los que favorecen. Esto se ve reflejado en la pronta recuperación que presenta la vegetación posterior a períodos de sequía como se identificó en los resultados presentados en este estudio.

Los resultados concuerdan con lo reportado por años Bautista-Zúñiga y Aguilar Duarte (2021), y el SMN (2021), quienes reportan que la temporada 2020 fue la de mayor actividad registrada desde 1851 a la fecha, con respecto al número ciclones que se formaron ($n=30$), siendo a su vez, la que aportara los mayores volúmenes de lluvia en la zona norte de la península de Yucatán en los últimos 21 años.

De la correlación entre las anomalías estandarizadas de la temperatura superficial y lluvias, los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Magaña (1999), quien menciona que las temperaturas de la superficie terrestre alcanzan sus mayores niveles durante el período de mínimas precipitaciones. Lo que a su vez en el caso de la zona norte de la península se corroboró al identificar que es durante los meses de marzo a mayo (estiaje) cuando se contabiliza el mayor número de puntos de calor.

En contraste, si bien lo reportado por Galván y Magaña (2020) a nivel nacional indica que en años recientes se registra un aumento en la cantidad de incendios forestales, los hallazgos del estudio no proveen evidencia de tal situación para la zona norte de la península, siendo los años 2006, 2009 y 2011, en lo que se identificó el mayor número de puntos de calor asociados a incendios durante el período 2001-2020.

Del análisis de los cambios de cobertura vegetal y uso de suelo coinciden con lo reportado por Challenger y Soberón (2008), quienes plantean que derivado de los procesos que se originan a partir de programas federales de desmontes, colonización e impulso agropecuario, aunado a la promoción del desarrollo turístico, se presenta un permanente proceso de pérdida y deterioro de los ecosistemas. Los hallazgos son coincidentes con la pérdida de la cobertura forestal estimada por Ellis et al. (2015), quienes la estiman en el orden de las 279,152 ha en el período 2001-2013.

Estudios realizados en las selvas tropicales, sugieren que estos ecosistemas se encuentran altamente adaptados o presentan una alta resistencia a los cambios estacionales provocados por eventos climáticos o antropogénicos recurrentes (Jimenez-

Rodríguez et al., 2018; Kennard et al., 2002; Paz et al., 2018), lo cual coincide con los hallazgos obtenidos, donde se identificó que las selva tropical tiene una alta adaptabilidad ante la ocurrencia de eventos de origen natural, siendo la sequía la que produce las mayores afectaciones, seguida de los ciclones tropicales. Caso contrario, las actividades antrópicas infieren daños a los sistemas naturales por fragmentación y cambios de uso de suelo.

Para conocer la capacidad de resiliencia de un ecosistema es necesario comprender sus procesos de recuperación, posterior a la ocurrencia de eventos perturbadores, para lo cual, es necesario realizar observaciones y mediciones puntuales, previas y posteriores a tales eventos, identificando así, el estado de la cobertura vegetal en términos de los cambios en la biomasa, la tasa de caída de hojarasca y la estructura en general de las selvas tropicales (Hodgson et al., 2015; Holm et al., 2017). Sin embargo, llevar a cabo trabajos de campo puede resultar complejo en términos presupuestales y logísticos, toda vez que debido a los daños ocasionados en los sistemas, particularmente por la presencia de fenómenos en categoría de extremos, el acceso a los sitios se puede ver restringido (Holm et al., 2017). Como alternativa, este estudio presenta un método de estimación de la resistencia-resiliencia de las selvas tropicales, de moderada resolución espacial, amplia cobertura y amplia temporalidad (García Mora & Mas, 2011), con lo cual es posible identificar zonas de atención prioritaria o de interés particular previos a la elaboración de estudios puntuales de campo.

CAPÍTULO V. Conclusiones.

La metodología propuesta, basada en la adquisición de datos del NDVI, a partir de productos y técnicas de percepción remota, así como la aplicación de un modelo bivariado de resistencia-resiliencia, permitieron cumplir con el objetivo general y responder la pregunta de investigación planteada, al estimar la capacidad de resistencia, tasas de recuperación y resiliencia de la selva tropical baja y mediana presentes en la zona norte de la península de Yucatán, durante el período 2001-2020. Por otra parte, a través del análisis estadístico basado en el modelo “excedente a un umbral relativo” se logró caracterizar los eventos hidrometeorológicos considerados en el estudio en categoría de extremos, permitiendo contar con un marco de referencia común para la comparación entre los distintos fenómenos, en concordancia con la definición propuesta por la WMO (2018).

Se comprobaron las hipótesis planteadas, identificándose a partir del análisis de los resultados que la capacidad de resiliencia de la vegetación de tipo selva de la península de Yucatán ante el impacto de eventos catalogados como extremos, presenta variaciones en función de la ocurrencia previa y posterior de diversas perturbaciones hidrometeorológicas extremas, lo que se manifiesta en un aumento en las tasas de recuperación, las cuales no superaron en ninguno de los casos períodos mayores a 18 meses, antes de alcanzar nuevos estados estables, y tasas de recuperación superiores al 90% con respecto a los valores del NDVI registrados al inicio del período de estudio.

De acuerdo con los hallazgos obtenidos, se confirma que la vegetación de tipo selva presente en el norte de la península de Yucatán se encuentra adaptada y presenta una alta capacidad de resistencia-resiliencia, ante las condiciones climáticas de la región y a los diversos eventos meteorológicos que de manera natural ocurren periódicamente, incluyendo aquellos que pueden ser caracterizados como eventos extremos. En el 80% de los casos (n=16) se tuvo una recuperación por encima del 90%, incluso, en 11 de ellos, la recuperación osciló entre un 90% y un 110%, mientras en los 5 restantes, la recuperación presentó un superávit entre el 110% y el 130%.

En particular, las selvas medias demostraron ser las mejor adaptadas al impacto de eventos en categoría de extremos, alcanzando las mayores tasas de recuperación en el orden de un 80%, presentando un superávit de entre el 120% y 130%. Por su parte, las selvas bajas reportaron las menores tasas de recuperación, donde en dos UBAE's los niveles de recuperación fueron del orden del 70% y mientras en las restantes, los valores oscilaron entre 100% y 115% como máximo.

De la caracterización de la vegetación, sobresale que las selvas medianas ocupan el 66% de la superficie de la zona de estudio, mientras que las selvas bajas tan solo un 6%. Para el período 1999-2016 los resultados estiman una pérdida aproximada de 280 mil ha a una tasa de -0.57 %/anual para la selvas medianas, mientras que para la selvas bajas, se estimó un incremento de 32 mil ha, a una tasa de 1.02 %/anual.

Los resultados del estudio son congruentes con los reportados en diversos estudios disponibles en la literatura científica, los cuales ofrece evidencias que apuntan a que las principales presiones sobre los ecosistemas provienen de las actividades humanas, las cuales ponen en riesgo la capacidad de resiliencia de la vegetación al incrementar su vulnerabilidad.

La estimación de los cambios asociados a eventos derivados de actividades humanas queda fuera de los alcances del presente proyecto, sin embargo la metodología y técnicas utilizadas pueden ser utilizadas para medir y estimar los efectos de tales tipos de sucesos.

De lo anterior destaca que, ante los cambios en el régimen climático y la ocurrencia de eventos meteorológicos cada vez más severos, es indispensable trabajar en el diseño e implementación de programas específicos que integren medidas de mitigación y adaptación, tendientes al aseguramiento de las funciones de los ecosistemas y la disponibilidad de los servicios ecosistémicos derivados de ellos, lo cual redundará en mejores condiciones de seguridad y bienestar para las poblaciones de la región.

La vegetación de la península depende de la dinámica climatológica de la región, la cual promueve y conserva la diversidad biológica y los servicios ecosistémicos. Se identificó, de acuerdo con los resultados, casos en que los eventos meteorológicos

proveen beneficios a los ecosistemas, más allá de ser contraproducentes, favoreciendo la pronta recuperación de los sistemas ecológicos para alcanzar nuevos estados de estables.

Los hallazgos corroboran la hipótesis que plantea una relación inversa entre la resistencia y la tasa de recuperación, como se puede apreciar en el diagrama del modelo bivariado resistencia-resiliencia (Figura 43).

Se comprobó que es posible estimar la capacidad de resiliencia de la vegetación a partir del análisis de series temporales derivadas de productos de percepción remota y el uso de índices espectrales, como es el caso del NDVI, el cual ofrece una estimación de la actividad fotosintética (vigorosidad) de la vegetación, lo que se refuerza al combinar diversas metodologías y técnicas a partir del uso de plataformas basadas en la nube como son el caso de Giovanni (NASA, 2021) y Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017), las cuales proporcionan el acceso y adquisición de grandes volúmenes de productos derivados de imágenes satelitales. Paralelamente, se comprobó que mediante el uso de productos derivados de imágenes satelitales, es posible estimar y caracterizar diversos fenómenos hidrometeorológicos en categoría de extremos, tomando como base las diversas variables que los describen.

Mediante el aprovechamiento de las capacidad que ofrece el entorno de la plataforma GEE, como es el análisis de grandes conjuntos de datos, fue posible el diseño y programación de algoritmos para identificar la ocurrencia, cambios, estacionalidad y recurrencia de cada uno de los fenómeno hidrometeorológico considerados en el presente estudio. Lo que permite que las técnicas y métodos utilizados, puedan ser fácilmente implementados en otras zonas o regiones de interés, con lo que podrían comparar las capacidades de resiliencia de diversos ecosistemas ante eventos en categoría de extremos.

Se comprobó la amplia flexibilidad de la plataforma GEE para acceder y operar grandes bancos de información geoespacial basada en la nube, con lo que se cumplieron los objetivos particulares relacionados con la caracterización de los eventos en categoría de extremos.

Por su parte, la implementación del modelo Land-Trend (Kennedy et al., 2018) permitió identificar los cambios de larga duración y que no se encuentran relacionados

con los procesos fenológicos, pudiendo estimar así las tasas y la capacidad de recuperación de la vegetación asociados a la ocurrencia de eventos en categoría de extremos.

En paralelo, a través del análisis de series de tiempo a escala mensual, se pudo identificar variaciones en cuanto tiempo y magnitud de la recuperación de la vegetación en función de los procesos fenológicos, lo que permitió verificar la capacidad de resistencia-resiliencia de los ecosistemas estudiados, para adaptarse y retornar a estados equivalentes -estables- a los que presentaban antes de la ocurrencia de eventos en categoría de extremos.

La caracterización de eventos extremos en función de su probabilidad de ocurrencia, a partir del análisis de las características que los definen y conforman, provee un marco de referencias para estimar la magnitud y efectos de la interacción con el medio natural. Tales estimaciones pueden proveer información útil para fortalecer el conocimiento de la capacidad de resistencia y vulnerabilidad tanto de los sistemas ecológicos, como de la infraestructura y medios de producción que integran los sistemas socioecológicos.

El estudio y gestión —integral— de los problemas asociados al calentamiento global, así como sus causas y efectos sobre la península de Yucatán y la selva tropical, requieren del conocimiento de cada uno de los componentes que integran las esferas económica, ambiental y social, desde el marco de referencia de los sistemas socioecológicos complejos, cuyo funcionamiento está en dependencia directa entre las relaciones dadas por las actividades humanas, los procesos atmosféricos y físico-biológicos del medio natural, en escalas espacio-temporales que abarcan desde lo general a lo particular y en un entorno multi e interdisciplinario. Tal es el caso, de ahondar en la comprensión de las capacidades de resistencia y recuperación —resiliencia— de la vegetación de tipo selva presentes en la península de Yucatán, así como la caracterización de los eventos en categoría de extremos, en función de la intensidad y rareza de su ocurrencia, por lo que los resultados del presente estudio proveen información útil para perfilar estrategias de adaptación ante los efectos del cambio climático y atender las metas establecidas para cumplir con los ODS's 13 y 15.

El cambio climático como proceso natural se ve incrementado como consecuencia de las actividades humanas, reflejándose en un aumento de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Como resultado de la presente investigación, se identificó que el estudio y comprensión de los procesos y efectos de los eventos meteorológicos que inciden sobre la península de Yucatán, requiere el análisis de la ocurrencia de tales fenómenos como consecuencia del calentamiento global.

De manera similar, para estudiar y comprender las implicaciones del cambio climático sobre la selva tropical, se deben considerar las relaciones que van desde la escala planetaria —clima global— hasta las escalas locales —mesoclima de la península de Yucatán—.

La conservación de las selvas tropicales de la península de Yucatán depende estrechamente de la aplicación de medidas de adaptación y mitigación ante el cambio climático y los ODS. (remediación, reforestación, disminución de contaminantes), para ello es necesario realizar acciones en diversas escalas:

Internacional

- Cumplir con los acuerdos en materia de protección ambiental y en la implementación de medidas de mitigación y adaptación ante el cambio climático y ODS's.

Nacional

Federal

- Asegurar el cumplimiento del marco jurídico en materia de protección al ambiente —en todos los niveles—.
- Instaurar la educación ambiental obligatoria en todos los niveles.
- Promover campañas nacionales de concientización a través de las tecnologías de la información y comunicación (TIC's).
- Adaptar modelos de crecimiento económico (regional) menos intensos en consumo energético y de los recursos naturales.

Estatal

- Promover estudios que permitan conocer el estado de los ecosistemas, capacidades de resistencia y resiliencia.
- Diseñar e implementar políticas y programas tendientes a disminuir las presiones asociadas a las actividades antrópicas.
- Aplicar medidas de adaptación y mitigación ante el cambio climático y los ODS.

- Promover la Inversión adecuada y suficiente para la atención y operación de los programas diseñados exprofeso.
- Promover proyectos a nivel de posgrado (en todas la disciplinas) que tenga como objetivo atender problemas específicos asociados con las medidas de adaptación y mitigación ante el CC y el cumplimiento de los ODS.

Municipal

- Diseñar planes de desarrollo urbano, reglamentos de construcción y de aprovechamiento de los recursos acordes con las condiciones locales.
- Capacitar a servidores públicos, desarrolladores y empresarios en prácticas sustentables y de protección al medio ambiente.

Los hallazgos del presente proyecto pueden coadyuvar con información necesaria para estudiar las capacidades de resiliencia de los sistemas socioecológicos ante eventos en categoría de extremos, como es el caso de períodos de sequía intensos como los que se han venido presentando en años recientes (SMN, 2021). Así como, contribuir en el diseño e implementación de programas específicos que integren medidas de mitigación y adaptación, tendientes al aseguramiento de las funciones de los ecosistemas y la disponibilidad de los servicios ecosistémicos derivados de ellos, promoviendo mejores condiciones de seguridad y bienestar para las poblaciones de la región.

Los métodos y procedimientos utilizados al estar basados en sistemas de gestión espacial en la nube, pueden ser fácilmente replicados para analizar y estimar la capacidad de resiliencia de los sistemas forestales de diversas regiones del país, ello aunado a la continua disponibilidad de nuevos productos de percepción remota, con mayores resoluciones espacial y temporal, ofrecen posibilidades para continuar estudiando los efectos de diversos fenómenos perturbantes de origen natural y antrópico. Es de destacar que el uso de técnicas a partir de productos derivados de percepción remota para el análisis de diversas variables asociadas a fenómenos físicos e hidrometeorológicos como son los índices espectrales (índices verdes), precipitaciones y lluvias, temperatura superficial y oceánica, incendios, entre otras, ofrecen grandes ventajas en cuanto al estudio de áreas extensas y largas series de tiempo. Sin embargo estas no sustituyen los trabajos de recolección y análisis de datos que puedan realizarse *in situ*, siendo por tanto, complementarios y no mutuamente excluyentes.

El estudio de las capacidades de respuesta de los ecosistemas basado en un enfoque bivariado de "cambio de estado" (resistencia) y "tiempo de retorno" (resiliencia), aplicado bajo un marco de técnicas de análisis espacial, permitió identificar los factores ambientales extrínsecos a cada unidad ecológica estudiada, a partir de la observación de cambios de estado a largo plazo.

La metodología y técnicas utilizadas permiten el análisis multiescalar al facilitar la extracción de datos a partir de productos derivados de percepción remota para zonas de interés de diferentes extensiones, por lo que el modelo puede ser aplicado para analizar las capacidades de resiliencia de la vegetación a partir de diferentes enfoques, como puede ser el estudio de casos específicos de eventos de origen tanto natural, como antrópico.

Derivado de los resultado de algunos de los capítulos que conforman el estudio, se han publicado dos artículos en revistas indexadas, cuatro capítulos en libros arbitrados y uno en memoria de congreso internacional (Sánchez-Rivera, et al., 2022, 2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e, 2020).

BIBLIOGRAFÍA

- Achard, F., DeFries, R. S., Eva, H., Hansen, M., Mayaux, P., & Stibig, H. J. (2007). Pan-tropical monitoring of deforestation. *Environmental Research Letters*, 2(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045022>
- Achour, N., Pantartzis, E., Pascale, F., & Price, A. D. F. (2014). Integration of resilience and sustainability: from theory to application. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 6(3), 347–362. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-05-2013-0016>
- Agnew, C. T. (2000). Using the SPI to Identify Drought. *Drought Network News (1994-2001)*, 12(1), 8. <https://digitalcommons.unl.edu/droughtnetnews/1/>
- Albalawi, E. K., & Kumar, L. (2013). Using remote sensing technology to detect, model and map desertification: A review. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 11(2), 791–797.
- Alexander, M. A., Bladé, I., Newman, M., Lanzante, J. R., Lau, N.-C., & Scott, J. D. (2002). The Atmospheric Bridge: The Influence of ENSO Teleconnections on Air–Sea Interaction over the Global Oceans. *Journal of Climate*, 15(16), 2205–2231. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2)
- Allen, C. R., Angeler, D. G., Cumming, G. S., Folke, C., Twidwell, D., & Uden, D. R. (2016). Quantifying spatial resilience. *Journal of Applied Ecology*, 53(3), 625–635. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12634>
- Álvarez-Yépez, J. C., Martínez-Yrizar, A., & Fredericksen, T. S. (2018). Special Issue: Resilience of tropical dry forests to extreme disturbance events. *Forest Ecology and Management*, 426(June), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.067>
- Anderies, J. M., Folke, C., Walker, B., & Ostrom, E. (2013). Aligning Key Concepts for Global Change Policy: Robustness, Resilience, and Sustainability. *Ecology and Society*, 18(2), art8. <https://doi.org/10.5751/ES-05178-180208>
- Anderson-Teixeira, K. J., Davies, S. J., Bennett, A. C., Gonzalez-Akre, E. B., Muller-Landau, H. C., Joseph Wright, S., Abu Salim, K., Almeyda Zambrano, A. M., Alonso, A., Baltzer, J. L., Basset, Y., Bourg, N. A., Broadbent, E. N., Brockelman, W. Y., Bunyavejchewin, S., Burslem, D. F. R. P., Butt, N., Cao, M., Cardenas, D., ... Zimmerman, J. (2015). CTF5-ForestGEO: A worldwide network monitoring forests in an era of global change. *Global Change Biology*, 21(2), 528–549. <https://doi.org/10.1111/gcb.12712>
- Anyamba, A., & Tucker, C. J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments*, 63(3), 596–614. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.007>
- Appendini, C. M., Meza-Padilla, R., Abud-Russell, S., Proust, S., Barrios, R. E., & Secaira-Fajardo, F. (2019). Effect of climate change over landfalling hurricanes at the Yucatan

- Peninsula. *Climatic Change*, 157(3–4), 469–482. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02569-5>
- Bahamondez, C., & Thompson, I. D. (2016). Determining forest degradation, ecosystem state and resilience using a standard stand stocking measurement diagram: theory into practice. *Forestry*, 89(3), 290–300. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv052>
- Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24(3), 223–234. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>
- Bailey, L. D., & van de Pol, M. (2016). Tackling extremes: Challenges for ecological and evolutionary research on extreme climatic events. *Journal of Animal Ecology*, 85(1), 85–96. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.12451>
- Balvanera, P., Astier, M., Gurri, F. D., & Zermeño-Hernández, I. (2017). Resiliencia, vulnerabilidad y sustentabilidad de sistemas socioecológicos en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.005>
- Bárcena, A., Prado, A., Beteta, H., Samaniego, J. L., & Lennox, J. (2010). *La economía del Cambio Climático en Centroamérica. Síntesis 2010*.
- Barkin, D., y Dos, I. (1998). Riqueza, pobreza y desarrollo sostenible. *Barkin, David*, 43. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=EwEGGNWCy7EC&oi=fnd&pg=PA5&dq=desarrollo+sostenible&ots=7_wQisL6Ek&sig=IxnneQx0uNeSGyLtwA_ZABWtsiM%0Ahttp://www.bibliociencias.cu/gsd/collect/libros/import/Riqueza_pobreza_y_desarrollo_sostenible.pdf
- Barrios, C., Coria, G., y Martínez, T. (2007). *La relación global - local: Sus implicancias prácticas para el diseño de estrategias de desarrollo* (R. A. I. L.- Global (ed.)). Red Académica Iberoamericana Local - Global. <https://books.google.es/books?id=ujyB0dfNnoC>
- Bartha, S., Czárán, T., & Scheuring, I. (1997). Spatiotemporal scales of non-equilibrium community dynamics: A methodological challenge. *New Zealand Journal of Ecology*, 21(2), 199–206.
- Bastos Lima, M. G., Kissinger, G., Visseren-Hamakers, I. J., Braña-Varela, J., & Gupta, A. (2017). The Sustainable Development Goals and REDD+: assessing institutional interactions and the pursuit of synergies. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 17(4), 589–606. <https://doi.org/10.1007/s10784-017-9366-9>
- Bautista-Zúñiga, F., y Aguilar Duarte, Y. (2021). Riesgo de inundación ante lluvias extremas en el karst de la ciudad de Mérida Yucatán, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(35), 0–12. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3661>
- Becoña Iglesias, E. (2006). Resiliencia : definición, características y utilidad del concepto. *Revista de Psicopatología y Psicología Clínica*, 11(3).

<https://doi.org/10.5944/rppc.vol.11.num.3.2006.4024>

- Benavides, G., H., Cárdenas, P., y Gutiérrez, M. V. (2017). *Estrategia de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación Forestal (REDD +) del Estado de Quintana Roo*. 168.
<https://qroo.gob.mx/sites/default/files/unisitio2019/08/EEREDD%2BQROO%202019-3.pdf>
- Bender, E. A., Case, T. J., & Gilpin, M. E. (1984). Perturbation Experiments in Community Ecology: Theory and Practice. *Ecology*, 65(1), 1–13. <https://doi.org/10.2307/1939452>
- Bennett, R., Welham, K., Hill, R. A., & Ford, A. L. J. (2012). The Application of Vegetation Indices for the Prospection of Archaeological Features in Grass-dominated Environments. *Archaeological Prospection*, 19(3), 209–218.
<https://doi.org/10.1002/arp.1429>
- Berrouet, L. M., Machado, J., & Villegas-Palacio, C. (2018). Vulnerability of socio-ecological systems: A conceptual Framework. *Ecological Indicators*, 84(September 2017), 632–647. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.051>
- Bhaskar, R., Arreola, F., Mora, F., Martinez-Yrizar, A., Martinez-Ramos, M., & Balvanera, P. (2018). Response diversity and resilience to extreme events in tropical dry secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 426(June 2017), 61–71.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.028>
- Birch, J. C., Newton, A. C., Aquino, C. A., Cantarello, E., Echeverria, C., Kitzberger, T., Schiappacasse, I., & Garavito, N. T. (2010). Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(50), 21925–21930.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1003369107>
- Bocchini, P., Frangopol, D. M., Ummenhofer, T., & Zinke, T. (2014). Resilience and Sustainability of Civil Infrastructure: Toward a Unified Approach. *Journal of Infrastructure Systems*, 20(2), 4014004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000177](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000177)
- Bogardi, J. J., Villagran, J. C., Birkmann, J., F. Renaud, Sakulski, D., Chen, X., Affeltranger, B., Mensa, A., Kaplan, M., Renaud, F., Sakulski, D., Chen, X., Affeltranger, B., Mensa, A., & Kaplan, M. (2005). Vulnerability in the context of climate change. *UNU - EHS*, June, 21–23. http://www.pik-potsdam.de/research/research-domains/transdisciplinary-concepts-and-methods/project-archive/favaia/workspace/documents/bogardi_etal_2005.pdf
- Bonilla-Moheno, M. (2010). Damage and recovery of forest structure and composition after two subsequent hurricanes in the Yucatan Peninsula. *Caribbean Journal of Science*, 46(2–3), 240–248. <https://doi.org/10.18475/cjos.v46i2.a12>
- Boose, E. R., Foster, D. R., & Hall, B. (2003). Geographical and Historical Variation in Hurricanes Across the Yucatán Peninsula. In *Gomez-Pompa A, Allen MF, Fedick SL, Jimenez-Osornio JJ, editors. The lowland Maya area: three millennia at the human-*

- wildland interface. Binghamton, NY: Haworth Press. p. 495–516 (pp. 495–516).
https://www.researchgate.net/profile/Brian-Hall-13/publication/268260749_Geographical_and_Historical_Variation_in_Hurricanes_Across_the_Yucatan_Peninsula/links/5739cfa408ae9ace840db1fa/Geographical-and-Historical-Variation-in-Hurricanes-Across-the-Yucatan
- Brand, F. S., & Jax, K. (2007). Focusing the Meaning(s) of Resilience: Resilience as a Descriptive Concept and a Boundary Object. *Ecology and Society*, 12(1), art23.
<https://doi.org/10.5751/ES-02029-120123>
- Buma, B., & Wessman, C. A. (2011). Disturbance interactions can impact resilience mechanisms of forests. *Ecosphere*, 2(5), 1–13. <https://doi.org/10.1890/ES11-00038.1>
- Burger, J., Gochfeld, M., Pletnikoff, K., Snigaroff, R., Snigaroff, D., & Stamm, T. (2008). Ecocultural Attributes: Evaluating Ecological Degradation in Terms of Ecological Goods and Services Versus Subsistence and Tribal Values. *Risk Analysis*, 28(5), 1261–1272. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01093.x>
- Cáceres, D. F. (2009). *Etapas del Proceso de Investigación Científica*.
<http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/etapas-proceso-investigacion-cientifica/etapas-proceso-investigacion-cientifica.pdf>
- Cai, H., Lam, N. S. N., Qiang, Y., Zou, L., Correll, R. M., & Mihunov, V. (2018). A synthesis of disaster resilience measurement methods and indices. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31(April), 844–855.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.07.015>
- Calvente, A. M. (2007). Resiliencia: un concepto clave para la sustentabilidad. In *s.l.:Programa de Difusión e Investigación en Sustentabilidad, Centro de Altos Estudios Globales*. <http://www.sustentabilidad.uai.edu.ar/pdf/cs/UAI-CS-200-003-Resiliencia.pdf>
- Camuffo, D., della Valle, A., & Becherini, F. (2018). A critical analysis of the definitions of climate and hydrological extreme events. *Quaternary International*, September.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.008>
- 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-Villanueva, L., y Velázquez-Torres, D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socio- ecológicos y resiliencia. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 17(2), 11–32. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40143424002>
- CENAPRED. (2005). *Características e Impacto Socioeconómico del huracán “Emily” en Quintana Roo, Yucatán, Tamaulipas y Nuevo León en Julio de 2005*.
- Cerè, G., Rezgui, Y., & Zhao, W. (2017). Critical review of existing built environment resilience frameworks: Directions for future research. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 25(May), 173–189.

<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.09.018>

- Challenger, A., y Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres. In *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (Vol. 1, pp. 87–108). <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/capitalNatMex>
- Chatterjee, C., & Mozumder, P. (2015). Hurricane Wilma, utility disruption, and household wellbeing. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 395–402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.09.005>
- Chazdon, R. L. (2003). Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(1–2), 51–71. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00042>
- Climate Prediction Center. (2005). *El Niño Regions*. Internet Team. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml
- Cohen, W. B., Yang, Z., Healey, S. P., Kennedy, R. E., & Gorelick, N. (2018). A LandTrendr multispectral ensemble for forest disturbance detection. *Remote Sensing of Environment*, 205(July 2017), 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.015>
- Cole, L. E. S. S., Bhagwat, S. A., & Willis, K. J. (2014). Recovery and resilience of tropical forests after disturbance. *Nature Communications*, 5(May), 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms4906>
- Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. In *Antimicrobial agents and chemotherapy* (Vol. 58, Issue 12). Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Conde Álvarez, A. C., y Gay García, C. (2008). *Guía para la Generación de Escenarios de Cambio Climático a Escala Regional Primera versión*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/handle/1/1574>
- Ley Federal Sobre Metrología y Normalización Capítulo Único, 1 (2012).
- Connell, S. D., & Ghedini, G. (2015). Resisting regime-shifts: The stabilising effect of compensatory processes. *Trends in Ecology and Evolution*, 30(9), 513–515. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.014>
- Connell, S. D., Nimmo, D. G., Ghedini, G., Mac Nally, R., & Bennett, A. F. (2016). Ecological Resistance - Why Mechanisms Matter: A Reply to Sundstrom et al. *Trends in Ecology and Evolution*, 31(6), 413–414. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.03.015>
- Cook, B., & Pau, S. (2013). A Global Assessment of Long-Term Greening and Browning Trends in Pasture Lands Using the GIMMS LAI3g Dataset. *Remote Sensing*, 5(5), 2492–2512. <https://doi.org/10.3390/rs5052492>
- Cruz-Huerta, C., González-Guillén, M. J., Martínez-Trinidad, T., & Escalona-Maurice, M. J. (2015). Modeling land-use change and future deforestation in two spatial scales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, XXI(2), 137–156.

<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.06.025>

- Cui, X., Gibbes, C., Southworth, J., & Waylen, P. (2013). Using remote sensing to quantify vegetation change and ecological resilience in a semi-arid system. *Land*, 2(2), 108–130. <https://doi.org/10.3390/land2020108>
- de Bruijn, K. M., Buurman, J., Mens, M., Dahm, R., & Klijn, F. (2017). Resilience in practice: Five principles to enable societies to cope with extreme weather events. *Environmental Science and Policy*, 70, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.02.001>
- de Jong, R., de Bruin, S., Schaepman, M., & Dent, D. (2011). Quantitative mapping of global land degradation using earth observations. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6823–6853. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.512946>
- Décamps, H. (2008). Ecosystems and extreme climatic events. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9–10), 553–563. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.004>
- Ellis, E. A., Romero Montero, J. A., & Hernández Gómez, I. U. (2015). *Evaluación y mapeo de los determinantes de la deforestación en la Península Yucatán*. *October*, 155. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4132.1682>
- Elsner, J. B., Kossin, J. P., & Jagger, T. H. (2008). The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 455(7209), 92–95. <https://doi.org/10.1038/nature07234>
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686–688. <https://doi.org/10.1038/nature03906>
- Engle, N. L., & Lemos, M. C. (2010). Unpacking governance: Building adaptive capacity to climate change of river basins in Brazil. *Global Environmental Change*, 20(1), 4–13. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.07.001>
- ESRI. (2016). *Geoprocesamiento - Informática con datos geográficos*. <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000004000000.htm>
- ESRI. (2022). *ArcGIS Desktop: Release 10* (p. 2011). Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com/>
- Evangelista, O., López-Blanco, J., Caballero, N., y Martínez, A. (2010). Patrones espaciales de cambio de cobertura y uso del suelo en el área cafetalera de la sierra norte de Puebla. *Investigaciones Geográficas*, 72, 23–38.
- Everham, E. M., & Brokaw, N. V. L. (1996). Forest damage and recovery from catastrophic wind. *The Botanical Review*, 62(2), 113–185. <https://doi.org/10.1007/BF02857920>
- Fao. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010 / Global Forest Resources 2010 Assessment Informe Principal / Main Report*. <http://www.fao.org/3/i1757s/i1757s.pdf>
- FAO. (1996). *Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study of change processes*. *FAO forestry paper 130*. Food and Agriculture Organization of the

- United Nations. <https://www.fao.org/3/w0015e/W0015E00.htm>
- Farfán, L. M. (2004). Regional Observations during the Landfall of Tropical Cyclone Juliette (2001) in Baja California, Mexico. *Monthly Weather Review*, 132(7), 1575–1589. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1575:RODTLO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1575:RODTLO>2.0.CO;2)
- FCCPY. (2020). *Fondo de Cambio Climático de la Península de Yucatán*. <http://www.ccpy.gob.mx/agenda-regional/fondo-cambio-climatico.php>
- Field, C. B., Randerson, J. T., & Malmström, C. M. (1995). Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1), 74–88. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00066-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00066-V)
- FIRMS. (2022). *MODIS Collection 6 NRT Hotspot / Active Fire Detections MCD14DL*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.006>
- Flanders Marine Institute. (2018). *IHO Sea Areas, version 3*. <https://doi.org/10.14284/323>
- Fotheringham, A. S., & Rogerson, P. (2009). *The SAGE Handbook of Spatial Analysis*. SAGE Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4135/9780857020130>
- Fotheringham, A. S., & Rogerson, P. A. (1993). GIS and spatial analytical problems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7(1), 3–19. <https://doi.org/10.1080/02693799308901936>
- FRA. (2015). *Documento de Trabajo de la Evaluación de los Recursos Forestales No. 180. Términos y Definiciones. 180, 37*.
- Freeman, M. C., Pringle, C. M., & Jackson, C. R. (2007). Hydrologic Connectivity and the Contribution of Stream Headwaters to Ecological Integrity at Regional Scales1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43(1), 5–14. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00002.x>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gallopín, G. C. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico* (Issue 64). <https://econpapers.repec.org/RePEc:ecr:col039:5763>
- Galván, L., & Magaña, V. (2020). Forest fires in Mexico: an approach to estimate fire probabilities. *International Journal of Wildland Fire*, 11. <https://doi.org/10.1071/WF19057>
- Garcés-Paz, H. (2000). *Investigación científica* (1ª Edición). Investigación Científica.
- García Mora, T. J., y Mas, J.-F. (2011). Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 83–94. <https://doi.org/10.18268/BSGM2011v63n1a7>

- Gavin, M. C., McCarter, J., Mead, A., Berkes, F., Stepp, J. R., Peterson, D., & Tang, R. (2015). Defining biocultural approaches to conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(3), 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.12.005>
- GEE. (2022a). *Non-Parametric Trend Analysis*. <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/nonparametric-trends>
- GEE. (2022b). *Temporal Segmentation*. <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-algorithms-temporalsegmentation-structuralchangebreakpoints>
- George, P. (1975). *Geografía activa* (Ariel (ed.)). Colección Elcano, la geografía y sus problemas.
- Ghazoul, J., Burivalova, Z., Garcia-Ulloa, J., & King, L. A. (2015). Conceptualizing Forest Degradation. *Trends in Ecology & Evolution*, 30(10), 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.001>
- Ghazoul, J., & Chazdon, R. L. (2017). Degradation and Recovery in Changing Forest Landscapes: A Multiscale Conceptual Framework. *Annual Review of Environment and Resources*, 42(1), 161–188. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-060736>
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8(January), 10. https://www.researchgate.net/profile/MA_Gilabert/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion/links/00b7d5187635eb5a1a000000/Acerca-de-los-indices-de-vegetacion.pdf
- Glasby, T. M., & Underwood, A. J. (1996). Sampling to differentiate between pulse and press perturbations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 42(3), 241–252. <https://doi.org/10.1007/BF00414371>
- Goeking, S. A., & Menlove, J. (2017). *New Mexico 's Forest Resources , 2008 – 2014* (Issue November). https://www.fs.fed.us/rm/pubs_series/rmrs/rb/rmrs_rb024.pdf
- Gómez-Mendoza, L. (2004). *La relación entre el Índice Normalizado de Vegetación y la variabilidad del clima en Oaxaca: una herramienta para el manejo de ecosistemas*. 1–5.
- Gómez-Mendoza, L. (2007). *Variabilidad Climática y cambio de uso del suelo en la Sierra Norte de Oaxaca: implicaciones en los escenarios de cambio climático* [Universidad Nacional Autónoma de México]. http://ru.atheneadigital.filos.unam.mx/jspui/handle/FFYL_UNAM/5044_TD168?mode=simple
- Gómez-Mendoza, L., Galicia, L., y Aguilar-Santelises, R. (2008). Sensibilidad de grupos funcionales al cambio climático en la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas*, 67(1003), 76–100.
- Goodchild, M. (1992). Geographical Information Science. *International Journal of Geographical Information Science*, 6(1), 31–45. <https://doi.org/10.1080/02693799208901893>

- Goodchild, M. (2000). The current status of GIS and spatial analysis. *Journal of Geographical Systems*, 2(1), 5–10. <https://doi.org/10.1007/s101090050022>
- Goodess, C. M. (2013). How is the frequency, location and severity of extreme events likely to change up to 2060? *Environmental Science & Policy*, 27, S4–S14. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.04.001>
- Gourlet-Fleury, S., Rossi, V., Rejou-Mechain, M., Freycon, V., Fayolle, A., Saint-André, L., Cornu, G., Gérard, J., Sarrailh, J.-M., Flores, O., Baya, F., Billand, A., Fauvet, N., Gally, M., Henry, M., Hubert, D., Pasquier, A., & Picard, N. (2011). Environmental filtering of dense-wooded species controls above-ground biomass stored in African moist forests. *Journal of Ecology*, 99(4), 981–990. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01829.x>
- Granados, J. (2007). Las selvas tropicales y el cambio climático. *Ciencia*, 41–49. http://revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/58_4/PDF/08-439-41-49.pdf
- Grimm, V., & Wissel, C. (1997). Babel, or the ecological stability discussions: an inventory and analysis of terminology and a guide for avoiding confusion. *Oecologia*, 109(3), 323–334. <https://doi.org/10.1007/s004420050090>
- Gudynas, E. (2004). 3. Una mirada histórica al desarrollo sostenible. In *Ecología, economía y ética del desarrollo sostenible*. <https://drive.google.com/drive/folders/1jeXruNLG7z7xaFev4XcEFEdl-KqECwsW?ogsrc=32>
- Gumbel, E. J. (1960). Statistics of Extremes. *The Incorporated Statistician*, 10(2), 96–97. <https://doi.org/10.2307/2987417>
- Gusmão Caiado, R. G., Leal Filho, W., Quelhas, O. L. G., Luiz de Mattos Nascimento, D., & Ávila, L. V. (2018). A literature-based review on potentials and constraints in the implementation of the sustainable development goals. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 198, pp. 1276–1288). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.102>
- Harper, B. A. (2013). Best Practice in Tropical Cyclone Wind Hazard Modelling : In Search of Data and Emptying the Skeleton Cupboard. *16th Australasian Wind Engineering Society Workshop*, 10.
- Haslinger, K., Koffler, D., Schöner, W., & Laaha, G. (2014). Exploring the link between meteorological drought and streamflow: Effects of climate-catchment interaction. *Water Resources Research*, 50(3), 2468–2487. <https://doi.org/10.1002/2013WR015051>
- Hernández-Arana, H. A., Vega-Zepeda, A., Ruíz-Zárate, M. A., Falcón-Álvarez, L. I., López-Adame, H., Herrera-Silveira, J., & Kaster, J. (2015). Transverse Coastal Corridor: From Freshwater Lakes to Coral Reefs Ecosystems. In *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula* (pp. 355–376). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06529-8_14
- Hernández Aguilar, M. L. (2014). *Evaluación del riesgo y vulnerabilidad ante la amenaza de*

huracanes en zonas costeras del Caribe Mexicano : Chetumal y Mahahual.

Universidad de Quintana Roo.

- Hernández Cerda, M. E., Torres Tapia, L. A., y Valdéz Madero, G. (2000). Sequía meteorológica. *El Cambio Climático En México*, 28–37.
<https://studylib.es/doc/4626770/sequia-meteorologica.-maria-engracia-hernandez-cerda--laura>
- Higginbottom, T. P., & Symeonakis, E. (2014). Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: Current frameworks and future directions. *Remote Sensing*, 6(10), 9552–9575. <https://doi.org/10.3390/rs6109552>
- Hinkel, J. (2011). “ Indicators of vulnerability and adaptive capacity”: Towards a clarification of the science-policy interface. *Global Environmental Change*, 21(1), 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.08.002>
- Hobbs, R. J. (2016). Degraded or just different? Perceptions and value judgements in restoration decisions. *Restoration Ecology*, 24(2), 153–158.
<https://doi.org/10.1111/rec.12336>
- Hodgson, D., McDonald, J. L., & Hosken, D. J. (2016). Resilience Is Complicated , but Comparable : A Reply to Yeung and Richardson Scientific Life Elevating The Status of Code in Ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(1), 3–4.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.11.003>
- Hodgson, D., McDonald, J. L., & Hosken, D. J. (2015). What do you mean, “resilient”? *Trends in Ecology and Evolution*, 30(9), 503–506.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.010>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1–23.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Holling, C. S. (1996). Engineering Resilience versus Ecological Resilience. In *National Academy of Engineering. Engineering Within Ecological Constraints*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/4919>.
- Holm, J. A., Van Bloem, S. J., Larocque, G. R., & Shugart, H. H. (2017). Shifts in biomass and productivity for a subtropical dry forest in response to simulated elevated hurricane disturbances. *Environmental Research Letters*, 12(2), 13.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa583c>
- Hosseini, S., Barker, K., & Ramirez-Marquez, J. E. (2016). A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 145, 47–61.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.08.006>
- Huffman, G. J., Stocker, E. F., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., & Tan, J. (2019a). *GPM IMERG Final Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V06*. Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).
<https://doi.org/10.5067/GPM/IMERGDF/DAY/06>

- Huffman, G. J., Stocker, E. F., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., & Tan, J. (2019b). *GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06*. Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).
<https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06>
- IBTrACS. (2019a). *IBTrACS v04r00 - Online browsing*. International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). NOAA. <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php>
- IBTrACS. (2019b). International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). Technical Documentation. In *National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center*.
https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/pdf/IBTrACS_version4_Technical_Details.pdf
- Ihl, T., y Frausto-Martínez, O. (2014). El Cambio Climático y los huracanes en la Península de Yucatán. In *Frausto Martínez, Oscar (Coord). Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático*. (pp. 42–49). Universidad de Quintana Roo - REDESClim - CONACYT.
<https://www.mendeley.com/catalogue/monitoreo-riesgo-y-desastre-asociados-fenomenos-hidrometeorologicos-y-cambio-climatico/>
- INECC. (2019). *Ante El Cambio*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
<http://cambioclimatico.gob.mx:8080/xmlui/handle/publicaciones/327>
- INEGI. (1987). Guías para la Interpretación de Cartografía. Topografía. In *Instituto Nacional de Estadística e Informática*.
- INEGI. (2009). Sistema de información de la cobertura de la tierra SICT. In *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. INEGI.
- INEGI. (2015). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1: 250,000: Serie V. In *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Instituto nacional de Estadística y Geografía (INEGI) México.
- INEGI. (2017a). Cuarenta años de cartografía de la vegetación de México. Información de Uso del Suelo y Vegetación serie VI. In *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Información de Uso del Suelo y Vegetación serie VI.
https://www.snieg.mx/DocumentacionPortal/geografico/sesiones/doc_22017/Prese nt Serie VI Carta U Sue.pdf
- INEGI. (2017b). Guía para la interpretación de cartografía: Uso del suelo y vegetación: Escala 1:250,000 Serie VI. In *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Ingrisch, J., & Bahn, M. (2018). Towards a Comparable Quantification of Resilience. *Trends in Ecology and Evolution*, 33(4), 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.01.013>
- IPCC. (2007). Climate change 2007: Appendix to synthesis report. In A. P. M. Baede, P. van der Linden, & A. Verbruggen (Eds.). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 75–104.

https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_appendix.pdf

- IPCC. (2012a). Glossary of Terms. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, 555–564. <https://doi.org/10.1177/1403494813515131>.
- IPCC. (2012b). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, & Q. Dahe (Eds.), *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- IPCC. (2013). *Resumen para responsables de políticas. En: 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.*
- IPCC. (2014a). Cambio Climático 2014: Informe de síntesis / Resumen para responsables de políticas. *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis*, 2–38.
- IPCC. (2014b). Future Climate Changes, Risks and Impacts. In *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC. (2018). *Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C.* Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2019). *El cambio climático y la tierra.* https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf
- IRI. (2019). *USGS LandDAAC MODIS version_006 Southern North America.* http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.USGS/.LandDAAC/.MODIS/.version_006/.SNA/?Set-Language=en
- IRI. (2022). *IRI Analyses SPI SPI-PRECL0p5_3-Month: SPI-PRECL0p5_3-month data.* https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IRI/.Analyses/.SPI/.SPI-PRECL0p5_3-Month/Y/%2817.80N%29%2821.62N%29RANGEEDGES/X/%2892.48W%29%2886.70W%29RANGEEDGES/index.html#info
- Islam, K. R., Ahmed, A. M. R., Bhuiyan, M. K., & Badruddin, A. (2001). Deforestation Effects on Vegetative Semi-Evergreen Degraded and Protected Forests of Bangladesh. *Land Degradation and Development*, 56, 45–56.
- Islebe, G. A., Calmé, S., León-Cortés, J. L., & Schmook, B. (Eds.). (2015). *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06529-8>
- Jiménez-Espinosa, M., Matías-Ramírez, L. G., Fuentes-Mariles, Ó. A., y Prieto-González, R. (2003). *Ciclones tropicales, Serie Fascículos* (Ver. Elect). Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

<http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/5-FASCCULOCICLONESTROPICALES.PDF>

- Jimenez-Rodríguez, D. L., Alvarez-Añorve, M. Y., Flores-Puerto, J. I., Oyama, K., Avila-Cabadilla, L. D., Pineda-Cortes, M., & Benítez-Malvido, J. (2018). Structural and functional traits predict short term response of tropical dry forests to a high intensity hurricane. *Forest Ecology and Management*, 426(April), 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.009>
- Johnstone, J. F., Allen, C. D., Franklin, J. F., Frelich, L. E., Harvey, B. J., Higuera, P. E., Mack, M. C., Meentemeyer, R. K., Metz, M. R., Perry, G. L. W. W., Schoennagel, T., & Turner, M. G. (2016). Changing disturbance regimes, ecological memory, and forest resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(7), 369–378. <https://doi.org/10.1002/fee.1311>
- Kanae, S., Oki, T., & Musiake, K. (2001). Impact of Deforestation on Regional Precipitation over the Indochina Peninsula. *Journal of Hydrometeorology*, 2(1), 51–70. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2001\)002<0051:IODORP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2001)002<0051:IODORP>2.0.CO;2)
- Kelman, I., Gaillard, J. C., Lewis, J., & Mercer, J. (2016). Learning from the history of disaster vulnerability and resilience research and practice for climate change. *Natural Hazards*, 82(1), 129–143. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2294-0>
- Kennard, D. . K., Gould, K., Putz, F. . E., Fredericksen, T. . S., & Morales, F. (2002). Effect of disturbance intensity on regeneration mechanisms in a tropical dry forest. *Forest Ecology and Management*, 162(2–3), 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00506-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00506-0)
- Kennedy, R. E., Yang, Z., Gorelick, N., Braaten, J., Cavalcante, L., Cohen, W. B., & Healey, S. (2018). Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 10(5), 1–10. <https://doi.org/10.3390/rs10050691>
- Klotzbach, P. J. (2006). Trends in global tropical cyclone activity over the past twenty years (1986-2005). *Geophysical Research Letters*, 33(10), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2006GL025881>
- Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C., & Schreck III, C. J. (2018, March). *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4. Subset: NA - North Atlantic*. NOAA National Centers for Environmental Information. Non-Government Domain. <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C01552>
- Knapp, Kenneth R., & Kruk, M. C. (2010). Quantifying Interagency Differences in Tropical Cyclone Best-Track Wind Speed Estimates. *Monthly Weather Review*, 138(4), 1459–1473. <https://doi.org/10.1175/2009MWR3123.1>
- Kossin, J. P., Knapp, K. R., Vimont, D. J., Murnane, R. J., & Harper, B. A. (2007). A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends. *Geophysical Research Letters*, 34(4), L04815. <https://doi.org/10.1029/2006GL028836>

- Kruk, M. C., Knapp, K. R., & Levinson, D. H. (2010). A Technique for Combining Global Tropical Cyclone Best Track Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 27(4), 680–692. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1267.1>
- Lamb, D., Stanturf, J., & Madsen, P. (2012). What Is Forest Landscape Restoration? In J. Stanturf, D. Lamb, & P. Madsen (Eds.), *Forest Landscape Restoration: Integrating Natural and Social Sciences* (pp. 3–23). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5326-6_1
- Landsea, C. W., Vecchi, G. A., Bengtsson, L., & Knutson, T. R. (2010). Impact of Duration Thresholds on Atlantic Tropical Cyclone Counts. *Journal of Climate*, 23(10), 2508–2519. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3034.1>
- Lazos-Chavero, E., Mwampamba, T. H., & García-Frapolli, E. (2018). Uncovering links between livelihoods, land-use practices, vulnerability and forests after hurricane Jova in Jalisco, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426(June 2017), 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.009>
- Levy, Y., & J. Ellis, T. (2006). A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research. *Informing Science: The International Journal of an Emerging Transdiscipline*, 9, 181–212. <https://doi.org/10.28945/479>
- Lewis, S. L., Edwards, D. P., & Galbraith, D. (2015). Increasing human dominance of tropical forests. *Science*, 349(6250), 827–832. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9932>
- Li, S., Verburg, P. H., Lv, S., Wu, J., & Li, X. (2012). Spatial analysis of the driving factors of grassland degradation under conditions of climate change and intensive use in Inner Mongolia, China. *Regional Environmental Change*, 12(3), 461–474. <https://doi.org/10.1007/s10113-011-0264-3>
- Loewe, M. (2012). *Post 2015 : How to Reconcile the MDGs and the SDGs? 1–4*. https://www.die-gdi.de/uploads/media/BP_18.2012.pdf
- Lohbeck, M., Poorter, L., Martínez-Ramos, M., & Bongers, F. (2015). Biomass is the main driver of changes in ecosystem process rates during tropical forest succession. *Ecology*, 96(5), 1242–1252. <https://doi.org/10.1890/14-0472.1>
- López-Portillo, J., Keyes, M. R., González, A., Cabrera, E., y Sánchez, O. (1990). Los incendios de Quintana Roo: ¿catástrofe ecológica o evento periódico? *Ciencia y Desarrollo*, 16(91), 43–57. <https://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Los+incendios+en+Quintana+Roo:+%C2%BFcat%C3%A1strofe+ecol%C3%B3gica+o+evento+peri%C3%B3dico?#0>
- Lugo, A. E. (2000). *Effects and outcomes of Caribbean hurricanes in a climate change scenario* (p. 9).
- Magaña, R. V. (ed). (1999). *Los impactos de El Niño en México*. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://centro.paot.org.mx/index.php/porinstituciones/otros->

[organismos/73-varios/745-los-impactos-de-el-nino-en-mexico](#)

- Magnuszewski, P., Ostasiewicz, K., Chazdon, R. L., Salk, C., Pajak, M., Sendzimir, J., & Andersson, K. (2015). Resilience and Alternative Stable States of Tropical Forest Landscapes under Shifting Cultivation Regimes. *PLOS ONE*, 10(9), e0137497. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137497>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Marchese, D., Reynolds, E., Bates, M. E., Morgan, H., Clark, S. S., & Linkov, I. (2018). Resilience and sustainability: Similarities and differences in environmental management applications. In *Science of the Total Environment* (Vols. 613–614, Issue September, pp. 1275–1283). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.086>
- Martin, D. (2009). The Role of GIS. In *Fotheringham, A. S. Rogerson, P. A., The SAGE Handbook of Spatial Analysis* (pp. 24–39). SAGE Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4135/9780857020130.n3>
- Martínez-Yrizar, A., Jaramillo, V. J., Maass, M., Búrquez, A., Parker, G., Álvarez-Yépez, J. C., Araiza, S., Verduzco, A., & Sarukhán, J. (2018). Resilience of tropical dry forest productivity to two hurricanes of different intensity in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426(February), 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.024>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., & others. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183. <https://climate.colostate.edu/pdfs/relationshipofdroughtfrequency.pdf>
- Méndez, J., De Jesús, J., y González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, 65(900), 38–55.
- Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 23(5), 1175–1188. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1>
- Miranda, F., y Hernández-X., E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Botanical Sciences*, 28, 29–179. <https://doi.org/10.17129/botsci.1084>
- Moberg, F. (2009). Resilience and Sustainable Development 2.0-A report by Stockholm Resilience Centre produced for the Swedish Government's Commission on Sustainable Development. In *Stockholm Resilience Centre* (Issue March). https://www.stockholmresilience.org/download/18.53ee94ff132ea99552880003257/1459560213637/Resilience_report_for_SCSD_31march2009.pdf
- Mora Vargas, A. I. (2005). Guía para elaborar una propuesta de investigación. *Revista Educación*, 29(2), 77–97. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44029206>
- Moreno-Mateos, D., Barbier, E. B., Jones, P. C., Jones, H. P., Aronson, J., López-López, J. A.,

- McCrackin, M. L., Meli, P., Montoya, D., & Rey Benayas, J. M. (2017). Anthropogenic ecosystem disturbance and the recovery debt. *Nature Communications*, 8(1), 14163. <https://doi.org/10.1038/ncomms14163>
- Mori, A. S. (2016). Resilience in the Studies of Biodiversity-Ecosystem Functioning. *Trends in Ecology and Evolution*, 31(2), 87–89. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.12.010>
- Murray-Tortarolo, G., Friedlingstein, P., Sitch, S., Seneviratne, S. I., Fletcher, I., Mueller, B., Greve, P., Anav, A., Liu, Y., Ahlström, A., Huntingford, C., Levis, S., Levy, P., Lomas, M., Poulter, B., Viovy, N., Zaehle, S., & Zeng, N. (2016). The dry season intensity as a key driver of NPP trends. *Geophysical Research Letters*, 43(6), 2632–2639. <https://doi.org/10.1002/2016GL068240>
- Naredo, J. (2004). Sobre el origen, el uso y el contenido del término sostenible. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 41, 7–18. <https://doi.org/10.20868/ciur.2004.41.1032>
- NASA. (2021). *Giovanni*. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- National Drought Mitigation Center. (2006). *What is Drought? Understanding and Defining Drought*. University of Nebraska-Lincoln. <https://drought.unl.edu/>
- Newton, A. C., & Cantarello, E. (2015). Restoration of forest resilience: An achievable goal? *New Forests*, 46(5–6), 645–668. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9489-1>
- NHC. (2019a). *Glossary of NHC Terms*. Centro Nacional de Huracanes de Los Estados Unidos de América. <https://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.shtml>
- NHC. (2019b). *National Hurricane Center*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). <https://www.nhc.noaa.gov/>
- Nimmo, D. G., Mac Nally, R., Cunningham, S. C., Haslem, A., & Bennett, A. F. (2015). Vive la résistance: Reviving resistance for 21st century conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 30(9), 516–523. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.07.008>
- NOAA. (2014). *Preguntas frecuentes, versión 4.7*. Hurricane Research Division. https://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/tcfaqHED_esp.html
- NOAA. (2019). *Historical Hurricane Tracks - Online browsing*. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center. <http://coast.noaa.gov/hurricanes/>
- NOAA. (2022). *El Niño / Southern Oscillation (ENSO)*. <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history>
- Oliveira Neto, G. C. de, Pinto, L. F. R., Amorim, M. P. C., Giannetti, B. F., & Almeida, C. M. V. B. de. (2018). A framework of actions for strong sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1629–1643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.067>
- Oliver, T. H., Heard, M. S., Isaac, N. J. B., Roy, D. B., Procter, D., Eigenbrod, F., Freckleton, R., Hector, A., Orme, C. D. L., Petchey, O. L., Proença, V., Raffaelli, D., Blake Suttle, K., Mace, G. M., Martín-López, B., Woodcock, B. A., & Bullock, J. M. (2016). A Synthesis is Emerging between Biodiversity–Ecosystem Function and Ecological Resilience

- Research: Reply to Mori. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(2), 89–92.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.12.008>
- ONU. (2015). *Convención Marco sobre el Cambio Climático. Aprobación del Acuerdo de París (decisión 1/CP.17): Vol. FCCC/CP/20*.
<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>
- ONU. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas.
<https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible>
- ONU. (2019). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*. Organización de las Naciones Unidas. https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2019_Spanish.pdf
- ONU. (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- Orellana, R., Espadas-Manrique, C., Conde, C., y Gay-García, C. (2009). Atlas escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. In A. C. Centro de Investigación Científica de Yucatán (Ed.), *cicy (Unidad de Recursos Naturales); unam (Centro de Ciencias de la Atmósfera); conacyt (fomix: Fondo Mixto conacyt-Gobierno del Estado de Yucatán); seduma-Gobierno del Estado de Yucatán; sidetey; onu-pnud* (Ed., 1st).
<http://www.ccpy.gob.mx/agenda-regional/escenarios-cambio-climatico/atlas/>
- Palacio-Aponte, G. (2010). Amenaza Por Huracanes. *Interciencia*, 35, 400–406.
<https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2018/01/400-PALACIOS-7.pdf>
- Palacios-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M. T., Casado-Izquierdo, J. M., Propin Frejomil, E., Delgado Campos, J., Velázquez Montes, A., Chias Becerril, L., y Ortiz Álvarez, M. I. (2004). Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio. In *Ine.Gob.Mx*. Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat).
https://www.researchgate.net/publication/288840782_Indicadores_para_la_Characterizacion_y_Ordenamiento_del_Territorio
- Palekiene, O., Simanaviciene, Z., & Bruneckiene, J. (2015). The Application of Resilience Concept in the Regional Development Context. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 213, 179–184. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.423>
- Pardini, R., Bueno, A. de A., Gardner, T. A., Prado, P. I., & Metzger, J. P. (2010). Beyond the Fragmentation Threshold Hypothesis: Regime Shifts in Biodiversity Across Fragmented Landscapes. *PLoS ONE*, 5(10), e13666.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013666>
- Park, J., Convertino, M., Linkov, I., Seager, T. P., Rao, P. S. C., Convertino, M., & Linkov, I. (2013). Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems. *Risk Analysis*, 33(3), 356–367. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01885.x>
- Parker, G., Martínez-Yrizar, A., Álvarez-Yépez, J. C., Maass, M., & Araiza, S. (2018). Effects

- of hurricane disturbance on a tropical dry forest canopy in western Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426(December 2017), 39–52.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.037>
- Paz, H., Vega-Ramos, F., & Arreola-Villa, F. (2018). Understanding hurricane resistance and resilience in tropical dry forest trees: A functional traits approach. *Forest Ecology and Management*, 426(October 2017), 115–122.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.052>
- PECC. (2014). *Programa Especial de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Yucatán. Análisis de la variabilidad climática e impactos socio-económicos de fenómenos hidrometeorológicos extremos en los sectores y sistemas de interés para el Estado.*
- Peña Alzate, S., & Cañón Barriga, J. E. (2017). Approaching the concepts of ecosystems resilience and stability through spatiotemporal system dynamics and agent-based modelling. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 84, 84–96.
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.n84a10>
- Peng, C., Yuan, M., Gu, C., Peng, Z., & Ming, T. (2016). A review of the theory and practice of regional resilience. *Sustainable Cities and Society*, 29, 86–96.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.12.003>
- Pereira-Corona, A., Fragoso-Servón, P., y Frausto Martínez, O. (2016). Suelos, agua, inundaciones y cambio climático en zonas de karst: el caso de Quintana Roo, México. *GEOS*, 36(2), 275–290.
https://www.researchgate.net/publication/313715336_Suelos_agua_inundaciones_y_cambio_climatico_en_zonas_de_karst_el_caso_de_Quintana_Roo_Mexico/references
- Pereira-Corona, A., Prezas, B., Olivares, J., Fragoso, P., y Niño, C. (2013). El Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Quintana Roo. In *Camal-Cheluja, Tania Libertad (Comp). Los retos de la alternancia partidista y la administración pública. Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias Políticas y Humanidades*. (Primera ed, pp. 355–394). Universidad de Quintana Roo.
https://www.researchgate.net/publication/266023278_El_Programa_Estatal_de_Accion_ante_el_Cambio_Climatico_de_Quintana_Roo
- Pereira-Lindoso, D. (2017). Vulnerability and Resilience: Potentials, Convergences and Limitations in Interdisciplinary Research. *Ambiente & Sociedad*, 20(4), 127–144.
<https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0248r1v2042017>
- Pérez-Ceballos, R., Pacheco-Ávila, J., Euan-Ávila, J., & Hernández-Arana, H. (2012). Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(1), 90–102.
<https://doi.org/10.4311/2011es0222>
- Pillay, M. (2018). Resilience Engineering: An Integrative Review of Fundamental Concepts and Directions for Future Research in Safety Management. *Open Journal of Safety*

Science and Technology, 07(04), 129–160. <https://doi.org/10.4236/ojsst.2017.74012>

- Piponiot, C., Derroire, G., Descroix, L., Mazzei, L., Rutishauser, E., Sist, P., & Hérault, B. (2018). Assessing timber volume recovery after disturbance in tropical forests – A new modelling framework. *Ecological Modelling*, 384(May), 353–369. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.05.023>
- PMC. (2022). *Programa Mexicano del Carbono A.C.* <http://pmcarbono.org/pmc/>
- Ponette-González, A. G., Weathers, K. C., & Curran, L. M. (2010). Water inputs across a tropical montane landscape in Veracruz, Mexico: synergistic effects of land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability. *Global Change Biology*, 16(3), 946–963. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01985.x>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., Smith, W., Zhuravleva, I., Komarova, A., Minnemeyer, S., & Esipova, E. (2017). The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances*, 3(1), e1600821. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600821>
- Prince, S. D., & Goward, S. N. (1995). Global Primary Production: A Remote Sensing Approach. *Journal of Biogeography*, 22(4/5), 815. <https://doi.org/10.2307/2845983>
- Proag, V. (2014). The Concept of Vulnerability and Resilience. *Procedia Economics and Finance*, 18(September), 369–376. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00952-6](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00952-6)
- Pucha-Cofrep, F., Fries, A., Cánovas-García, F., Oñate-Valdivieso, F., González-Jaramillo, V., & Pucha Cofrep, D. (2017). *Fundamentos de SIG*. https://www.researchgate.net/publication/318447525_Fundamentos_de_SIG
- Purvis, B., Mao, Y., & Robinson, D. (2018). Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins. *Sustainability Science*, 5. <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0627-5>
- QGIS Development Team. (2022). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. <http://qgis.osgeo.org>
- Redman, C. L. (2014). Should sustainability and resilience be combined or remain distinct pursuits? *Ecology and Society*, 19(2). <https://doi.org/10.5751/ES-06390-190237>
- Renschler, C. S., Frazier, A. E., Arendt, L. A., Cimellaro, G.-P., Reinhorn, A. M., & Bruneau, M. (2010). *A Framework for Defining and Measuring Resilience at the Community scale: The PEOPLES Resilience Framework*.
- Rey, W., Mendoza, E. T., Salles, P., Zhang, K., Teng, Y.-C., Trejo-Rangel, M. A., & Franklin, G. L. (2019). Hurricane flood risk assessment for the Yucatan and Campeche State coastal area. *Natural Hazards*, 96(3), 1041–1065. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03587-3>
- Reyes, J. E., & Ballesteros, E. R. (2011). Resiliencia Socioecológica: aportaciones y retos desde la Antropología. (Spanish). *Socioecological Resilience: Contributions and Challenges from Anthropology*. (English), 20, 109–135.

<https://login.ezproxy.net.ucf.edu/login?auth=shibb&url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=hia&AN=66861428&site=eds-live&scope=site>

- Reyes Rivero, A. C., Montilla Pacheco, A. D. J., Castillo Garcia, P. G., & Zambrano Vera, M. N. (2017). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo ante eventos naturales. Factores socialmente construidos. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 1(6), 22–28. <https://doi.org/10.26910/issn.2528-8083vol2iss6.2017pp22-28>
- Rishmawi, K., & Prince, S. (2016). Environmental and Anthropogenic Degradation of Vegetation in the Sahel from 1982 to 2006. *Remote Sensing*, 8(11), 948. <https://doi.org/10.3390/rs8110948>
- Rittenhouse, C. D., Pidgeon, A. M., Albright, T. P., Culbert, P. D., Clayton, M. K., Flather, C. H., Huang, C., Masek, J. G., & Radeloff, V. C. (2010). Avifauna response to hurricanes: regional changes in community similarity. *Global Change Biology*, 16(3), 905–917. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02101.x>
- Rivera-Hernández, J. E., Blanco-Orozco, N. V., Alcántara-Salinas, G., Houbbron, E. P., y Pérez-Sato, J. A. (2017). ¿Desarrollo sostenible o sustentable? La controversia de un concepto. *Posgrado y Sociedad. Revista Electrónica Del Sistema de Estudios de Posgrado*, 15(1), 57–67. <https://doi.org/10.22458/rpys.v15i1.1825>
- Rodríguez-Alarcón, M. N. (2019). El huracán Janet y el desastre de 1955 en Quintana Roo : estudio de una coyuntura crítica. *Antrópica. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 161–190. <https://antropica.com.mx/ojs2/index.php/AntropicaRCSH/article/view/196>
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1996). Quantifying Southern Oscillation-Precipitation Relationships. *Journal of Climate*, 9(5), 1043–1059. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<1043:QSOPR>2.0.CO;2)
- Rosengaus-Moshinsky, M., Jiménez-Espinosa, M., y Vázquez-Conde, M. T. (2002). *Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México*. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/37.pdf>
- Rosete, F., Pérez, J. L., y Bocco, G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península Baja California Peninsula , Mexico. *Investigaciones Geográficas*, 67, 39–58.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A. A., & Deering, D. W. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1, 309–317. <https://doi.org/citeulike-article-id:12009708>
- Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México (1978). In *1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad* (1ra. Edici).
- Rzedowski, J., y de Rzedowski, G. C. (2005). Familia Rosaceae, Fasc. 135. *Flora Del Bajío y de Regiones Adyacentes.*, 163. <https://books.google.com.mx/books?id=BUSWMQEACAAJ>
- Sánchez-Rivera, G., Cervantes-Martínez, A., y Frausto-Martínez, Ó. (2021d). Reseña

- histórica de los ciclones tropicales en el Estado de Guerrero, México (1951-2019). In *Villaseñor Franco, A., Campos Cámara, B. L., y Guinto Herrera, E. R. (coords). Estudios de riesgos y desastres. Aspectos teóricos y prácticos (Ediciones Navarra (ed.); 1st ed).* (pp. 84–98).
- Sánchez-Rivera, G., y Frausto-Martínez, O. (2021c). Capítulo 10: Ciclones extremos en los estados del suroccidente mexicano en el período 1951-2019. In *Frausto Martínez, O., Morales Hernández, J. C., Cruz Romero, B., y Cabrera Hernández, J. A. (comp). Cambio Climático y Turismo en las Costas Caribe y Pacífico de México. Editorial UM, Universidad de Matanzas.* (1st ed., pp. 177–191). Editorial UM, Universidad de Matanzas.
https://www.researchgate.net/publication/353699735_Capitulo_10_Ciclones_extremos_en_los_estados_del_suroccidente_mexicano_en_el_periodo_1951-2019
- Sánchez-Rivera, G., Frausto-Martínez, O., y Cervantes-Martínez, A. (2021a). Capítulo XII: Análisis histórico (1851-2019) de huracanes extremos en Quintana Roo, México. In *Morales Hernández, Julio Cesar; González Sosa, Enrique; Welsh Rodríguez, Carlos Manuel; Frausto Martínez, O. (Coords). Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos (CLAVE Editorial (ed.); 1st ed.* (pp. 233–249). CLAVE Editorial.
https://www.researchgate.net/publication/353197683_Capitulo_XII_Analisis_historico_o_1851-2019_de_huracanes_extremos_en_Quintana_Roo
- Sánchez-Rivera, G., Frausto-Martínez, O., Gómez-Mendoza, L., Terán-Cuevas, Á. R., & Hernández, J. C. M. (2021b). Tropical Cyclones in the North Atlantic Basin and Yucatan Peninsula, Mexico: Identification of Extreme Events. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 16(2), 145–160.
<https://doi.org/10.18280/ijdne.160204>
- Sánchez-Rivera, G., y Gómez-Mendoza, L. (2020). Resiliencia de la vegetación en la península de Yucatán ante ciclones tropicales. In *Gómez Mendoza, L., y Caetano Neto, E. dos S. (Coords). El clima cambiante: una aproximación geográfica para México.* (pp. 145–168). UNAM, Facultad de Filosofía y Letras. Bonilla Artigas Editores.
<https://bonillaartigaseditores.com/collections/novedades/products/clima-cambiante-el-una-aproximacion-geografica-para-mexico-gomez-mendoza-leticia-caetano-neto-ernesto-dos-santos>
- Sánchez-Rivera, G., & Gómez-Mendoza, L. (2022). Tropical cyclone effects on vegetation resilience in the Yucatan Peninsula, México, between 2000-2012. *Investigaciones Geográficas*, 77, 203. <https://doi.org/10.14198/INGEO.18499>
- Sánchez-Rivera, G., Terán-Cuevas, Á. R., Frausto-Martínez, O., y Gómez-Mendoza, L. (2021e). Caracterización de lluvias en temporada de huracanes en el norte de la Península de Yucatán. *Congreso Mesoamericano de Investigación UNACH*, 8, 39–45.
<https://www.congreso.mesoamericano.unach.mx/images/PDF/REVISTA-CMIU-2021.pdf>
- Sánchez-Sánchez, O., Hernández, M. V., y Islebe, G. A. (2007). Flora arbórea y caracterización de gremios ecológicos en distintos estados sucesionales de la selva

mediana de Quintana Roo. *Foresta Veracruzana*.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49790203>

Sánchez-Sánchez, O., Islebe, G. A., Ramírez-Barajas, P. J., & Torrescano-Valle, N. (2015). Natural and Human Induced Disturbance in Vegetation. In G. A. Islebe, S. Calmé, J. L. León-Cortés, & B. Schmook (Eds.), *Biodiversity and Conservation of the Yucatán Peninsula* (pp. 153–167). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-06529-8_7

Sánchez-Sesma, J. (2009). *Análisis de la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales (CTs) para prevenir los efectos, presentes y futuros, debidos a la variabilidad y el cambio climático en México*.

Sanders, C. (2016). *A Regression Analysis of Past Hurricane Patterns and a Projection for the 2016 Hurricane Season*. Florida Atlantic University.

Saravia Gallardo, M. A. (2006). Metodología de investigación científica. Orientación metodológica para la elaboración de proyectos e informes de investigación. In *UNIVERSITAT DE BARCELONA (2001-2004)*.
<http://files.gthpoliciasena.webnode.es/200000024-7be707ce0f/Metodologia.pdf>

Saunders, W. S. A., & Becker, J. S. (2015). A discussion of resilience and sustainability: Land use planning recovery from the Canterbury earthquake sequence, New Zealand. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 73–81.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.01.013>

Seiler, R. Á., y Vianco, A. M. (Ed). (2017). Metodología para generar indicadores de sustentabilidad de sistemas productivos. Región Centro Oeste de Argentina. In *Universidad Nacional de Río Cuarto (1a ed)*. Río Cuarto : UniRío Editora.

Seymour, F., & Busch, J. (2016). Why Forests? Why Now?: The Science, Economics, and Politics of Tropical Forests and Climate Change. In *Why Forests? Why Now?: The Science, Economics, and Politics of Tropical Forests and Climate Change*.

Shalaby, A., & Tateishi, R. (2007). Remote sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land-use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*, 27(1), 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2006.09.004>

Sheinbaum, D. (2007). ¿Qué es la sustentabilidad? *Sepiensa.Org. Mx*.

Shimizu, K., Ponce-Hernandez, R., Ahmed, O. S., Ota, T., Win, Z. C., Mizoue, N., & Yoshida, S. (2017). Using Landsat time series imagery to detect forest disturbance in selectively logged tropical forests in Myanmar. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(3), 289–296. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0244>

Showstack, R. (2009). Climate Change Now Apparent and Unequivocal, New Report Warns. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(26), 223–223.
<https://doi.org/10.1029/2009EO260004>

Shukla, J., Nobre, C., & Sellers, P. (1990). Amazon Deforestation and Climate Change. *Science*, 247(4948), 1322–1325. <https://doi.org/10.1126/science.247.4948.1322>

- Sidle, R. C., Ziegler, A. D., Negishi, J. N., Nik, A. R., Siew, R., & Turkelboom, F. (2006). Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*, 224(1–2), 199–225. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.019>
- Simoniello, T., Lanfredi, M., Liberti, M., Coppola, R., & Macchiato, M. (2008). Estimation of vegetation cover resilience from satellite time series. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(4), 1053–1064. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1053-2008>
- Sloan, S. (2008). Reforestation amidst deforestation: Simultaneity and succession. *Global Environmental Change*, 18(3), 425–441. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.04.009>
- SMN. (2019). *Ciclones Tropicales: Etapas de Evolución*. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/etapas-de-evolucion>
- SMN. (2021). *Reporte anual 2020*. [https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Diagnóstico/Atmosférico/Reporte del Clima en México/Anual2020.pdf](https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Diagnóstico/Atmosférico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2020.pdf)
- Snook, L. K., & Negreros-Castillo, P. (2004). Regenerating mahogany (*Swietenia macrophylla* King) on clearings in Mexico's Maya forest: the effects of clearing method and cleaning on seedling survival and growth. *Forest Ecology and Management*, 189(1–3), 143–160. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.038>
- Solow, A. R. (2017). On detecting ecological impacts of extreme climate events and why it matters. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 8–11. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0136>
- Stanturf, J. A. (2015). Future landscapes: opportunities and challenges. *New Forests*, 46(5–6), 615–644. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9500-x>
- Stocking, M., & Murnaghan, N. (2000). Land Degradation – Guidelines for Field Assessment. In *Overseas Development Group*.
- Sundstrom, S. M., Allen, C. R., & Gunderson, L. (2016). Resisting Resilience Theory: A Response to Connell and Ghedini. *Trends in Ecology and Evolution*, 31(6), 412–413. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.03.014>
- Suplee, C. (1999). El Niño y La Niña, el círculo vicioso de la naturaleza. *National Geographic*, 4(3), 73–95.
- Svoboda, M., Hayes, M., y Wood, D. (2012). *Índice normalizado de precipitación. Guía del usuario*. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7769
- Symeonakis, E., & Drake, N. (2004). Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 25(3), 573–592. <https://doi.org/10.1080/0143116031000095998>
- Tambosi, L. R., Martensen, A. C., Ribeiro, M. C., & Metzger, J. P. (2014). A Framework to Optimize Biodiversity Restoration Efforts Based on Habitat Amount and Landscape

- Connectivity. *Restoration Ecology*, 22(2), 169–177.
<https://doi.org/10.1111/rec.12049>
- Tanner, E. V. J., Kapos, V., & Healey, J. R. (1991). Hurricane Effects on Forest Ecosystems in the Caribbean. *Biotropica*, 23(4), 513. <https://doi.org/10.2307/2388274>
- Tapia-Palacios, M. A., García-Suárez, O., Sotomayor-Bonilla, J., Silva-Magaña, M. A., Pérez-Ortíz, G., Espinosa-García, A. C., Ortega-Huerta, M. A., Díaz-Ávalos, C., Suzán, G., & Mazari-Hiriart, M. (2018). Abiotic and biotic changes at the basin scale in a tropical dry forest landscape after Hurricanes Jova and Patricia in Jalisco, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426(May 2017), 18–26.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.015>
- Teodorescu, H.-N. L. (2015). Defining resilience using probabilistic event trees. *Environment Systems and Decisions*, 35(2), 279–290.
<https://doi.org/10.1007/s10669-015-9550-9>
- Thompson, I. D. (2011). Biodiversidad, umbrales ecosistémicos, resiliencia y degradación forestal. *Unasylva*, 62(238), 25–30. <https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/303289>
- Thompson, I. D., Guariguata, M. R., Okabe, K., Bahamondez, C., Nasi, R., Heymell, V., & Sabogal, C. (2013). An Operational Framework for Defining and Monitoring Forest Degradation. *Ecology and Society*, 18(2), art20. <https://doi.org/10.5751/ES-05443-180220>
- Tiago de Oliveira, J. (1986). Extreme values and meteorology. *Theoretical and Applied Climatology*, 37(4), 184–193. <https://doi.org/10.1007/BF00867576>
- Townsend, C. R., & Hildrew, A. G. (1994). Species traits in relation to a habitat templet for river systems. *Freshwater Biology*, 31(3), 265–275. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1994.tb01740.x>
- Townshend, J. R., Masek, J. G., Huang, C., Vermote, E. F., Gao, F., Channan, S., Sexton, J. O., Feng, M., Narasimhan, R., Kim, D., Song, K., Song, D., Song, X. P., Noojipady, P., Tan, B., Hansen, M. C., Li, M., & Wolfe, R. E. (2012). Global characterization and monitoring of forest cover using Landsat data: Opportunities and challenges. *International Journal of Digital Earth*, 5(5), 373–397.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2012.713190>
- Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771–2777. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)
- Turner, M. G. (2010). Disturbance and landscape dynamics in a changing world. *Ecology*, 91(10), 2833–2849. <https://doi.org/10.1890/10-0097.1>
- UNEP. (2019). Emissions Gap Report 2019 Executive Summary. In *Emissions Gap Report 2019*.
<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/30798/EGR19ESEN.pdf?sequence=13>

- UNSDG. (2018). *Desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe: desafíos y ejes de política pública*. Grupo de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe. <https://unsdg.un.org/es/resources/desafios-y-estrategias-para-el-desarrollo-sostenible-en-america-latina-y-el-caribe>
- USGS. (2022a). *Landsat Missions*. U.S. Department of the Interior. <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- USGS. (2022b). *Search Data Catalog*. https://lpdaac.usgs.gov/product_search/
- van de Pol, M., Jenouvrier, S., Cornelissen, J. H. C., & Visser, M. E. (2017). Behavioural, ecological and evolutionary responses to extreme climatic events: challenges and directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1723), 20160134. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0134>
- Vásquez-Grandón, A., Donoso, P., & Gerding, V. (2018). Forest Degradation: When Is a Forest Degraded? *Forests*, 9(11), 726. <https://doi.org/10.3390/f9110726>
- Vergara, W., Gallardo Lomeli, L., Rios, A., ISBELL, P., Prager, S., & de Camino, R. (2016). *The economic case for landscape restoration in Latin America*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13264.10243>
- Verrelst, J., Koetz, B., Kneubühler, M., & Schaepman, M. (2006). Directional sensitivity analysis of vegetation indices from multi-angular CHRIS/PROBA data. *ISPRS Commission VII Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes,"* 36(May), 677–683. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.11.001>
- Vidal-Zepeda, R. (2005). *Las regiones climáticas de México*. 213. <http://132.247.70.148/index.php/rig/article/view/30041>
- Vink, K., & Ahsan, M. N. (2018). The benefits of cyclones: A valuation approach considering ecosystem services. *Ecological Indicators*, 95(February), 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.035>
- Vlek, P. L. G., Le, Q. B., & Tamene, L. (2010). Assessment of land degradation, its possible causes and threat to food security in Sub-Saharan Africa. In *Rattan, Lal, y Stewart, B. A. (2010). Food Security and Soil Quality. (Lal Rattan & B. A. Stewart, Eds.) (1.a ed.). United States of America: Taylor & Francis.* (pp. 57–86).
- Vold, T., & Buffett, D. A. A. (2008). *Ecological Concepts, Principles and Applications to Conservation*.
- Walker, B., Abel, N., Andreoni, F., Cape, J., Murdoch, H., Norman, C., Bell, J., Chrystal, J., Earl, G., Krebs, K., Macdonald, T., Moss, G., Raine, C., Russell, J., Ryan, P., Salt, D., Shearing, J., Wilde, B., & White, R. (2014). *General Resilience. A discussion paper based on insights from a catchment management area workshop in south eastern Australia*. 1–14. http://www.resalliance.org/files/General_Resilience_paper.pdf
- Walker, B., Gunderson, L., Kinzig, A., Folke, C., Carpenter, S., & Schultz, L. (2006). A Handful of Heuristics and Some Propositions for Understanding Resilience in Social-Ecological Systems. *Ecology and Society*, 11(1), art13. <https://doi.org/10.5751/ES->

[01530-110113](#)

- Walsh, K. J. E. (2004). Tropical cyclones and climate change: unresolved issues. *Climate Research*, 27(1), 77–83. <https://doi.org/10.3354/cr027077>
- Walsh, K. J. E., McBride, J. L., Klotzbach, P. J., Balachandran, S., Camargo, S. J., Holland, G., Knutson, T. R., Kossin, J. P., Lee, T., Sobel, A., & Sugi, M. (2016). Tropical cyclones and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 65–89. <https://doi.org/10.1002/wcc.371>
- Wang, Z., Nistor, M. S., & Pickl, S. W. (2017). Analysis of the Definitions of Resilience. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 10649–10657. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1756>
- Warren, A. (2002). Land degradation is contextual. *Land Degradation & Development*, 13(6), 449–459. <https://doi.org/10.1002/ldr.532>
- Webster, P. J. (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309(5742), 1844–1846. <https://doi.org/10.1126/science.1116448>
- Wessel, P., & Smith, W. H. F. (1996). A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B4), 8741–8743. <https://doi.org/10.1029/96JB00104>
- Wessel, P., & Smith, W. H. F. (2017). *GSHHG Version 2.3.7. A Global Self-Consistent, Hierarchical, High-Resolution Geography Database*. <https://www.soest.hawaii.edu/pwessel/gshhg/>
- Whigham, D. F., Olmsted, I., Cano, E. C., & Harmon, M. E. (1991). The Impact of Hurricane Gilbert on Trees, Litterfall, and Woody Debris in a Dry Tropical Forest in the Northeastern Yucatan Peninsula. *Biotropica*, 23(4), 434. <https://doi.org/10.2307/2388263>
- Wilhite, D. A., & Svoboda, M. D. (2000). Drought early warning systems in the context of drought preparedness and mitigation. In *Early warning systems for drought preparedness and drought management* (pp. 1–21). https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_early_warning_systems_drought_preparedness_2000.pdf
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (Third ed.). Elsevier Science. <https://www.elsevier.com/books/statistical-methods-in-the-atmospheric-sciences/wilks/978-0-12-385022-5>
- WMO. (2018). *Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. Final Version*. World Meteorological Organization.
- WMO. (2020). *United in Science 2020. A multi-organization high-level compilation of the latest climate science information*. https://public.wmo.int/en/resources/united_in_science
- WMO, & UNESCO. (2012). *International Glossary of Hydrology Organización*

Meteorológica Mundial. OMM/UNESCO.

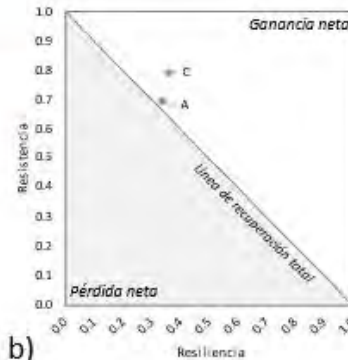
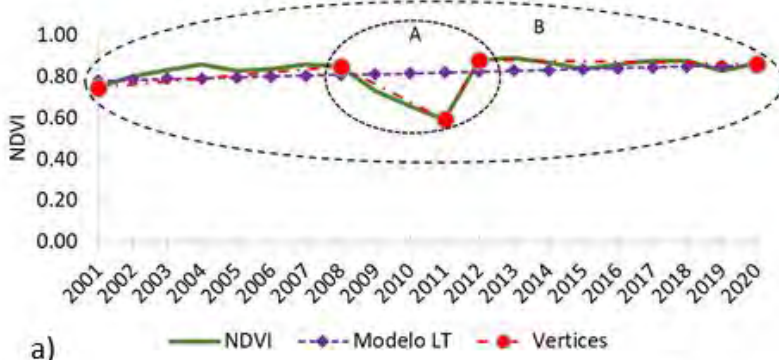
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=8209

- Wroe, S., Field, J., & Grayson, D. (2006). Megafaunal extinction: climate, humans and assumptions. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(2), 61–62.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.11.012>
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., Tucker, C. J., & Tucker III, C. J. (2016). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations. In *Lund University Center for Sustainability Studies (LUCSUS), and The Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environment Facility (STAP/GEF)*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>
- Yeung, A. C. Y., & Richardson, J. S. (2016). Some Conceptual and Operational Considerations when Measuring ‘Resilience’: A Response to Hodgson et al. *Trends in Ecology & Evolution*, 31(1), 2–3.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.10.005>
- Youn, B. D., Hu, C., & Wang, P. (2011). Resilience-Driven System Design of Complex Engineered Systems. *Journal of Mechanical Design*, 133(10), 101011.
<https://doi.org/10.1115/1.4004981>
- Zahawi, R. A., Duran, G., & Kormann, U. (2015). Sixty-Seven Years of Land-Use Change in Southern Costa Rica. *PLOS ONE*, 10(11), e0143554.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143554>
- Zenteno Casas, M., Avelar Frausto, C. E., y Reinoso Angulo, E. (2006). Estadísticas de los daños por viento causados a las estructuras por el huracán Wilma en el Caribe Mexicano. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 19.
- Zhou, H., Wang, J., Wan, J., & Jia, H. (2010). Resilience to natural hazards: a geographic perspective. *Natural Hazards*, 53(1), 21–41. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9407-y>

Anexo A: Fichas técnicas de análisis de resiliencia por UBAE

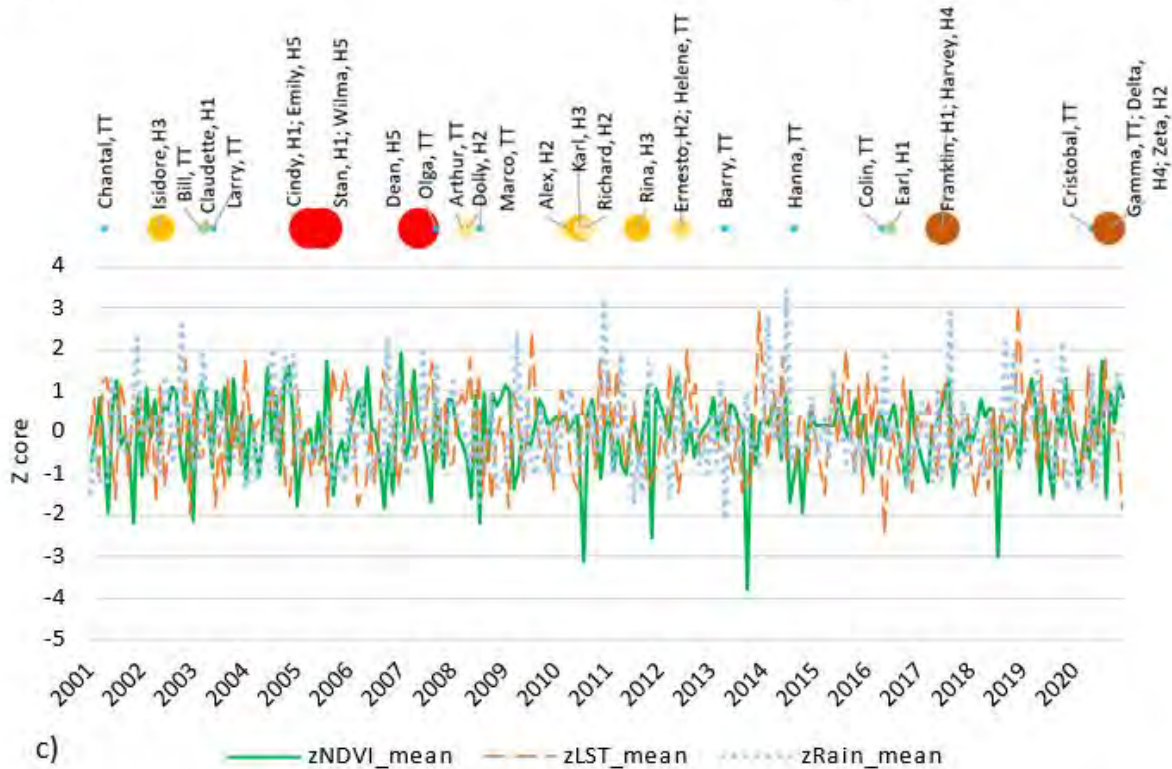
a. Selva mediana caducifolia y subcaducifolia.

UBAE: SM-CSC_1; Coords.: (-88.361, 20.678)



a)

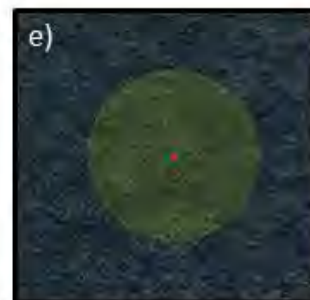
b)



c)

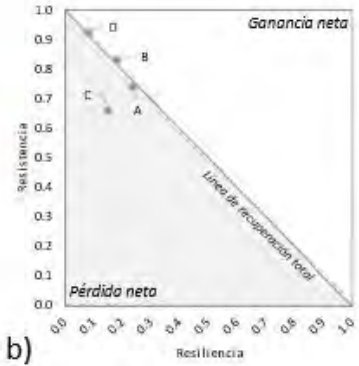
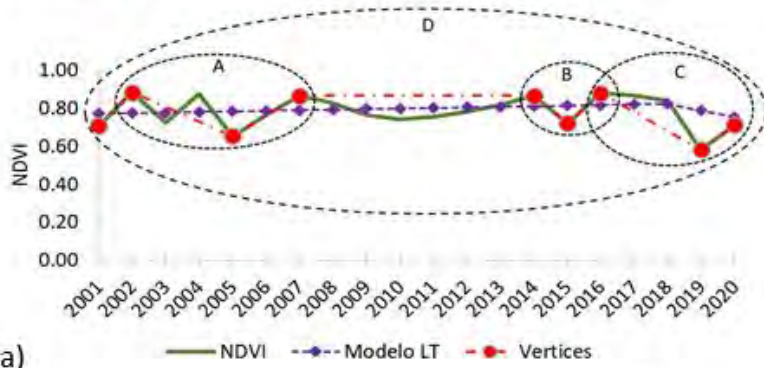
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/annual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2008	2011	2012	1.03	0.70	-0.26	0.29	-0.30	0.34	0.03	0.34
	0.85	0.59	0.88								
B	2001	2011	2020	1.16	0.79	-0.15	0.03	-20.55%	36.22%	15.68%	0.36
	0.74	0.59	0.86								



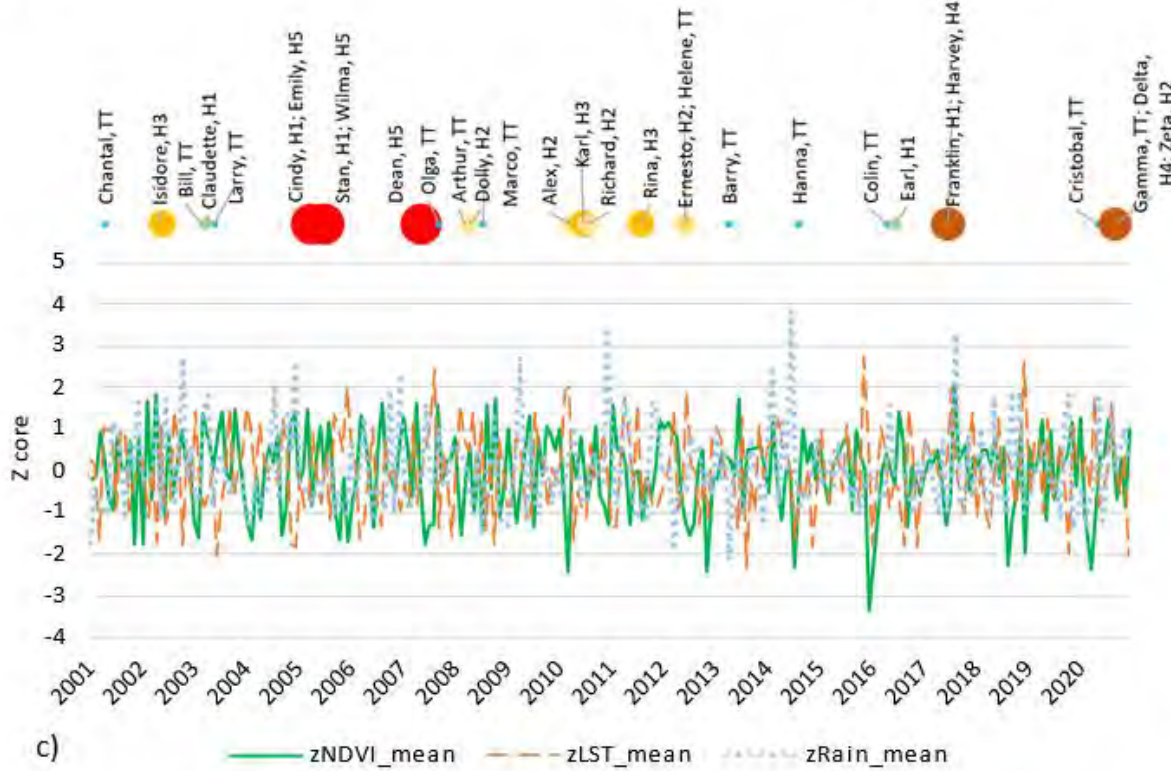
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SM-CSC_2; Coords.: (-88.380, 21.004)



a)

b)



c)

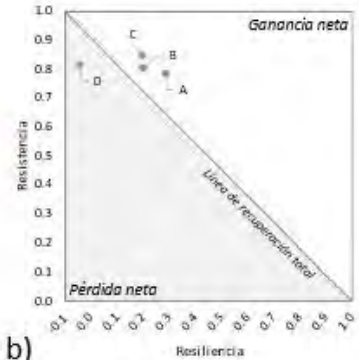
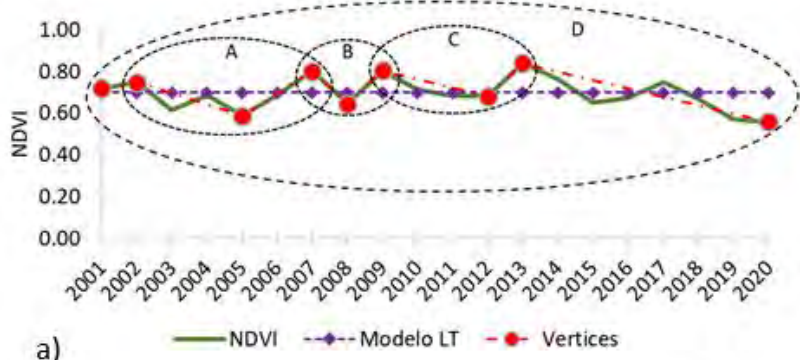
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2005	2007	0.98	0.74	-0.23	0.11	-0.26	0.24	-0.02	0.24
	0.88	0.65	0.86								
B	2014	2015	2016	1.01	0.83	-0.15	0.16	-16.81%	18.25%	1.44%	0.18
	0.87	0.72	0.88								
C	2016	2019	2020	0.81	0.66	-0.30	0.13	-33.82%	14.88%	-18.94%	0.15
	0.88	0.58	0.71								
D	2001	2005	2020	1.01	0.92	-0.05	0.00	-7.57%	8.22%	0.65%	0.08
	0.71	0.65	0.71								



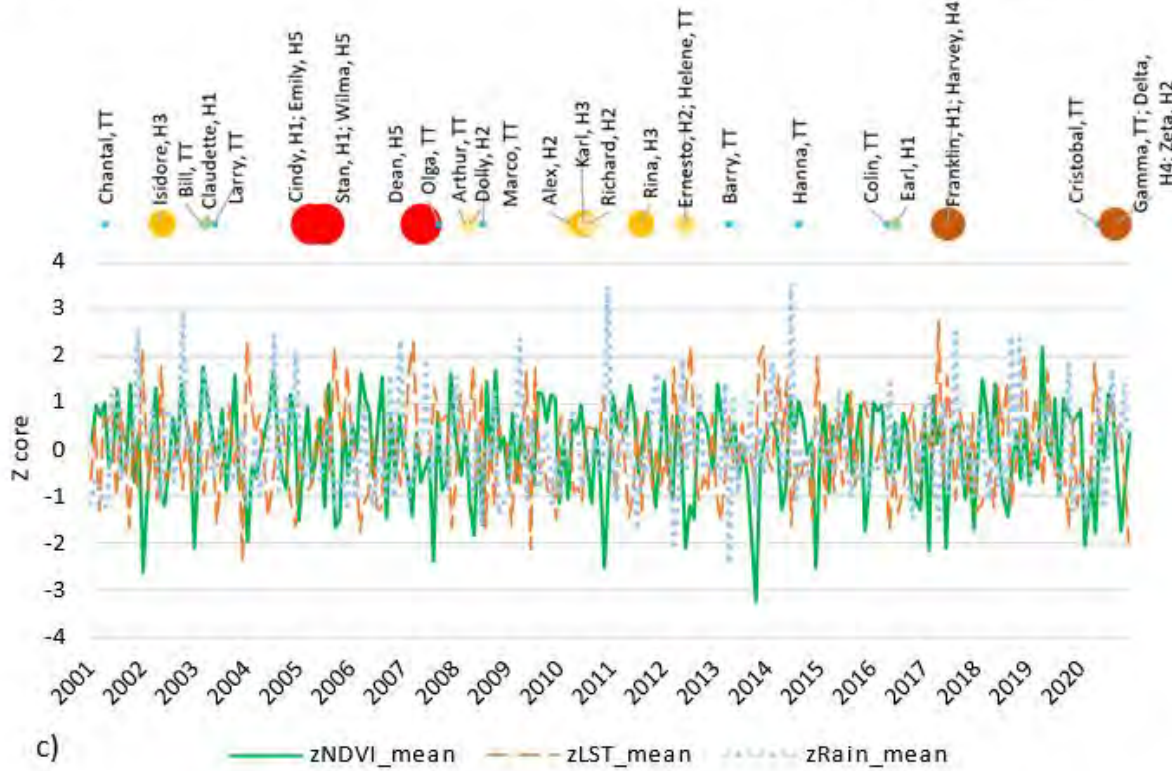
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SM-CSC_3; Coords.: (-88.674, 20.539)



a)

b)



c)

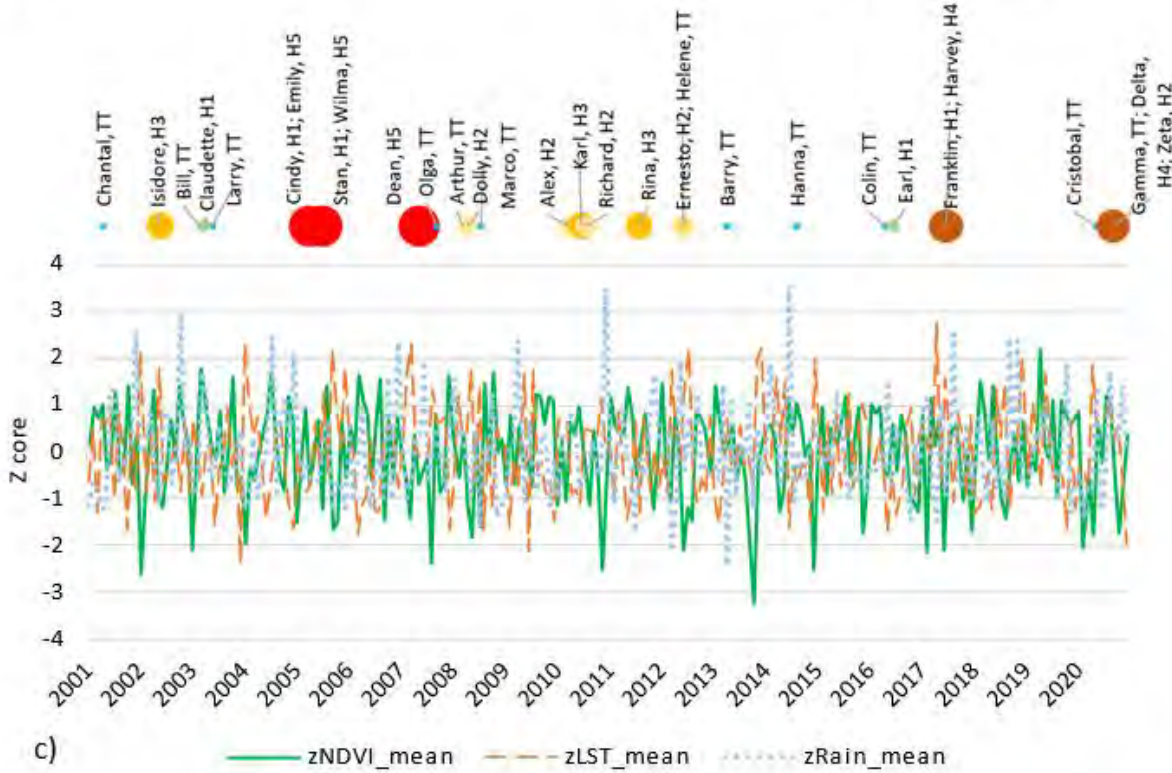
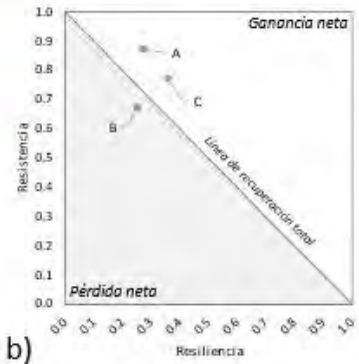
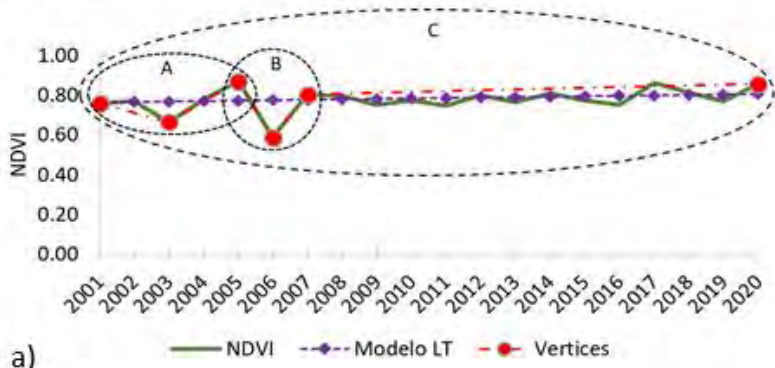
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NOVI/anual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2005	2007	1.07	0.78	-0.16	0.11	-0.22	0.29	0.07	0.29
	0.75	0.59	0.80								
B	2007	2008	2009	1.00	0.81	-0.16	0.16	-19.58%	19.83%	0.44%	0.20
	0.80	0.65	0.81								
C	2009	2012	2013	1.04	0.85	-0.12	0.16	-15.29%	19.76%	4.47%	0.20
	0.81	0.68	0.84								
D	2001	2005	2020	0.78	0.82	-0.13	0.00	-18.29%	-4.05%	-22.33%	-0.04
	0.72	0.59	0.56								



M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SM-CSC_4; Coords.: (-89.989, 19.881)



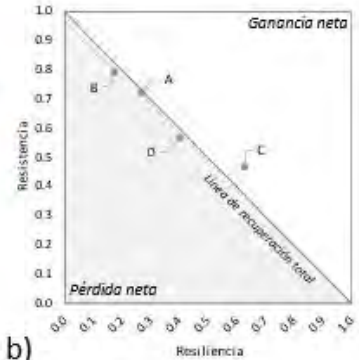
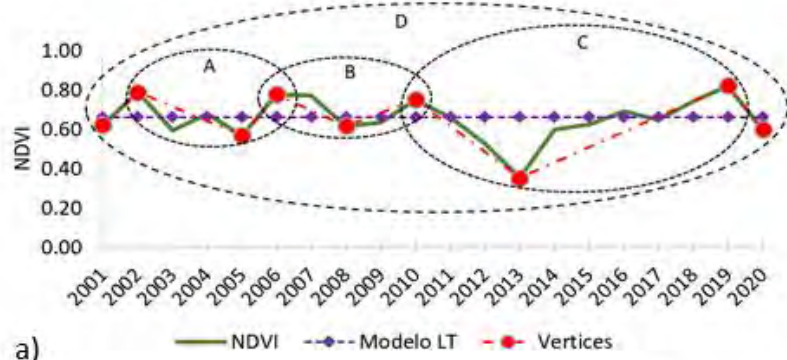
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Resistencia [Perturbación] [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)			
A	2001	2003	2005	0.76	0.66	0.87	1.15	0.87	-0.10	0.10	-0.13	0.27	0.15	0.27
B	2005	2006	2007	0.87	0.59	0.80	0.92	0.67	-0.28	0.22	-32.59%	24.94%	-7.65%	0.25
C	2001	2006	2020	0.76	0.59	0.86	1.13	0.77	-0.17	0.02	-22.78%	35.66%	12.87%	0.36



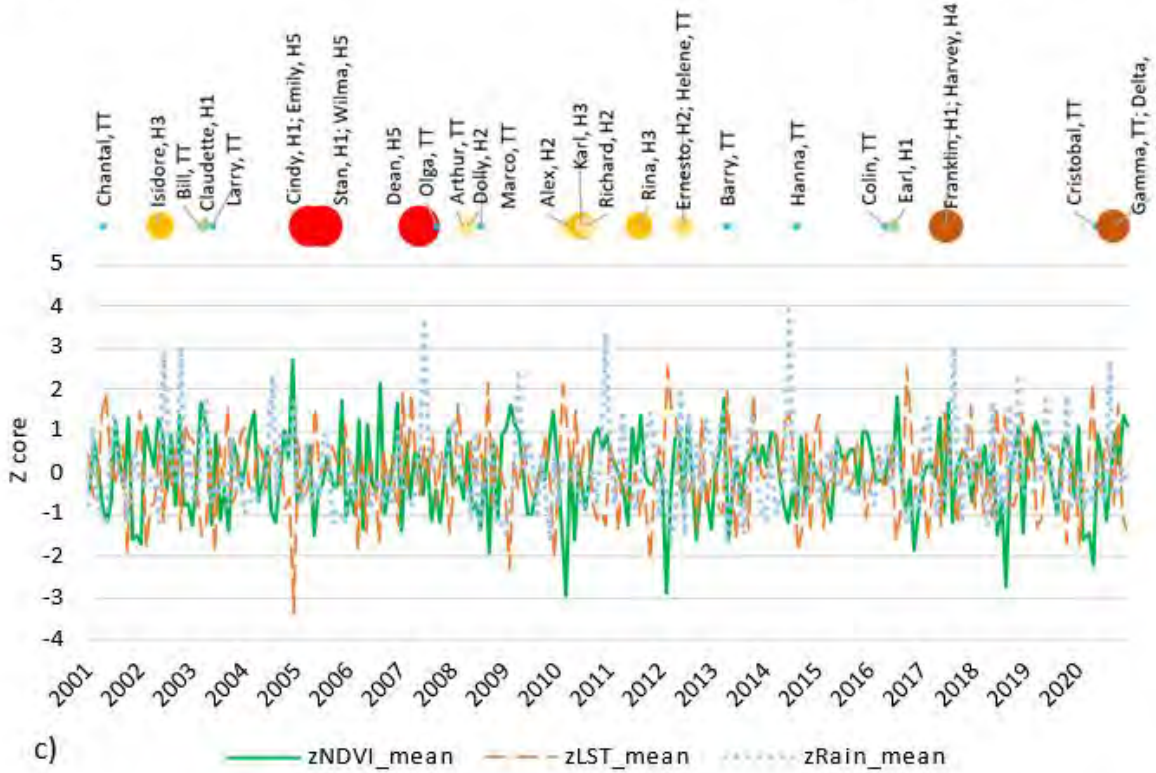
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SM-CSC_5; Coords.: (-89.821, 20.699)



a)

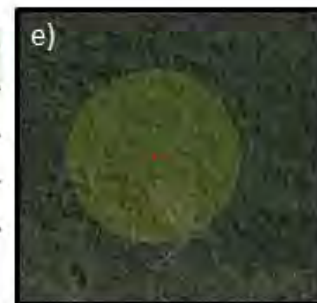
b)



c)

d)

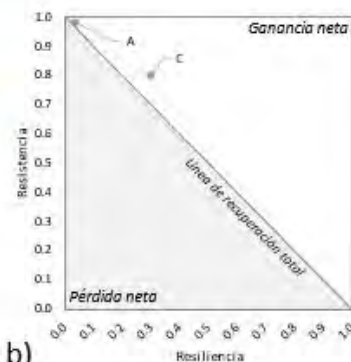
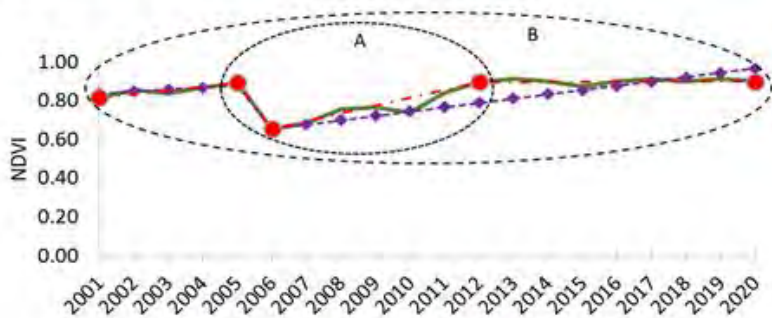
Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2005	2006	0.99	0.72	-0.22	0.21	-0.28	0.27	-0.01	0.27
	0.79	0.57	0.78								
B	2006	2008	2010	0.97	0.79	-0.16	0.07	-20.75%	17.32%	-3.44%	0.17
	0.78	0.62	0.75								
C	2010	2013	2019	1.09	0.47	-0.40	0.08	-53.17%	62.63%	9.46%	0.63
	0.75	0.35	0.82								
D	2001	2013	2020	0.97	0.57	-0.27	0.04	-43.31%	39.95%	-3.36%	0.40
	0.62	0.35	0.60								



M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

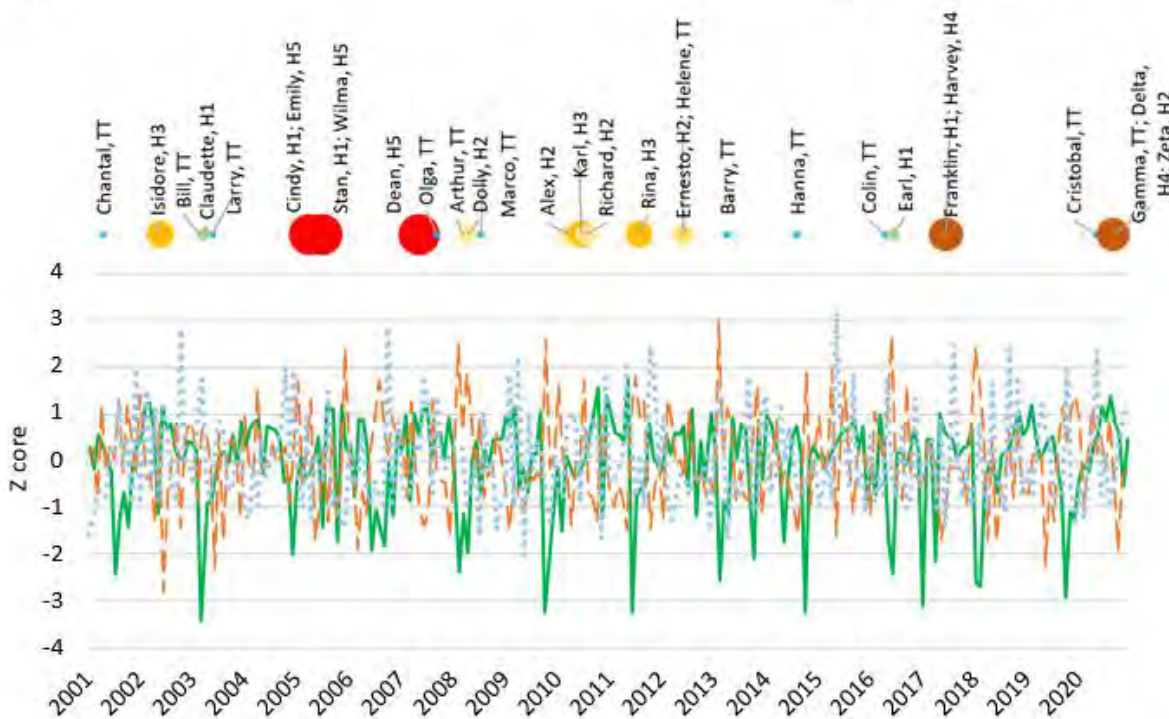
b. selva mediana subperennifolia.

UBAE: SM-SP_1; Coords.: (-87.012, 20.991)



a) — NDVI — Modelo LT — Vertices

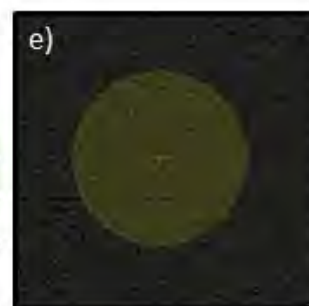
b)



c) — zNDVI_mean — zLST_mean — zRain_mean

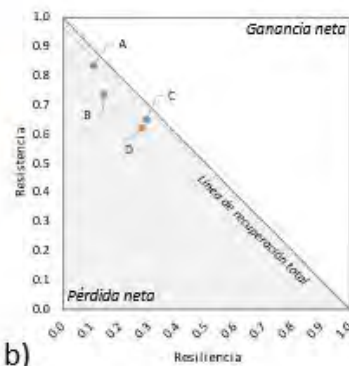
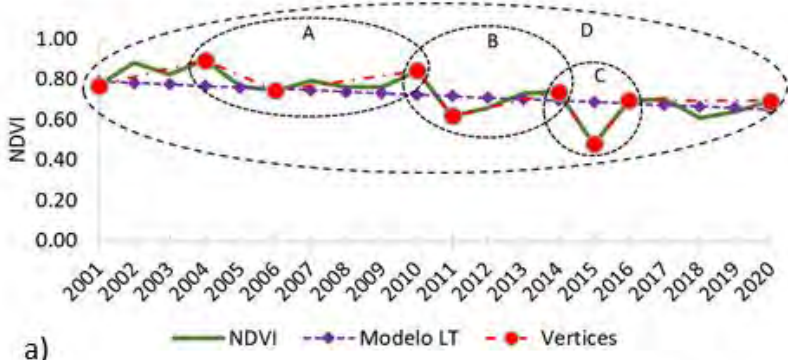
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NOVI/annual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto [%]	Resiliencia (IRG)
A	2005	2006	2012	1.02	0.98	-0.02	0.01	-0.02	0.04	0.02	0.04
C	2001	2006	2020	1.10	0.80	-0.16	0.02	-19.81%	29.95%	10.14%	0.30



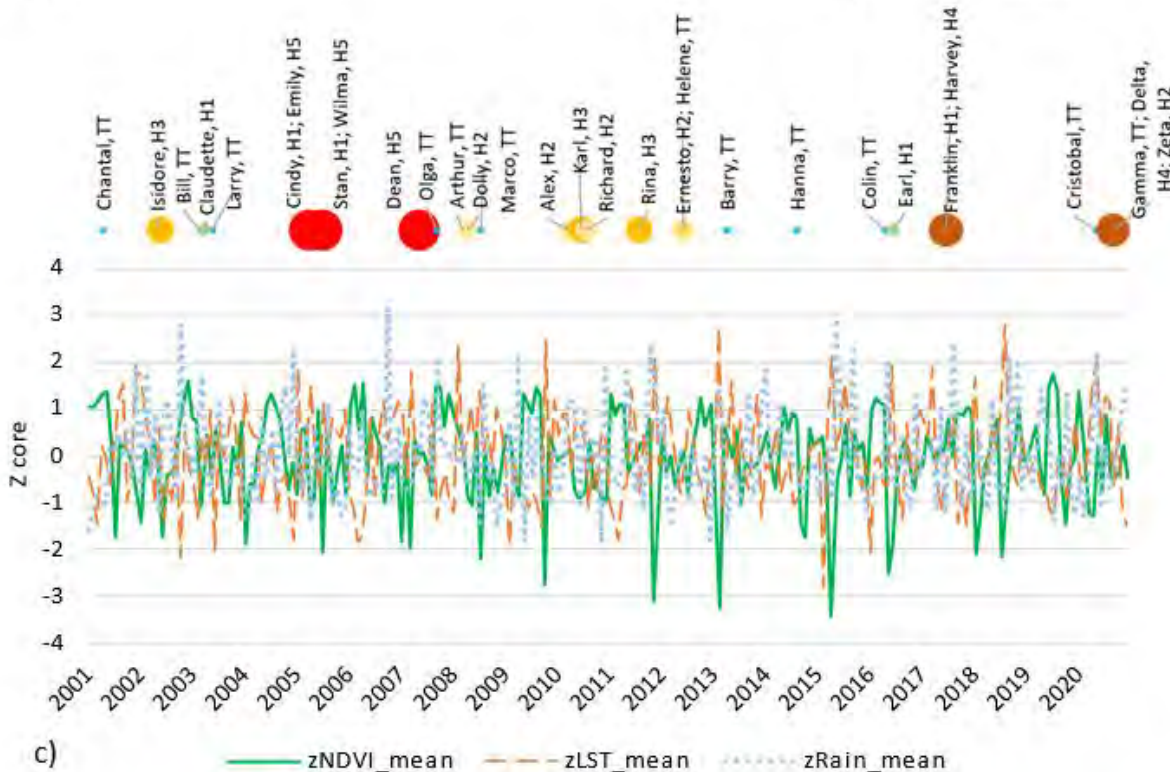
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SM-SP_2; Coords.: (-87.296, 20.749)



a)

b)



c)

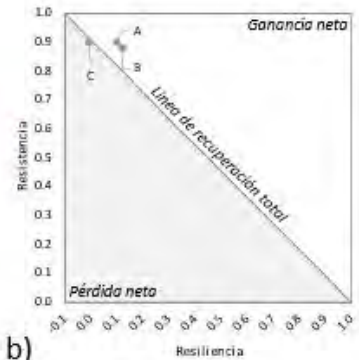
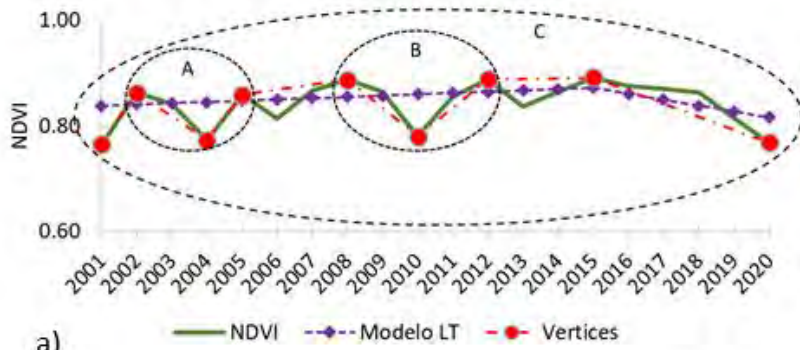
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2004	2006	2010	0.94	0.83	-0.15	0.02	-0.17	0.11	-0.06	0.11
B	2010	2011	2014	0.88	0.73	-0.22	0.04	-26.66%	14.31%	-12.35%	0.14
C	2014	2015	2016	0.94	0.65	-0.26	0.22	-35.06%	29.19%	-5.87%	0.29
D	2001	2015	2020	0.90	0.62	-0.29	0.04	-37.72%	27.72%	-10.00%	0.28



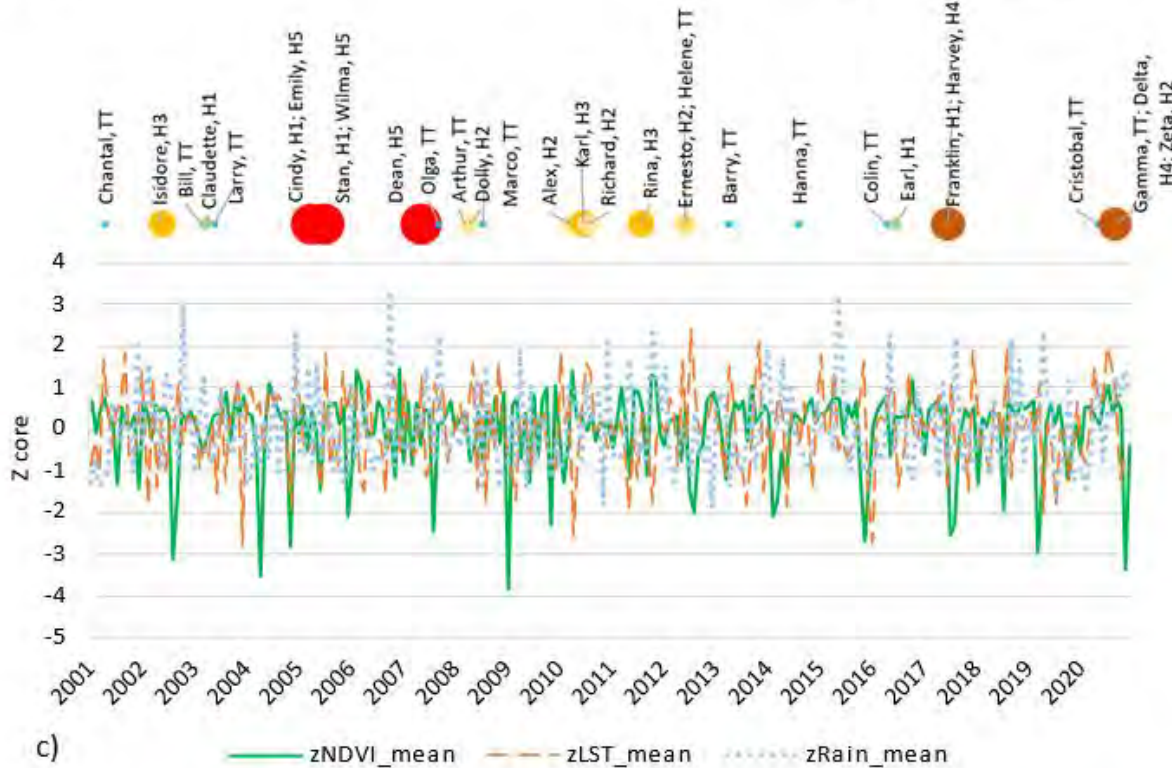
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SM-SP_3; Coords.: (-87.513, 20.242)



a)

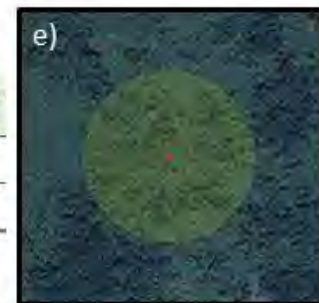
b)



c)

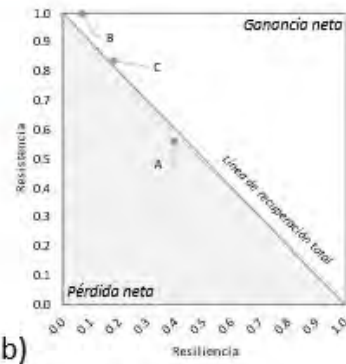
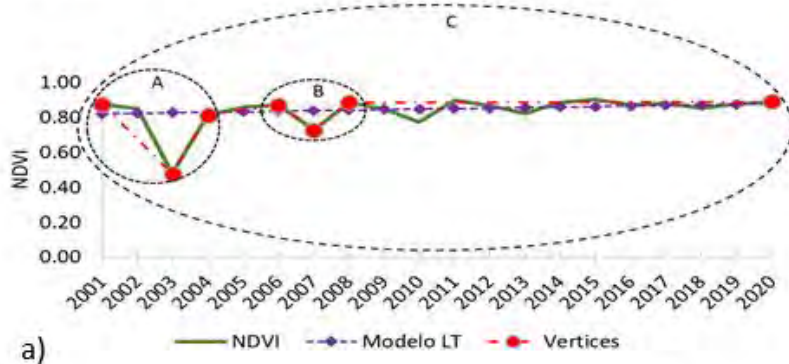
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2004	2005	1.00	0.90	-0.09	0.09	-0.10	0.10	0.00	0.10
B	2008	2010	2012	1.00	0.88	-0.11	0.05	-12.13%	12.15%	0.02%	0.12
C	2001	2010	2020	1.00	1.00	0.00	0.00	0.46%	-0.66%	-0.20%	0.00



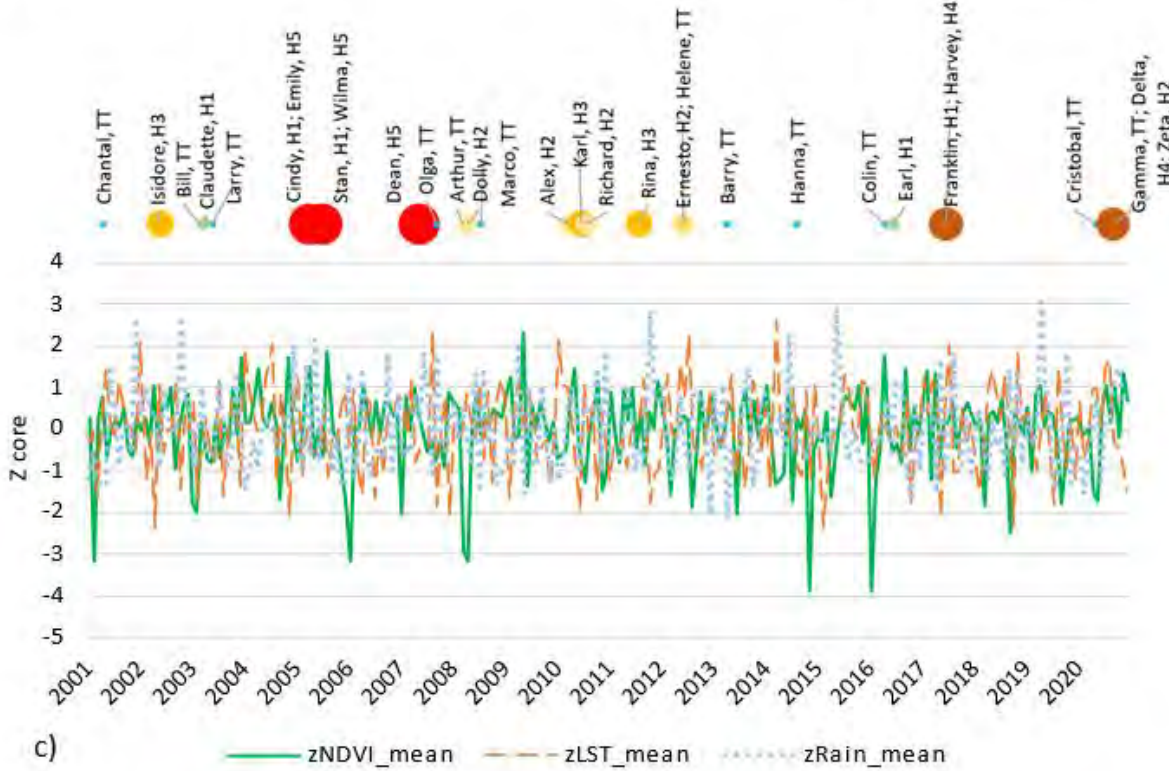
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SM-SP_4; Coords.: (-87.963, 19.819)



a)

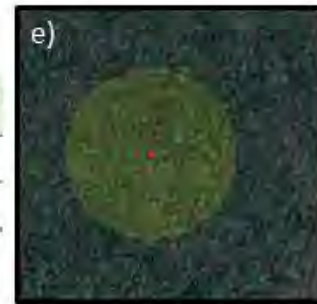
b)



c)

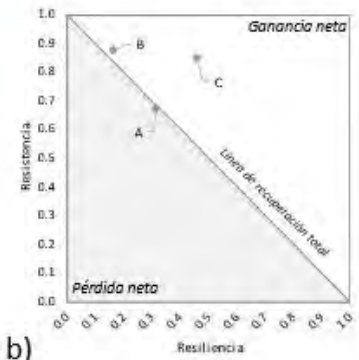
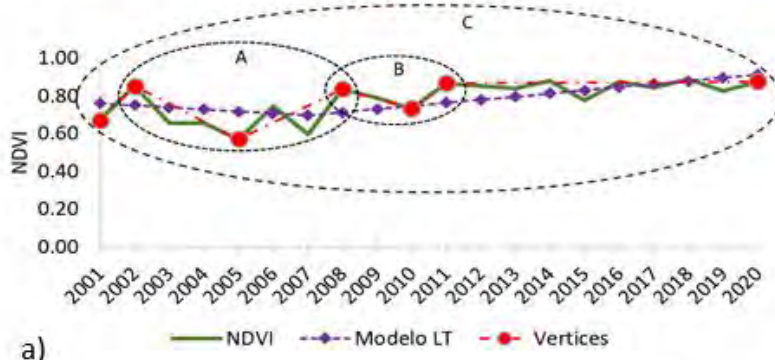
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/annual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2001	2003	2004	0.96	0.56	-0.37	0.34	-0.44	0.40	-0.04	0.40
B	2006	2007	2008	1.07	1.00	0.05	0.01	5.79%	1.18%	6.97%	0.07
C	2001	2003	2020	1.02	0.84	-0.14	0.01	-16.17%	18.09%	1.91%	0.18



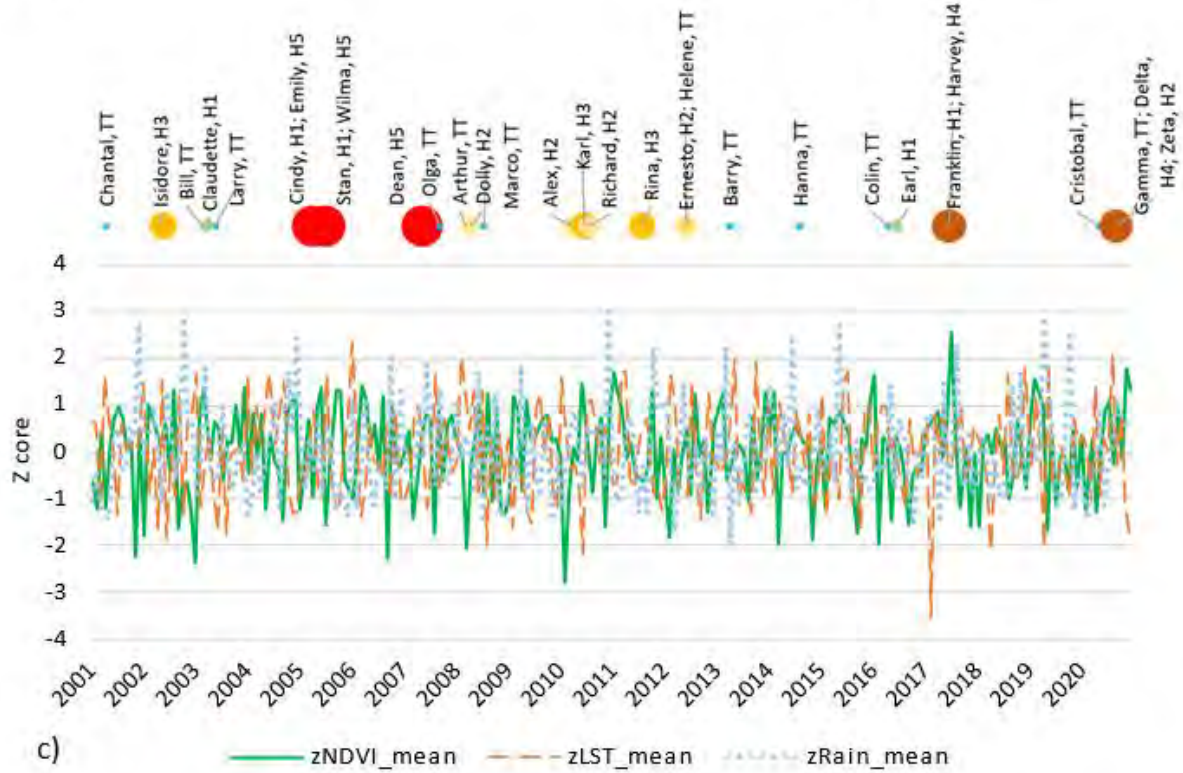
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SM-SP_5; Coords.: (-88.163, 20.222)



a)

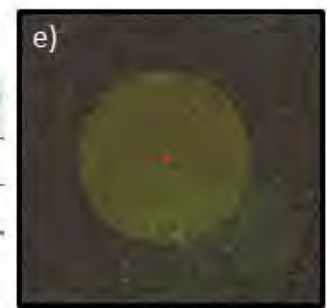
b)



c)

d)

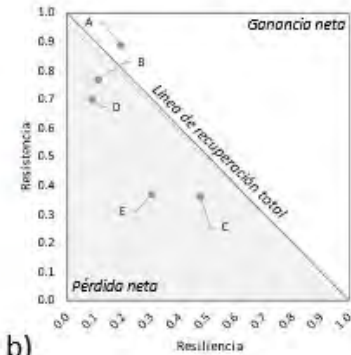
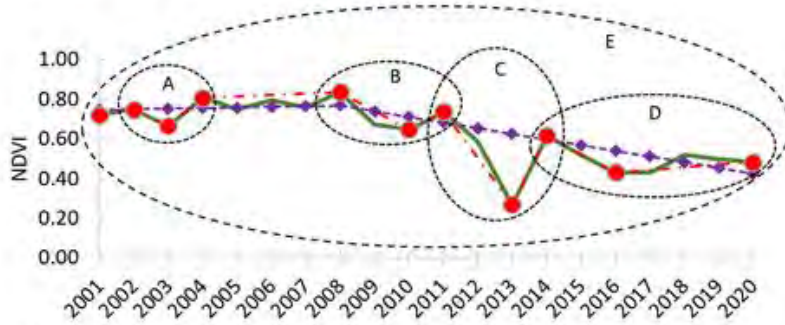
Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anoal]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2005	2008	0.98	0.67	-0.28	0.09	-0.33	0.31	-0.02	0.31
B	2008	2010	2011	1.04	0.88	-0.10	0.13	-12.38%	16.07%	3.69%	0.16
C	2001	2005	2020	1.30	0.85	-0.10	0.02	-14.99%	45.47%	30.48%	0.45



M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

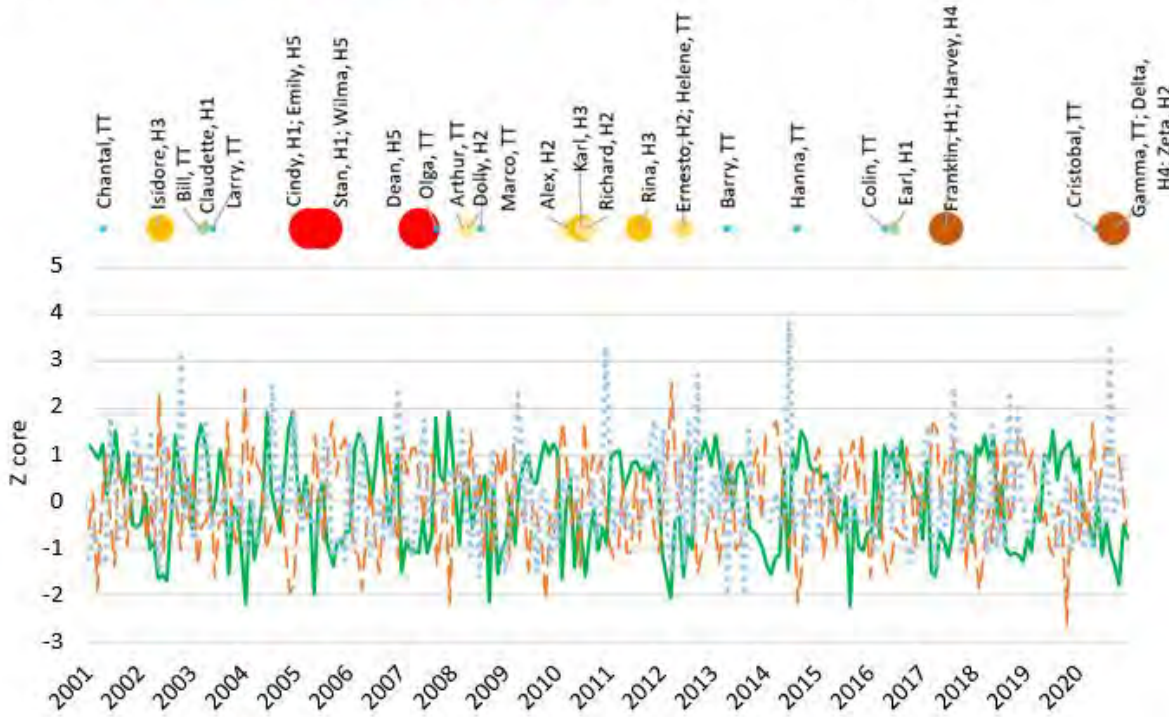
c. selva baja caducifolia y subcaducifolia.

UBAE: SB-CSC_1; Coords.: (-89.444, 20.241)



a) — NDVI — Modelo LT — Vertices

b)



c) — zNDVI_mean — zLST_mean — zRain_mean

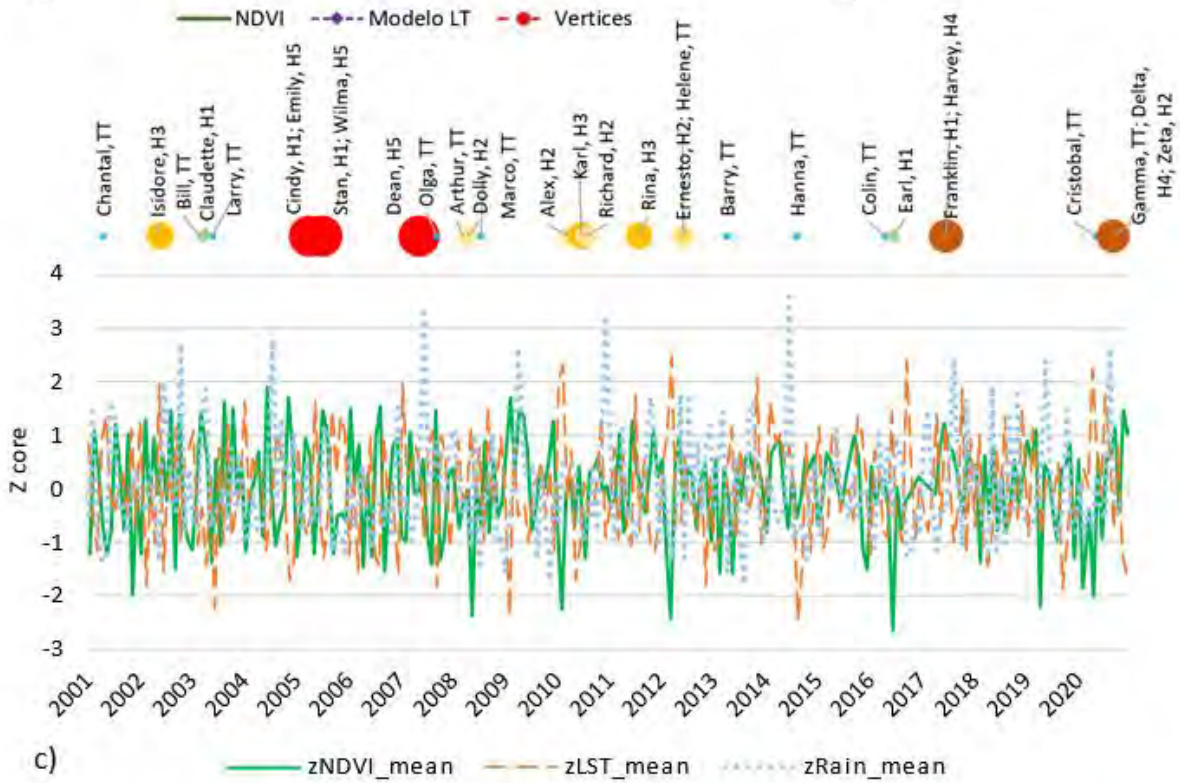
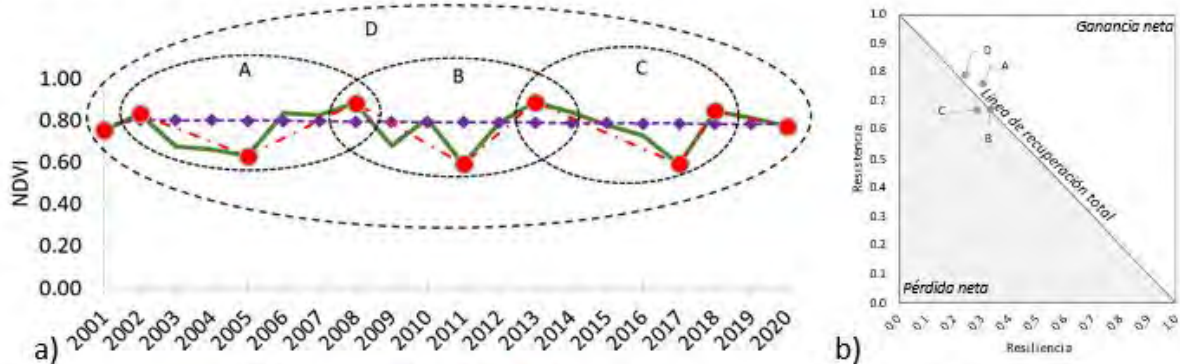
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ² [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2003	2004	1.08	0.89	-0.08	0.14	-0.11	0.19	0.08	0.19
B	2008	2010	2011	0.88	0.77	-0.19	0.09	-22.82%	10.91%	-11.91%	0.11
C	2011	2013	2014	0.84	0.36	-0.47	0.35	-65.63%	47.20%	-16.43%	0.47
D	2014	2016	2020	0.79	0.70	-0.18	0.01	-29.87%	8.40%	-21.46%	0.08
E	2001	2013	2020	0.67	0.37	-0.45	0.03	-62.87%	29.88%	-32.99%	0.30



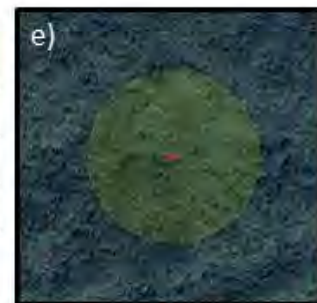
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SB-CSC_2; Coords.: (-89.836, 20.519)



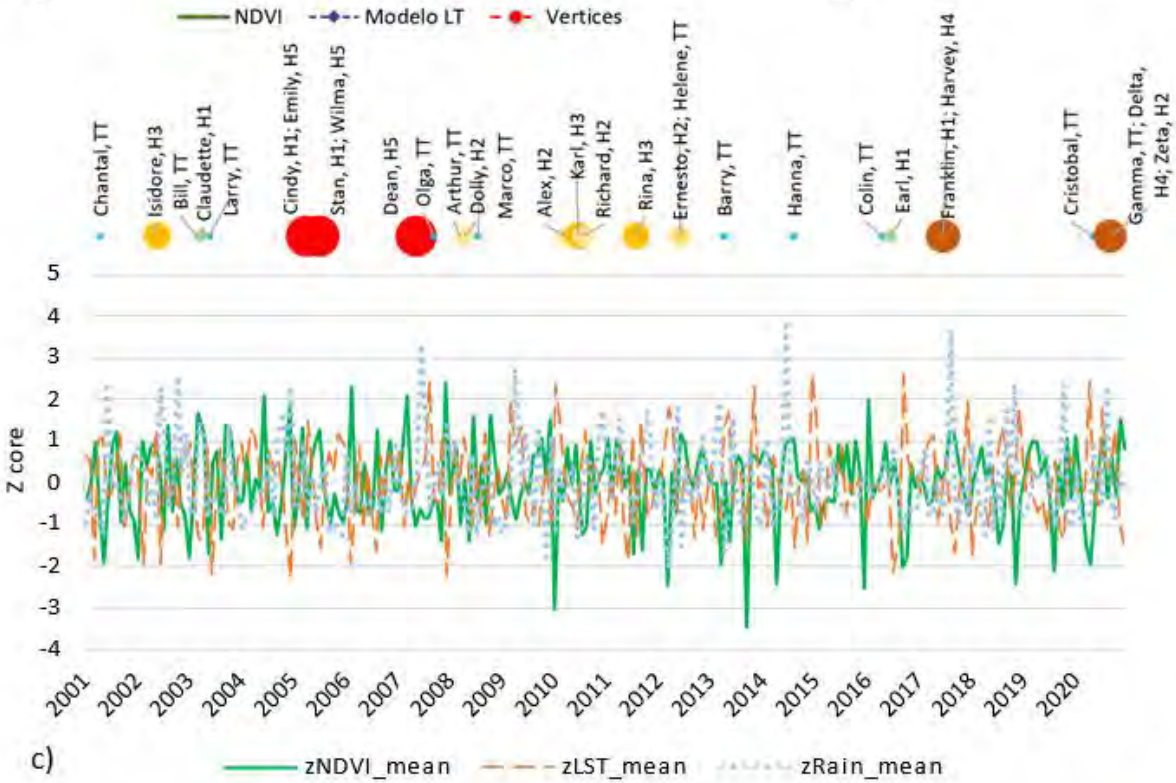
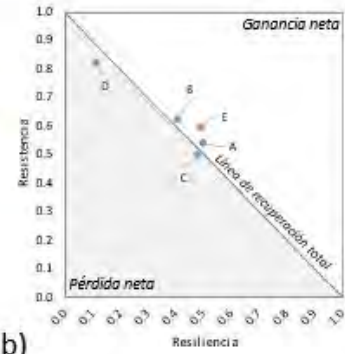
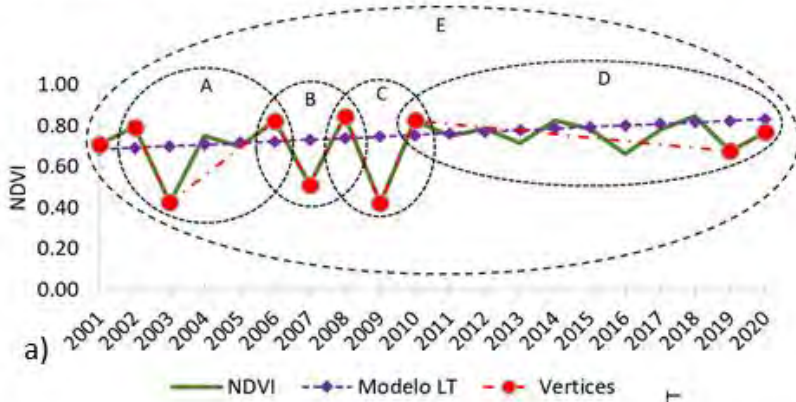
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/annual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2005	2008	1.06	0.76	-0.20	0.08	-0.24	0.30	0.06	0.30
	0.83	0.63	0.89								
B	2008	2011	2013	1.00	0.67	-0.29	0.15	-0.33	0.35	0.00	0.33
	0.89	0.59	0.89								
C	2013	2017	2018	0.95	0.67	-0.29	0.25	-33.12%	28.37%	-4.75%	0.28
	0.89	0.59	0.85								
D	2001	2011	2020	1.03	0.79	-0.16	0.02	-21.12%	23.82%	2.70%	0.24
	0.75	0.59	0.77								



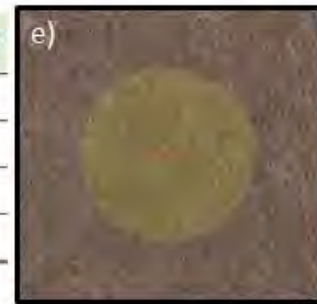
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SB-CSC_3; Coords.: (-90.046, 20.984)



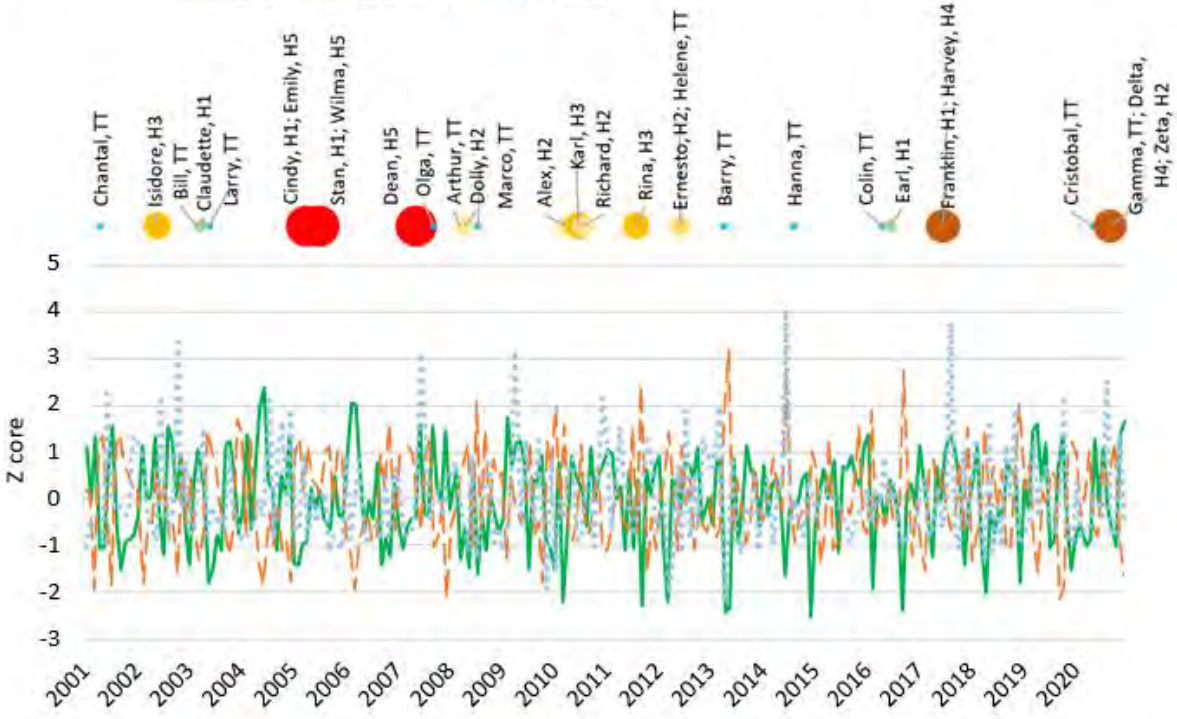
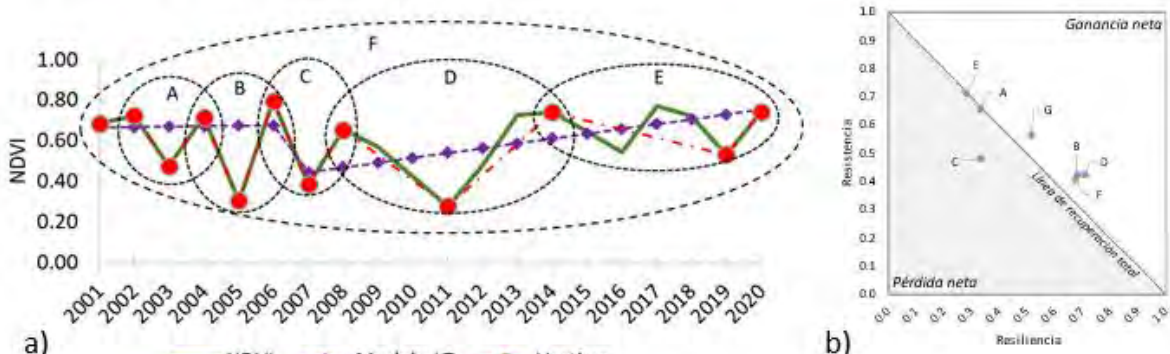
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)			
A	2002	2003	2006	0.80	0.43	0.83	1.04	0.54	-0.37	0.13	-0.46	0.50	0.04	0.50
B	2006	2007	2008	0.83	0.51	0.85	1.03	0.62	-0.31	0.34	-37.88%	40.62%	2.75%	0.41
C	2008	2009	2010	0.85	0.42	0.83	0.98	0.50	-0.42	0.40	-50.09%	47.61%	-2.48%	0.48
D	2010	2019	2020	0.83	0.68	0.77	0.93	0.82	-0.15	0.09	-17.99%	11.17%	-6.82%	0.11
E	2001	2009	2020	0.71	0.42	0.77	1.08	0.60	-0.29	0.03	-40.48%	48.84%	8.36%	0.49



M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

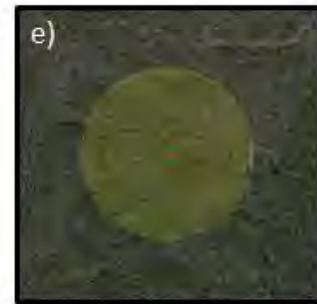
UBAE: SB-CSC_4; Coords.: (-89.498, 21.011)



c) zNDVI_mean — zLST_mean — zRain_mean

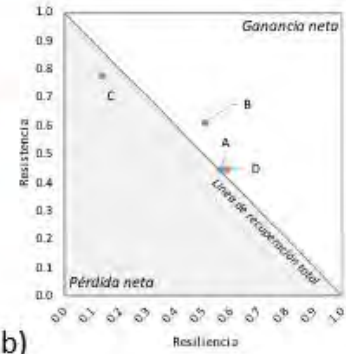
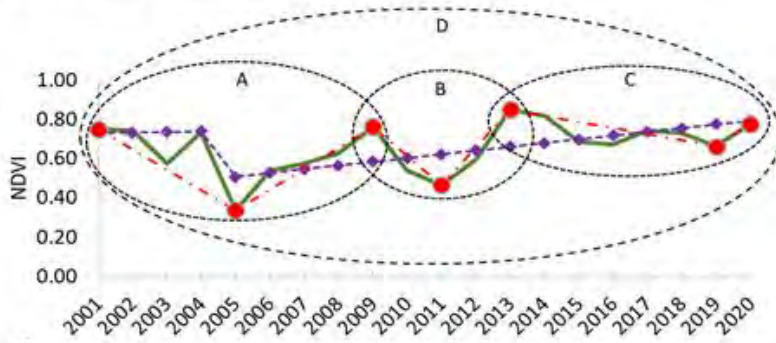
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anoal]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2003	2004	0.99	0.66	-0.25	0.24	-0.34	0.33	-0.01	0.33
B	2004	2005	2006	1.11	0.43	-0.41	0.49	-0.57	0.68	0.11	0.68
C	2006	2007	2008	0.82	0.48	-0.41	0.27	-0.52	0.34	-0.18	0.34
D	2008	2011	2014	1.13	0.43	-0.37	0.15	-0.57	0.71	0.13	0.71
E	2014	2019	2020	1.00	0.72	-0.21	0.21	-0.28	0.28	0.00	0.28
F	2001	2011	2020	1.08	0.41	-0.41	0.05	-59.20%	67.31%	8.11%	0.67



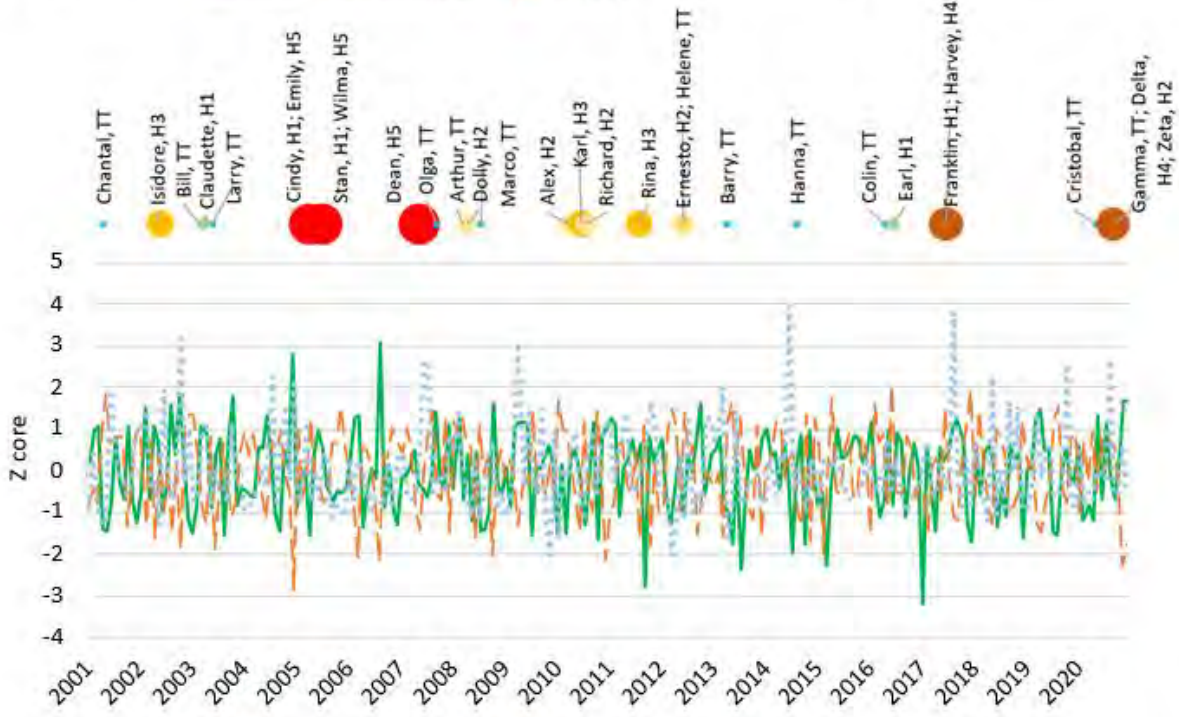
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SB-CSC_5; Coords.: (-89.591, 21.221)



a) — NDVI — Modelo LT — Vertices

b)



c) — zNDVI_mean — zLST_mean — zRain_mean

d)

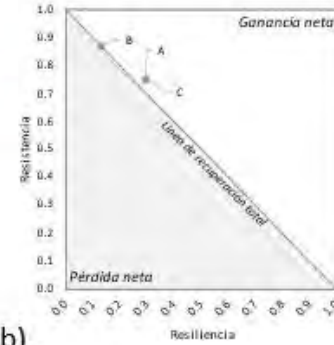
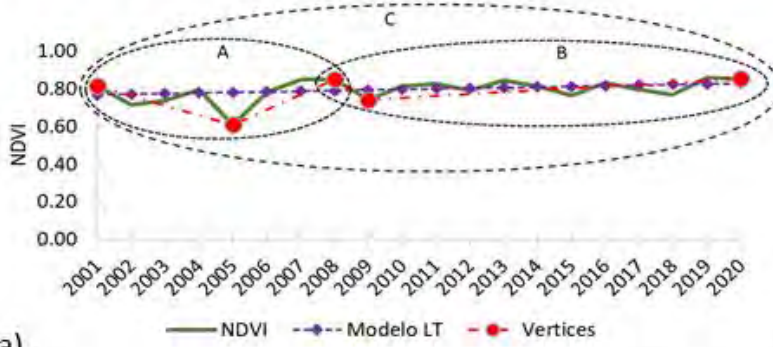
Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDV/anoal]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto [%]	Resiliencia [%]
A	2001	2005	2009	1.01	0.45	-0.41	0.11	-0.55	0.56	0.01	0.56
	0.75	0.34	0.76								
B	2009	2011	2013	1.12	0.61	-0.29	0.19	-38.67%	50.32%	11.65%	0.50
	0.76	0.47	0.85								
C	2013	2019	2020	0.91	0.78	-0.19	0.11	-22.01%	13.40%	-8.60%	0.13
	0.85	0.66	0.78								
D	2001	2005	2020	1.03	0.45	-0.41	0.03	-55.07%	58.42%	3.35%	0.58
	0.75	0.34	0.78								



M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

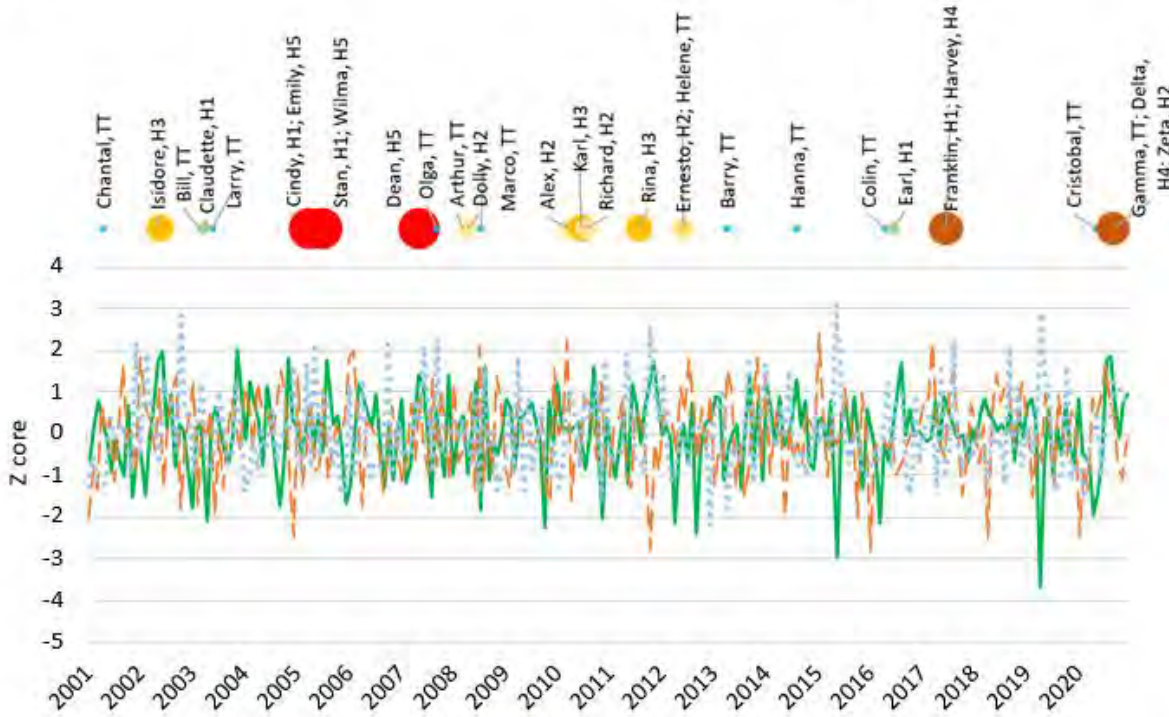
d. selva baja subperennifolia.

UBAE: SB-SP_1; Coords.: (-87.598, 19.926)



a)

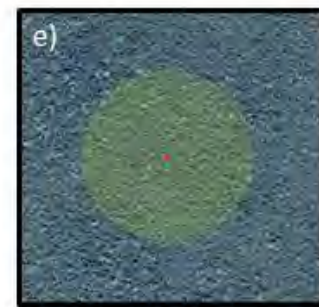
b)



c)

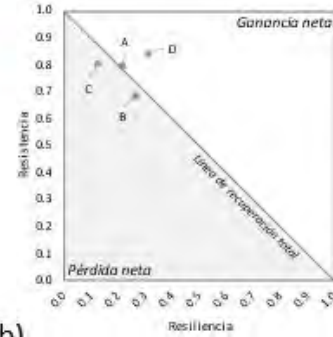
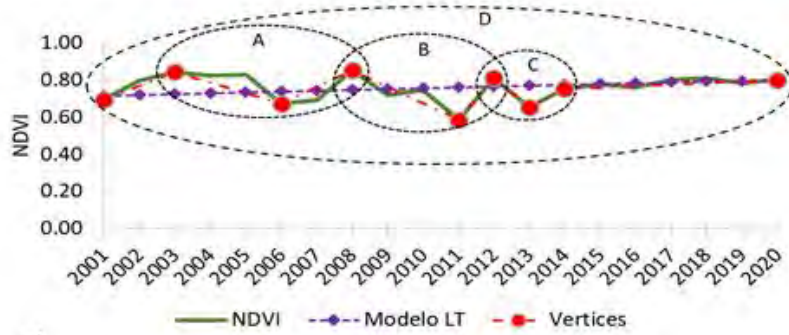
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anoal]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ² [%]	Resiliencia (IRG)
A	2001	2005	2008	1.04	0.75	-0.20	0.08	-0.25	0.30	0.04	0.30
		0.81	0.61	0.85							
B	2008	2009	2020	1.01	0.87	-0.11	0.01	-12.84%	13.36%	0.52%	0.13
		0.85	0.74	0.86							
C	2001	2005	2020	1.05	0.75	-0.20	0.02	-25.15%	30.11%	4.95%	0.30
		0.81	0.61	0.86							



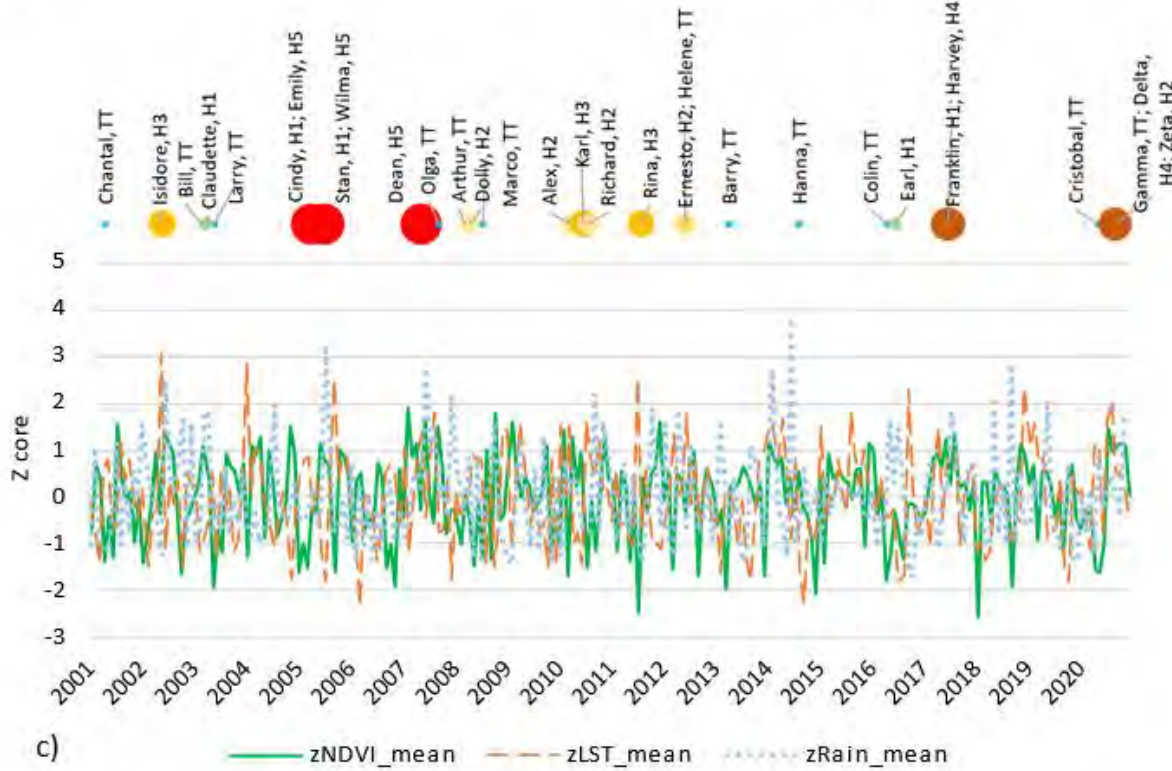
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SB-SP_2; Coords.: (-90.308, 19.773)



a)

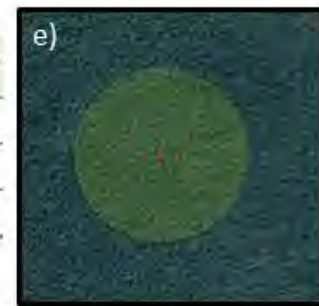
b)



c)

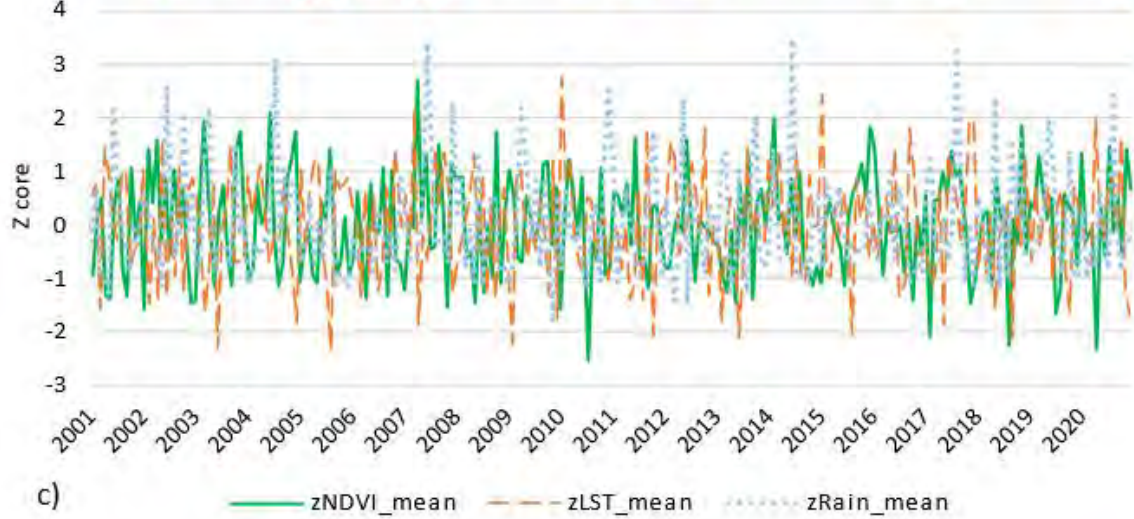
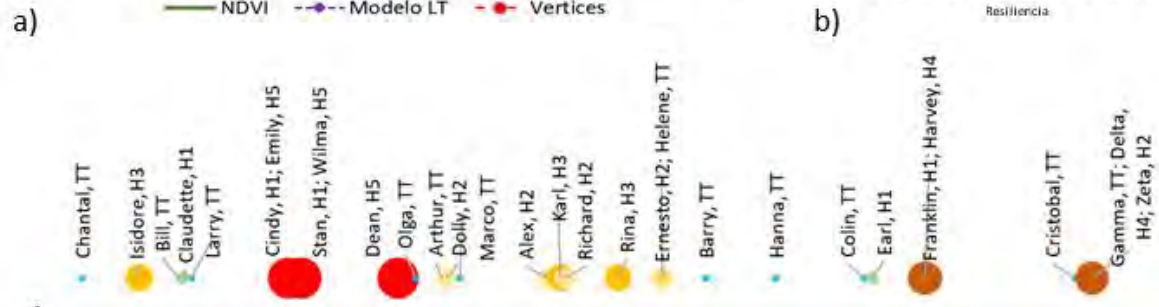
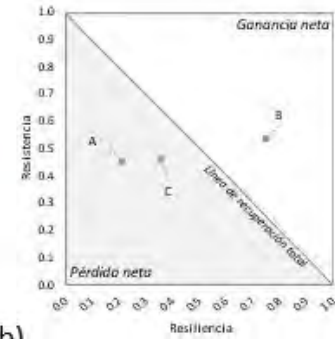
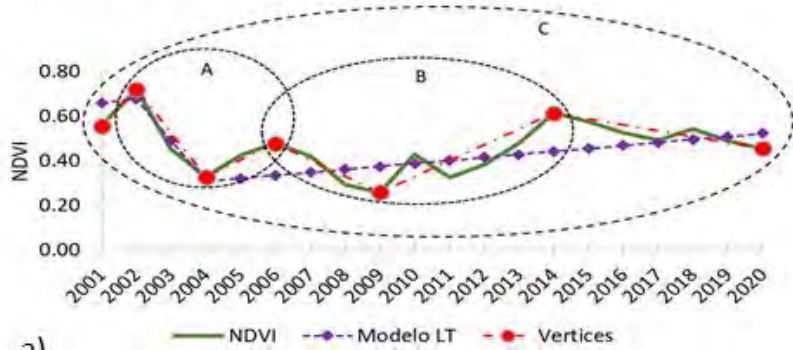
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2003	2006	2008	1.01	0.80	-0.17	0.09	-0.20	0.21	0.01	0.21
	0.84	0.67	0.85								
B	2008	2011	2012	0.95	0.69	-0.27	0.22	-31.31%	26.37%	-4.94%	0.26
	0.85	0.59	0.81								
C	2012	2013	2014	0.93	0.81	-0.16	0.10	-19.41%	12.14%	-7.27%	0.12
	0.81	0.65	0.75								
D	2001	2001	2020	1.15	0.84	-0.11	0.01	-15.81%	30.89%	15.08%	0.31
	0.70	0.59	0.80								



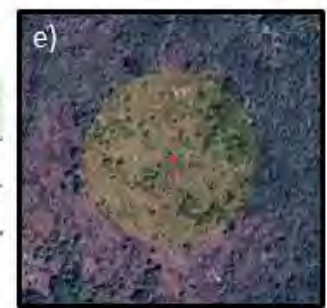
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SB-SP_3; Coords.: (-90.262, 20.832)



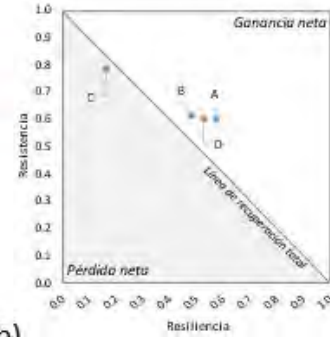
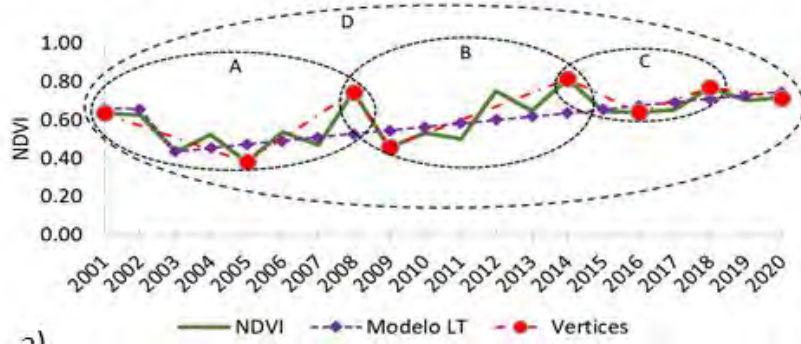
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/annual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto ¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2004	2006	0.66	0.45	-0.39	0.08	-0.55	0.21	-0.34	0.21
B	2006	2009	2014	1.28	0.54	-0.22	0.07	-46.26%	74.65%	28.39%	0.75
C	2001	2009	2020	0.82	0.46	-0.30	0.02	-53.85%	35.44%	-18.42%	0.35



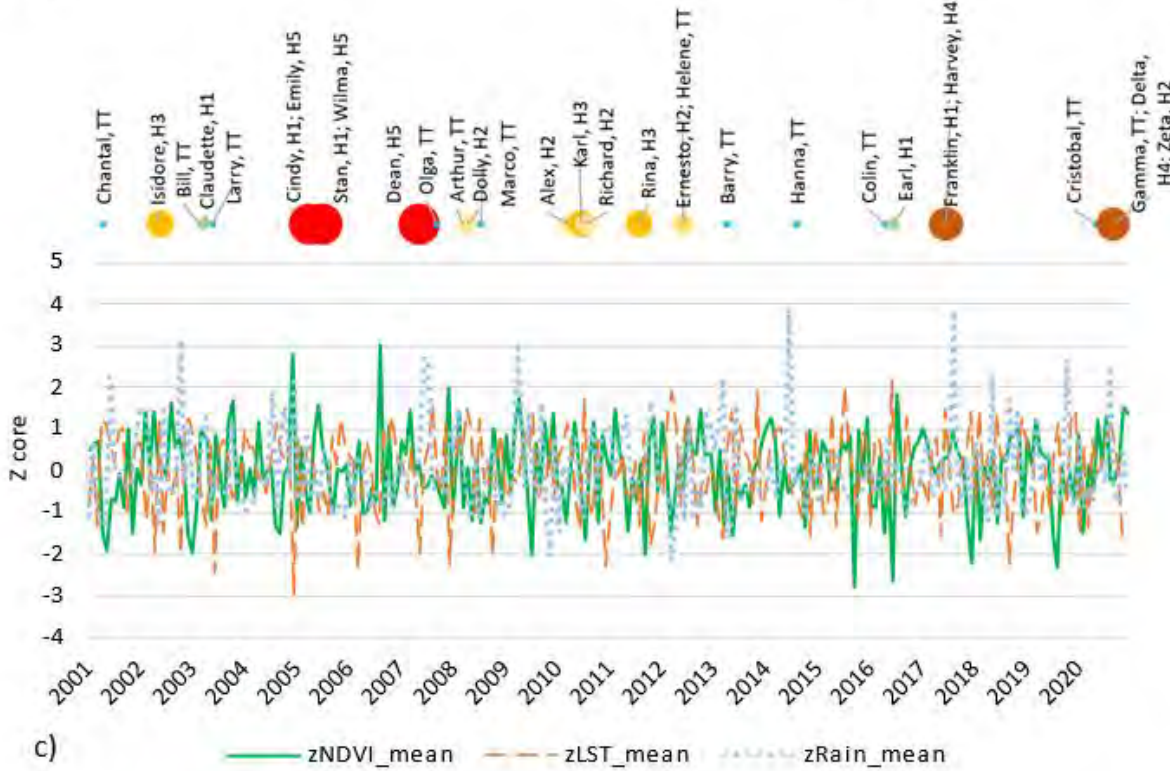
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SB-SP_4; Coords.: (-89.640, 21.234)



a)

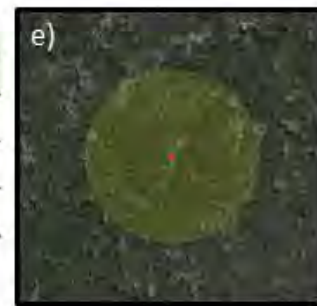
b)



c)

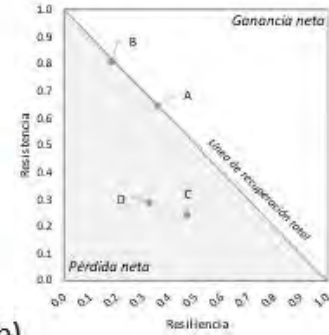
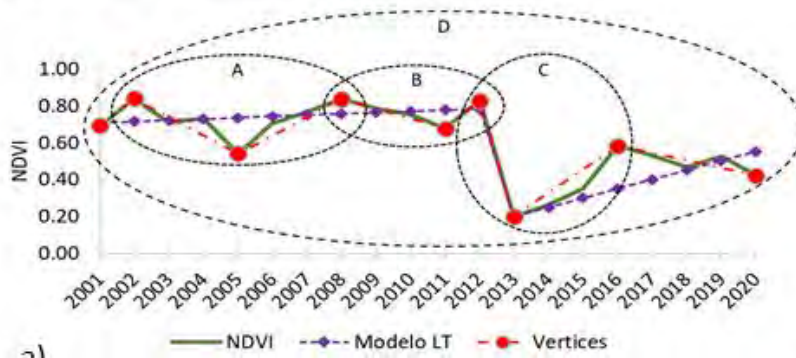
d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/anoal]	Resistencia [Perturbación] [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto [%]	Resiliencia (IRG)
A	2001	2005	2008	1.17	0.60	-0.25	0.12	-0.40	0.57	0.17	0.57
	0.64	0.38	0.75								
B	2008	2009	2014	1.09	0.61	-0.29	0.07	-38.52%	47.87%	9.35%	0.48
	0.75	0.46	0.82								
C	2014	2016	2018	0.95	0.79	-0.18	0.07	-21.45%	15.98%	-5.48%	0.16
	0.82	0.64	0.77								
D	2001	2005	2020	1.13	0.60	-0.25	0.02	-39.97%	52.51%	12.53%	0.53
	0.64	0.38	0.72								



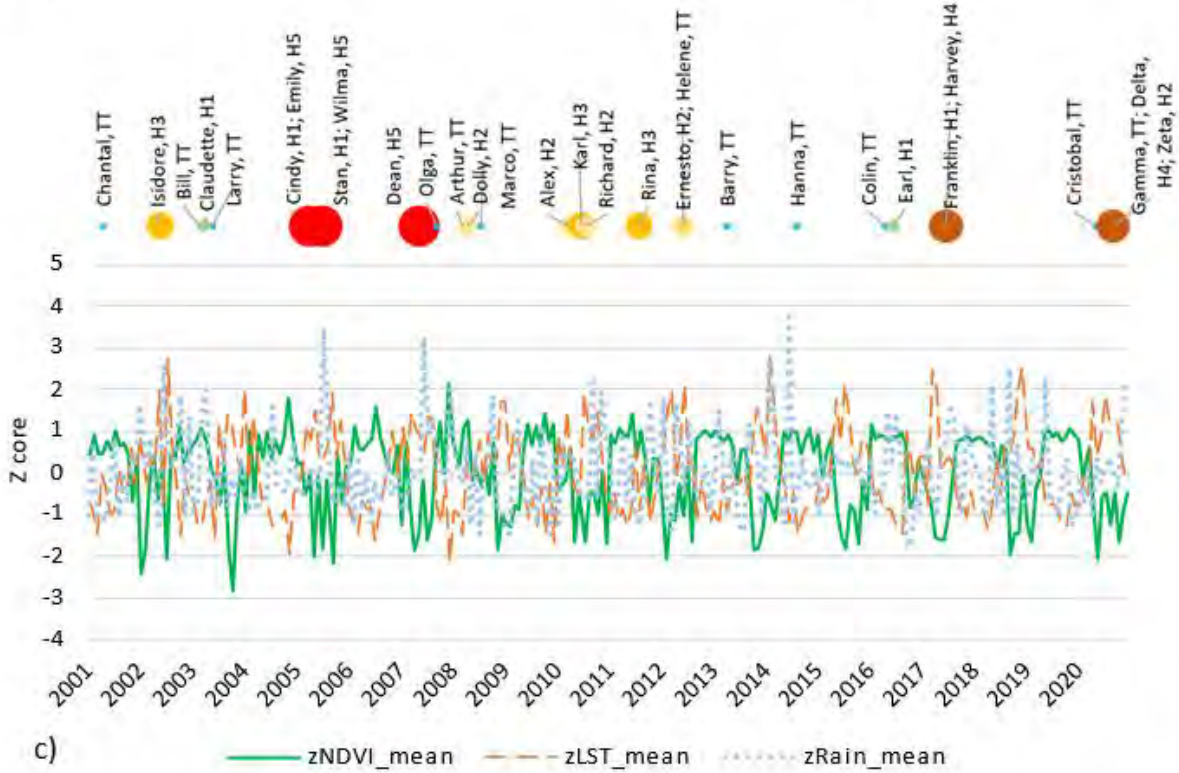
M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

UBAE: SB-SP_5; Coords.: (-90.289, 19.748)



a)

b)



c)

d)

Escenario	T1	T2	T3	Coef. de Cambio Neto	Coef. de Resistencia	Resistencia [NDVI]	Tasa Recuperación [NDVI/annual]	Resistencia (Perturbación) [%]	Recuperación [%]	Cambio Neto¹ [%]	Resiliencia (IRG)
A	2002	2005	2008	1.00	0.65	-0.30	0.10	-0.35	0.35	0.00	0.35
	0.84	0.54	0.84								
B	2008	2011	2012	0.99	0.81	-0.16	0.15	-19.19%	17.93%	-1.26%	0.18
	0.84	0.68	0.83								
C	2012	2013	2016	0.70	0.24	-0.63	0.13	-75.92%	46.35%	-29.57%	0.46
	0.83	0.20	0.58								
D	2001	2013	2020	0.61	0.29	-0.49	0.03	-71.24%	32.36%	-38.88%	0.32
	0.69	0.20	0.42								



M. Geog. Gabriel Sánchez Rivera. 2022

EL autor es licenciado y maestro en Geografía por la UNAM, egresado del doctorado en “Desarrollo Sostenible”, por la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Cuenta con dos diplomados en formación docente en las modalidades presencial, abierta y a distancia. Especialista en temas de Análisis Espacial, SIG’s, Geografía Ambiental, Riesgos, Servicios Ecosistémicos y Sustentabilidad.

Ha participado en la elaboración de planes de estudio y cursos (presenciales y a distancia) para licenciatura y maestría. Cuenta con más de 25 años de experiencia en la elaboración de estudios y proyectos ambientales, colaborando en distintas dependencias públicas y privadas. Con quince años de actividad docente, ha impartido cursos a nivel licenciatura y posgrado en diversas universidad como son: la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UQRoo), Colegio de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras (FFyL) de la UNAM, Universidad Abierta y a Distancia de México (UnADM) y Universidad Riviera.

Miembro de a) REDESClim – CONACYT; b) Seminario de Cambio Climático, Biodiversidad y Salud, del Colegio de Geografía, UNAM; y c) Red Iberoamericana de Gestión y Certificación de Playas -PROPLAYAS-, Nodo local 02 Riviera Maya.

<https://orcid.org/0000-0003-4531-4911>

Playa del Carmen, noviembre de 2022
