

Propuesta de modelo espacial para evaluar indicadores de riesgos a los impactos del cambio climático.

Proposal for a spatial model to evaluate risk indicators of climate change impacts.

Dr. C. José Carlos Núñez Mora. (1)

1. GEOCUBA IC, Cuba. jcarlos@uct.geocuba.cu.

RESUMEN

El cambio climático es uno de los mayores retos que enfrenta la humanidad, mitigarlo y adaptarse son tareas urgentes, requiriendo del uso de todas las herramientas disponibles para definir respuestas, aun adoleciendo de toda la información necesaria.

Un modelo espacial de riesgos de desastres es un enfoque que integra variables territoriales para analizar y representar geográficamente la vulnerabilidad, las amenazas y las capacidades de una zona frente a posibles desastres y es una etapa clave en el ciclo de la adaptación al cambio climático.

La presente propuesta de modelo de modelo espacial para evaluar indicadores de vulnerabilidad y riesgos a los impactos del cambio climático por cuencas hidrográficas permitió modelar por cuencas hidrográficas específicas, una representación espacial, (a través de capas de información geográfica) de los impactos del clima, construir diversos mapas de peligros, exposición y vulnerabilidades, y lograr identificar los sitios de riesgos en el municipio especial de la Isla de la Juventud, permitiendo a los tomadores de decisiones, establecer las estrategias más adecuadas al enfrentamiento del cambio climático en el territorio.

Los resultados obtenidos en su aplicación en la Isla de la Juventud, se caracterizaron por evaluar indicadores de riesgo a impactos del cambio climático (CC), combinando análisis cuantitativos, heurísticas expertas y tecnologías geoespaciales. El modelo busca superar enfoques fragmentados mediante una plataforma dinámica adaptable a escalas locales-nacionales, aportando un análisis a la valoración de los impactos del Cambio Climático, desde la perspectiva de las cuencas hidrográficas.

Palabras claves: cambio climático; indicadores de riesgos; modelo espacial.

ABSTRACT

Here is now a general consensus in the scientific community that the increase in greenhouse gas concentrations as a result of human activities is the unequivocal cause of the current warming of the atmosphere, oceans, and land.

A spatial disaster risk model is an approach that integrates territorial variables to analyze and geographically represent the vulnerability, threats, and capabilities of an area in the face of potential disasters and is a key step in the climate change adaptation cycle. This proposed spatial model for

evaluating vulnerability and risk indicators for the impacts of climate change by watershed allows for the modeling of specific watersheds, a spatial representation—through layers of geographic information—of climate impacts, the construction of various hazard, exposure, and vulnerability maps, and the identification of risk sites in the special municipality of Isla de la Juventud. This allows decision-makers to establish the most appropriate strategies for addressing climate change in the territory.

The results obtained from its application on the Isle of Youth were characterized by the evaluation of risk indicators for climate change (CC) impacts, combining quantitative analysis, expert heuristics, and geospatial technologies. The model seeks to overcome fragmented approaches through a dynamic platform adaptable to local and national scales, providing analysis for the assessment of climate change impacts from the perspective of watersheds.

Key words: climate change; risk indicators; spatial model.

Recibido: 14/05/25

Aprobado: 03/06/25

INTRODUCCION

Con relación al CC la mayoría de las investigaciones se han enfocado a analizar sus aspectos biofísicos, la resistencia y resiliencia de los ecosistemas. Sin embargo, los impactos sociales y económicos son menos estudiados, en parte por su dificultad para cuantificarlos o la limitación de información, la cual en muchos de los casos no está referida al espacio, y ninguno ha estado evaluado de forma integral, ni asociado a un escenario climático específico.

La confección de un modelo espacial de riesgos de desastres es un enfoque que integra variables territoriales para analizar y representar geográficamente la vulnerabilidad, las amenazas y las capacidades de una zona frente a posibles desastres. Representan una revolución metodológica en la gestión de riesgos de desastres, porque permite integración de tecnologías emergentes, enfoques multiescalas híbridos, con fuentes no convencionales como redes sociales para mapeo de daños y simulación de escenarios complejos. Han existido modelos anteriores para determinar vulnerabilidades (Zerecero et al), pero pocos han estado asociado a escenarios climáticos específicos.

La información espacial, con las resoluciones temporal, espacial, espectral y radiométrica alcanzadas, resultan esenciales para la gestión de reducción de riesgos de impactos del cambio climático y de desastres en sentido general. Actualmente, esta herramienta facilita las acciones de: detección, monitoreo, mapeo, visualización y evaluación de eventos adversos para un mejor análisis, a la vez, que su cobertura global, permite una mejor comprensión de la exposición al riesgo de manera objetiva. Sus aplicaciones básicas están asociadas a la protección de la agricultura, la planificación urbana, la gestión de emergencias y la Prevención y Mitigación.

Ante la urgencia climática global, este artículo propone un modelo espacial integrado para evaluar indicadores de riesgo a impactos del cambio climático (CC), combinando análisis cuantitativos, heurísticas expertas y tecnologías geoespaciales. El modelo busca superar enfoques fragmentados mediante una plataforma dinámica adaptable a escalas locales-nacionales y escenarios climáticos específicos.

METODOLOGIAS.

Características generales del área de aplicación de la propuesta.

Desde el punto de vista de las características geológicas y físico geográficas, en la Isla se distinguen dos zonas: al sur la llamada zona meridional, donde existe el importante humedal de la Ciénaga de Lanier; y el resto del territorio insular, conocido como zona septentrional, con geología y suelos variados, y una topografía predominantemente llana. De manera que, esta área insular, es una pequeña isla de composición geológica mixta y topografía baja.

Los recursos hídricos en la Isla, proceden en su mayoría de las precipitaciones que alimentan las aguas superficiales, acuíferos. Asimismo, en la Isla de forma natural ocurren fenómenos hidrológicos extremos, entre los que se destacan las inundaciones o las sequías.

Básicamente el suministro de sus aguas es de origen pluvial aumentando sus cauces en el período húmedo, secándose en los meses de período seco (noviembre - abril). La mayoría de las corrientes fluviales se encuentran reguladas por catorce embalses, las cuales suministran el agua para las áreas de regadío de los diferentes cultivos, la industria, la población y el cultivo de peces.

Desarrollo de la metodología propuesta.

El presente trabajo, se caracteriza por tener un diseño de investigación del tipo, aplicada-descriptiva y predictiva, ya que diseña una metodología para realizar un modelo que permite caracterizar amenazas, vulnerabilidad y exposición mediante datos geoespaciales, de forma predictiva, desarrollando modelos para simular escenarios de riesgo. Este modelo geoespacial se caracteriza por la articulación de tres dimensiones interconectadas:

- **Amenaza climática** (proyecciones de temperatura, lluvia, frecuencia de eventos extremos para escenario climático RCP 4.5).
- **Vulnerabilidad multisistémica** (social, ecológica, infraestructural)
- **Capacidad adaptativa** (institucional, tecnológica, comunitaria)

Como primer paso en la confección de la metodología, se confeccionó un diagrama de flujo para el modelo espacial integrado a realizar. Las entradas a este diagrama de flujo definidas fueron: Datos de Amenaza (Modelos climáticos, imágenes satelitales), datos de Vulnerabilidad (Censos, levantamientos con LIDAR, levantamientos NDVI), datos de Capacidad Adaptativa (datos institucionales, encuestas). Este diagrama de flujo, combina fuentes cuantitativas (modelos climáticos, imágenes satelitales) con cualitativas (heurísticas expertas, datos comunitarios).

El modelo propone el desarrollo de las siguientes cinco etapas clave:

1. Construcción de Indicadores Espacializados.
2. Integración Heurístico-Cuantitativa.
3. Calibración con Datos Locales.
4. Generación de Productos Estratégicos de información.

A continuación, se presentan las características fundamentales de cada etapa:

1. Construcción de indicadores espacializados:

Se genera capas geoespaciales para las tres dimensiones clave: Amenaza, Vulnerabilidad y Capacidad Adaptativa.

2. Integración heurístico-cuantitativa:

Se fusionan los análisis numéricos con reglas expertas, mediante: ponderación multicriterios (AHP), validación participativa, y aplicación de heurísticas espaciales. Integración Heurístico-Cuantitativa

Por ejemplo: Reglas expertas: "Áreas con pendiente >25% + reducción precipitación >20% = alto riesgo erosión".

3. Calibración con datos locales:

Aunque la aplicación realizada en la Isla de la Juventud, no se utilizó esta información completamente, la metodología diseñada permite ajustar el modelo, mediante los siguientes datos: mapeo participativo, monitoreo comunitario, y retroalimentación local. Por ejemplo: Validación mediante: Trabajo de campo con comunidades, Retroalimentación de sistemas de monitoreo comunitario.

4. Generación de productos estratégicos de información:

Este producto, es un indicador de la gestión de riesgos para el diseño de escenarios y su representación espacial, permitiendo la interoperabilidad de la información de la gestión y su uso en la infraestructura de datos espaciales.

La generación del producto, tiene como resultado final los resultados operativos para toma de decisiones: Ejemplos: Mapas sectoriales de riesgo, Sistema de alertas tempranas geoespaciales, Tableros de priorización de intervenciones, etc.

Se definió para el producto creado, un flujo de retroalimentación con las siguientes características:

- Los productos finales retroalimentan la plataforma para actualizaciones
- Los datos de calibración ajustan los parámetros de integración
- Ciclo iterativo que mejora la precisión del modelo

El desarrollo de estas etapas, reflejó un enfoque híbrido y adaptativo que combina ciencia de datos espaciales con conocimiento local, esencial para la evaluación de riesgos climáticos en contextos complejos.

En sentido general, entre los métodos y técnicas de investigación utilizadas, sobresalen fundamentalmente, el método cartográfico, los análisis espaciales y el análisis multicriterio espacial, soportados en múltiples herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), entre ellas las previstas para la obtención de modelos digitales de elevación, análisis hidrográfico, álgebra de mapas, reclasificación y la elaboración de mapas temáticos, entre otras. Otros métodos y técnicas utilizados fueron el análisis estadístico y bibliográfico o documental, la encuesta, así como trabajo de campo y talleres participativos.

La información que se aporta al modelo espacial, es obtenida por el modelo de Indicadores de Vulnerabilidad (MIV) y fue retomado a partir del Modelo de indicadores de Vulnerabilidad y Resiliencia (MIVR) que integra variables económicas, sociales y biofísicas y las ordena de acuerdo sectores de, sensibilidad y capacidad de adaptación como se muestra en la Figura No 1

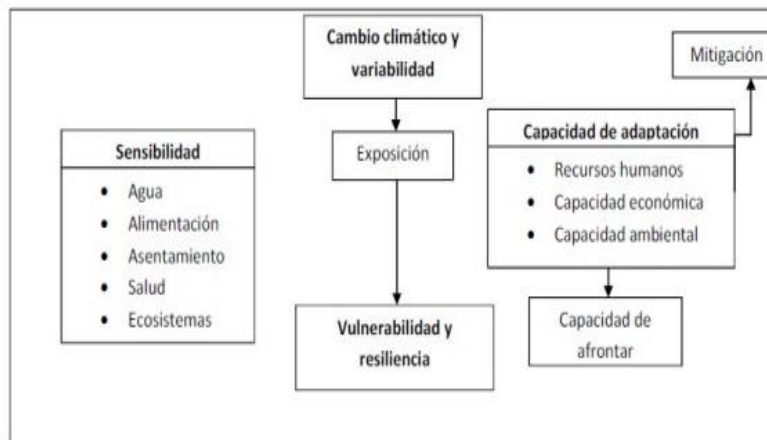


Fig. 1 Modelo de indicadores de vulnerabilidades y resiliencia (Zerecero 2017)

En los enfoques basados en datos, es habitual evaluar el riesgo con el uso de indicadores. Se pueden establecer a su vez indicadores para caracterizar las componentes individuales del riesgo (amenaza, exposición y vulnerabilidad) e indicadores compuestos que utilicen de forma agregada estos indicadores individuales. En este proceso de construcción de indicadores individuales y de agregación hay que tomar decisiones subjetivas y consensuadas sobre cómo transformar los datos en información, sobre los rangos de las escalas a utilizar y sobre el peso de las diferentes variables. Su agregación, considerando los pesos o importancia relativa que puedan tener cada uno de ellos, da lugar a unos nuevos índices compuestos. Este enfoque resulta de utilidad cuando se analiza el riesgo considerando numerosas unidades territoriales, como es el caso de las cuencas hidrográficas, los consejos populares en una ciudad, o en zonas rurales. Se trata de un enfoque muy empleado, aunque la disponibilidad de datos adecuados para la escala de trabajo o la consideración de ciertos pasos en la transformación, ponderación y agregación de dichos datos, entre otros aspectos, pueden tener incidencia en los resultados obtenidos.

En el análisis realizado, el MIVR sólo considera los sectores de sensibilidad y capacidad de adaptación, asumiendo que la variación climática y los fenómenos extremos vienen implícitos dentro del modelo. (Zerecero 2017). Sin embargo, en esta investigación se propone integrar este sector, asumiendo que la variación climática y los fenómenos extremos son elementos que contribuyen de manera distinta a la vulnerabilidad.

Este modelo, en su aplicación, fue lo suficientemente flexible como para permitir, dentro de ciertos límites, escoger la vía de realizar evaluaciones a pesar de la limitación de datos directos. Su posibilidad a través del análisis espacial de desarrollar indicadores robustos mediante la transformación de información teórica a gestión accionable permite reducir incertidumbres y facilitan la comunicación de los riesgos a tomadores de decisiones.

Para cumplir con una eficaz generación del producto, se desarrollaron los siguientes pasos

Paso 1: Definición de un diagnóstico ambiental actual del territorio

Paso 2: Identificación de futuros impactos climáticos potenciales y riesgos El principal riesgo analizado es el riesgo de daño a la propiedad y la pérdida de vidas debido a la inundación y a los fuertes vientos.

Paso 3: Determinar peligro(s) e impactos intermedios. Estos peligros estuvieron asociados a alta intensidad de lluvias, aumento de la velocidad de flujo y escorrentía, incremento de inundaciones y erosión.

Paso 4: Determinar la futura vulnerabilidad del sistema socio-ecológico. Vincular factores de vulnerabilidad con impactos intermedios relacionados ayudó a comprender relaciones causa-efecto, por ejemplo, el efecto intermedio “erosión” en una cuenca, no solo es el resultado de niveles muy elevados de agua e incremento de la velocidad de flujo, sino también está directamente relacionado con “deforestación” y el deterioro del servicio ecosistémicos “protección contra la erosión”

Paso 5: Determinación de elementos expuestos actuales y futuros del sistema socio-ecológico El ejercicio de lluvia de ideas con los actores clave relevantes, reveló que, en el pasado, los elementos frecuentemente afectados por inundaciones en las cuencas hidrográficas eran: personas, propiedades y edificios, e infraestructura crítica

Paso 6: Selección de indicadores de peligro

Paso 7: Selección de indicadores de vulnerabilidad y exposición

Paso 8: Verificar si los indicadores son suficientemente específicos

Paso 9: Crear una lista de indicadores provisionales para cada factor de riesgo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta los principales resultados obtenidos en la aplicación de la metodología propuesta en la Isla de la Juventud, para la obtención de un producto estratégico final

Paso 1: Definición de un diagnóstico ambiental actual del territorio. Representación cartográfica de indicadores principales como producto estratégico de información.

Para determinar los indicadores que aportan a la definición de un índice de sensibilidad ambiental del territorio, se tuvo como base el análisis espacial del comportamiento de múltiples criterios: geológicos, geomorfológicos, hidrográficos, edafológicos y vegetación, que con diferentes pesos, en razón a su importancia relativa para el análisis realizado, permitiendo modelar cartográficamente las áreas susceptibles a riesgos de inundación, sequías, por ascenso del nivel medio del mar y afectaciones por incremento de temperatura. Se realizaron adecuaciones a la conceptualización y operacionalización de variables para los factores edafológico y vegetación con el propósito de ajustarlas a la clasificación de suelos utilizada en el país y a los tipos de vegetación presentes en el área. Los resultados específicos de cada cartografía, proporciona niveles de suficiencia para conocer la situación ambiental actual del territorio.

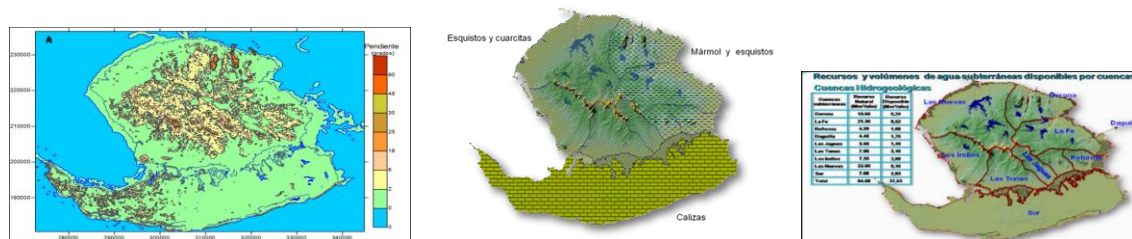


Fig. 2: Representación de mapas diagnósticos de algunos de los criterios utilizados, mapas de pendientes, geológico (IGP) y volúmenes de agua subterránea (INRH)

Paso 2: Identificación de impactos climáticos potenciales, sus riesgos y la cartografía asociada.

Las proyecciones de los cambios en el sistema climático, desarrollados para el AR6 (siglas en inglés del Sexto Informe de Evaluación del IPCC), simulan cambios basados en un nuevo conjunto de escenarios de forzamientos antropógenos: las trayectorias de concentración representativas (RCP, sigla en inglés). Estos escenarios de cambio climático son escenarios definidos por la secuencia temporal del forzamiento radiativo que experimentaría el sistema planetario hacia fines de siglo.

El forzamiento radiativo es el cambio en el flujo radiativo neto, descendente menos ascendente (expresado en vatios por metro cuadrado; $W m^{-2}$) en la tropopausa o parte superior de la atmósfera debido a un cambio en un factor externo del cambio climático. Dichos escenarios para el territorio de estudio, definen que los cambios proyectados para la precipitación tienen una alta incertidumbre y no evidencian una tendencia clara en el comportamiento de esta variable. En el trabajo de Planas et al. (2019) se afirma que las variaciones de la precipitación para los meses de julio y agosto parecen sugerir que, en el futuro, la sequía de medio verano se presentará con igual o mayor intensidad que en el período de referencia, acompañada de un fuerte calentamiento. Dichos cambios están referidos a futuros escenarios climáticos. Una vez representado el análisis espacial para el futuro, se evidencia que no se estiman cambios significativos en la estructura de la distribución espacial de las láminas de lluvia, con la excepción de lo proyectado para el año 2030, donde ocurre un desplazamiento de los máximos hacia el sureste.

En los meses del período poco lluvioso si se observan cambios estructurales en la distribución de la precipitación. Interesante resulta el análisis de la diferencia entre la distribución espacial de la precipitación para los escenarios estimados en Planas et al (2019) y la línea base. El escenario RCP 4.5 es el más desfavorable; porque predominan los déficits de lluvia significativos en toda la ínsula para todos los horizontes temporales considerados. Por ejemplo, la distribución del escurrimiento refleja, en gran medida, el patrón espacial de la precipitación, por la relación directa que existe entre esas dos variables.

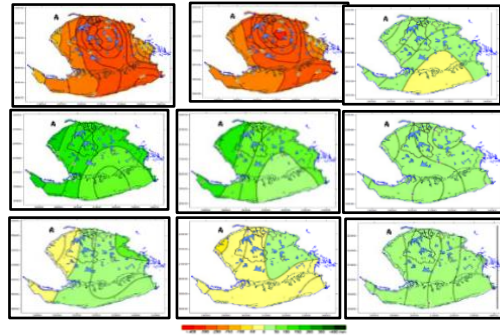


Fig. 3. Diferencias entre la distribución del escurrimiento (mm) estimada para los años 2030, 2050 y 2070 en los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, (Planas 2019).

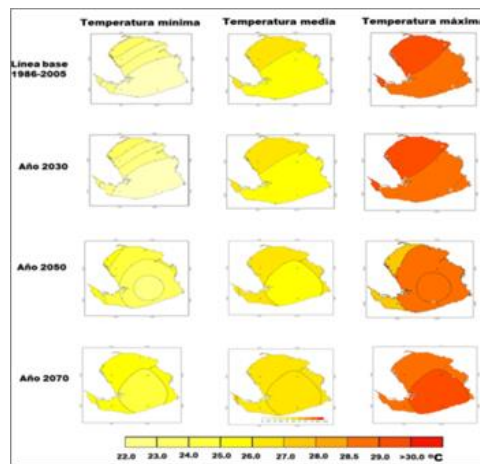


Fig. 4. Distribución espacial de la temperatura promedio anual mínima, media y máxima. Escenario RCP 8.5. (Planas 2019)

Paso 3: Determinar peligro(s) e impactos intermedios y su cartografía.

La evaluación depende de las condiciones intrínsecas de los principales peligros del medio físico actuales y futuros: ej., inundaciones, sequías, ascenso del nivel medio del mar, etc. Estos factores se definen por aspectos físicos, siendo los más relevantes los fisiográficos e hídricos.

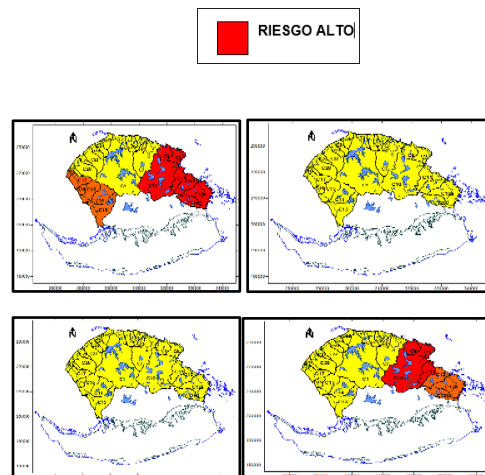


Fig. 5 Distribución espacial del pronóstico de comportamiento de los riesgos, por aumento de temperatura, variación de la precipitación, escurrimiento superficial y peligro total pronostico, por cuencas hidrográficas. Fuente Elaboración Propia.

Pasos 4, 5, 6 y 7. Determinar la vulnerabilidad y riesgos del sistema socio-ecológico y su cartografía.

En el análisis de estas cuencas, se realizó la determinación de indicadores de exposición, sensibilidad, capacidad de adaptación, para calcular las vulnerabilidades y riesgos del territorio, para un escenario climático específico.

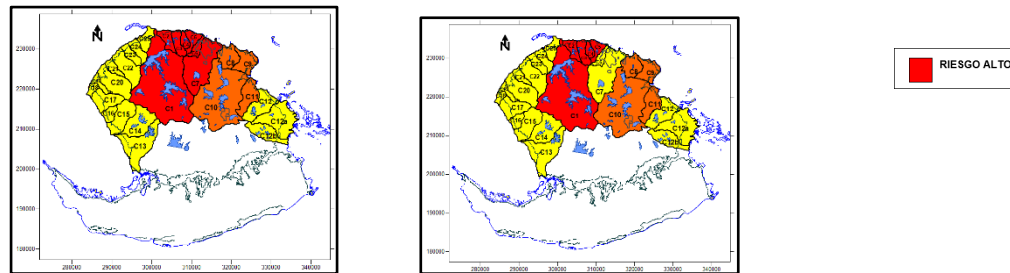


Fig.6 Mapas de sensibilidad y riesgos al cambio climático en el territorio por cuencas hidrográficas. Fuente Elaboración Propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En el modelo confeccionado y aplicado, se combinaron variables sociales, económicas y biofísicas para calcular un índice de vulnerabilidad y riesgos en un escenario climático específico, y fue representado espacialmente en el territorio de la Isla de la Juventud. Se obtuvo una alta capacidad para integrar datos geográficos, socioeconómicos y ambientales, permitiendo una gestión proactiva para reducir el impacto de los desastres. Sus principales contribuciones están asociadas a identificar zonas críticas de riesgo climático, mediante integración de datos geoespaciales, optimizando estrategias de adaptación en cuencas hidrográficas. Las limitaciones en el uso de estos modelos, está asociada al volumen y complejidad de los datos, las limitaciones técnicas de operación de los mismos, y el conocimiento especializado requerido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Calvo Rey Martin (2022) La información espacial aplicada en la gestión de riesgos de desastres naturales y antrópicos Revista Geográfica de Chile Número especial 1 Vol.58 63-77 ISSN 0719-9562. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM.

Planos Eduardo (2019) Sobre la adaptación al cambio climático Contribución del Proyecto Tercera Comunicación Nacional y Primer Reporte Bienal a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Proyecto GEF/PNUD.

Zerecero-Salazar, Brenda Carolina; Ibararán Viniegra, María Eugenia (2021) Modelo de indicadores de vulnerabilidad al cambio climático y su representación espacial en la región centro-Golfo de México Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático, 2015, vol. 1, núm. 1, Enero-Julio.