



Predicción de los cambios ambientales en el ecosistema del valle de Cuatro Ciénegas mediante la “KSIM”

Julio César Buendía-Espinoza¹ , Adolfo Antenor Exebio-García² , Elisa del Carmen Martínez-Ochoa^{3*}

(1) Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230.

(2) Posgrado en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Texcoco, Estado de México. CP. 56230.

(3) Centro de Bachillerato Tecnológico No. 3, Texcoco. Calle Del Recreo, San Diego, Texcoco, Estado de México. CP. 56200

*Autora de correspondencia: Elisa del Carmen Martínez Ochoa [elisacmo333@gmail.com]

> Recibido el 25 de agosto de 2021 - Aceptado el 16 de febrero de 2022

Como citar: Buendía-Espinoza, J.C., Exebio-García, A.A., Martínez-Ochoa, E. del C. 2022. Predicción de los cambios ambientales en el ecosistema del valle de Cuatro Ciénegas mediante la “KSIM”. *Ecosistemas* 31(2): 2293. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2293>

Predicción de los cambios ambientales en el ecosistema del valle de Cuatro Ciénegas mediante la “KSIM”

Resumen: El ecosistema desértico del valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México, con sus especies endémicas y humedales Ramsar (número 734) que evidencian su relevancia ecológica y justifican la importancia de su conservación, ha sido ambientalmente perjudicado por la explotación del agua superficial y subterránea para riego agrícola. Por lo cual, algunas de sus pozas han disminuido el nivel de agua, llegando a la desecación. Esta investigación tiene como objetivo simular los cambios ambientales generados por el proyecto de modernización de riego en el ecosistema de Cuatro Ciénegas, mediante la SIMulación K (KSIM) para predecirlos en los escenarios tendencial (sin proyecto) y contextual (con proyecto) por un período de 30 años. Las variables Aire, Flora y Fauna, Hidrología, Sociedad y Suelo fueron definidas por expertos que colaboraron en el proyecto, y sus valores iniciales asignados con base en su estado de conservación actual. Los resultados en el escenario tendencial muestran que la calidad ambiental de Suelo, Hidrología y Sociedad será afectada, en cambio Aire y Flora y Fauna permanecerán constantes. En el escenario contextual, la calidad ambiental de Hidrología, Sociedad y Flora y Fauna será beneficiada; por el contrario, la del Suelo y Aire será afectada de forma temporal en menor grado que la tendencia actual. Finalmente, la KSIM permitió establecer las diferencias entre escenarios de cambio, como estrategia para priorizar acciones y realizar gestiones de conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales de este valle donde las actividades humanas generan impacto ambiental.

Palabras clave: explotación de acuíferos; impacto ambiental; simulación de impacto cruzado; sitio Ramsar; toma de decisión

Environmental change predictions in Cuatro Ciénegas valley ecosystem using the “KSIM”

Abstract: The desert ecosystem of the Cuatro Cienegas Valley, Coahuila, Mexico, with its endemic species and Ramsar wetlands (number 734), which demonstrate its ecological relevance and justify the importance of its conservation, has been environmentally damaged by the exploitation of superficial and subterranean water for agricultural irrigation. For this reason, the water levels in some of its pools have decreased, even drying up. This research aims to simulate the environmental changes generated by the irrigation modernization project in the Cuatro Cienegas ecosystem, through K-SIMulation (KSIM), to predict them in a trend and contextual scenario by a 30-years period. The variables Air, Flora and Fauna, Hydrology, Society and Soil were defined by expert, who collaborated in the project, and their starting values were assigned based on their current conservation status. The KSIM results, in the trend scenario, show that the environmental quality of Soil, Hydrology and Society will be affected, while Air and Flora and Fauna will remain constant. In the contextual scenario, the environmental quality of Hydrology, Society and Flora and Fauna will benefit, while Soil and Air will be affected temporarily to a lesser degree than the current trend. Finally, the simulation shows the differences between conserving the current trends and changing them, helping in the prioritization of strategic actions to quantify and carry out actions oriented to the conservation and sustainable use of natural resources in the ecosystem of this valley.

Keywords: aquifer over-exploitation; environmental impact; cross-impact simulation; Ramsar site; decision making

Introducción

El ecosistema del valle de Cuatro Ciénegas, catalogado internacionalmente como sitio Ramsar con número 734 (RSIS 1995), pertenece a las Eco-regiones Prioritarias elaboradas por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) (Souza et al. 2012). Este ecosistema es considerado de interés científico dada su adaptabilidad de bioformas similares a las del planeta Marte (Vela-Coiffier et al. 2015; NASA 2020), y por ser un sitio con condiciones para estudiar la evolución temprana de la vida, en particular el Precámbrico tardío

(Souza et al. 2012). El ecosistema de Cuatro Ciénegas cuenta con una diversidad y un grado de endemismo similar a la de las Islas Galápagos. Éste ecosistema es de los más singulares del mundo por albergar 1240 especies registradas, 70 endémicas (Dinger et al. 2005; SEMARNAP 1999; Souza et al. 2006; 2012) y 89 protegidas por la Norma Oficial Mexicana, NOM-059-ECOL-2001. De estas 89 especies, 16 están en peligro de extinción, 39 amenazadas y 34 sujetas a protección especial (SEMARNAT 2005). Gran parte de su biodiversidad está asociada con una red compleja de manantiales geotérmicos, pozas y canales que presentan grandes variaciones

de temperatura y química del agua, por lo que, se clasifica como “en peligro o amenazada” por el gobierno mexicano y la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES) (McGaugh et al. 2006; Torres et al. 2012). El valle de Cuatro Ciénegas, que acoge a los estromatolitos o formaciones inusuales de carbonato y calcio precipitado por cianobacterias (Souza et al. 2006), fue declarado Área de Protección de Flora y Fauna Cuatro Ciénegas (APFFCC) en 1994, por su alto grado de endemismo y su fragilidad extrema (Vela-Coiffier et al. 2015).

Las amenazas identificadas sobre el APFFCC son la invasión de especies exóticas, el desarrollo industrial, el rápido crecimiento de turismo y demografía, pero principalmente, es la explotación de algunos de los más de 500 cuerpos de agua o pozas utilizadas como fuentes de abastecimiento para riego agrícola, dentro y fuera del área de protección (SERMANAP 2000). Entre los cuerpos de agua explotados se encuentran La Becerra, El Anteojo, Tío Julio, Los Mezquites, Escobedo, Tío Cándido, Las Teclas, Las Teclitas, La Vega y Agua Chiquita, drenados mediante un sistema de canales trapeziales (161.84 km, 54% no revestidos) que tiene una eficiencia promedio de conducción de agua del 67%. Esto significa que de los 100 662 912 m³ de agua extraída anualmente llegan únicamente 67 802 400 m³ a las unidades de riego, cuya distribución se realiza por el método de tandeo, que consiste en repartirla de manera programada entre cada usuario de la unidad, rotando su uso por turnos. Ante este panorama, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) propuso un proyecto de modernización del riego en 2009, para conservar los niveles de agua y la biodiversidad de pozas y humedales. Este proyecto incluyó mejorar la eficiencia de la red de distribución del agua, de 60% a 95%, entubando la red de canales principales, para dejar de extraer 29 267 068 m³ de agua por año y mejorar la eficiencia en la aplicación en parcela, de 53% a 75%, por la tecnificación de riego parcelario (antes riego por gravedad) para dejar de extraer en suma 30 619 785 m³ de agua (CONAGUA 2009). Por tanto, este estudio considera simular el impacto biótico, abiótico y social que genera la extracción de agua para riego, en dos escenarios: i) sin implementar y ii) implementando el proyecto de modernización, de tal modo que sea posible establecer el impacto de este proyecto en el entorno natural y plantear posibles estrategias de conservación en los elementos afectados (Aire, Flora y Fauna, Hidrología, Suelo y Sociedad).

La evaluación de las condiciones ecológicas y la gestión utilizando el conocimiento humano, como medio de convertir datos cualitativos en cuantitativos, aunado al uso de técnicas de predicción de impacto ambiental, posibilitan generar estrategias de conservación (Ordoñez-Díaz y Rueda-Quinónez 2017; Erfani et al. 2020). Entre estas técnicas está la SiMulación K que permite trabajar con datos de cualquier nivel, desde estimaciones subjetivas hasta mediciones físicas, para generar hipótesis de probabilidades de escenarios en la modelización social, económica, tecnológica y ecológica (Kane 1972). La KSIM fue desarrollada por Julius Kane en 1972 como método de enfoque evento a evento basado en el análisis de impacto cruzado y definiendo los valores de las variables como probabilidad, ya que determina las propiedades de un sistema mediante relaciones causales supuestas o conocidas entre sus variables, proyectándolas en series temporales de sus interacciones (Erfani et al. 2020). En México, esta técnica se ha utilizado en estudios de vulnerabilidad como el de Bojórquez y Ortega (1989) para determinar elementos ecológicos sensibles al construir minas a cielo abierto en Quintana Roo, y el de Torruco et al. (2013) para establecer el ordenamiento ecológico de los corredores turísticos “Cancún-Tulum” y “Costa Maya”, Quinta Roo.

Por consiguiente, el presente trabajo tiene como objetivo simular y predecir cambios ambientales, generados por el proyecto de modernización del riego en el valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, mediante la KSIM, y analizar eventos relevantes e impactos entre sí, con dos escenarios: Tendencial y Contextual, para un período de 30 años. Las variables analizadas en este estudio fueron: Aire, Flora y Fauna, Hidrología, Sociedad y Suelo, por mostrar sensibilidad ante la extracción de agua de las pozas para riego.

Materiales Y Métodos

Localización geográfica

El estudio se realizó en 777 972.77 ha del área del Sistema Ambiental Regional (SAR), ubicadas en los municipios de Cuatro Ciénegas, Lamadrid, Nadadores, San Buenaventura, Frontera y Sacramento, localizados en el valle de Cuatro Ciénegas, estado de Coahuila, México. Las coordenadas tienen un rango de 26°45'00" a 27°00'00" N y 101°48'49" a 102°17'53" O. El área del proyecto de modernización y el área de su influencia fue de 180.04 ha y 1 782.44 ha. El clima predominante es muy seco semicálido, con temperatura media anual de 15°C a 28°C, máxima de 35°C en junio y mínima 8°C en enero. La precipitación y evaporación media anual son 294 mm y 2038 mm (CONAGUA 2009).

Simulación K

Se realizó la matriz de impacto cruzado para simular las relaciones e interacciones entre eventos y entidades para hacer predicciones del estado de un sistema en el futuro. Su identificación es un factor esencial para el éxito del análisis de impacto cruzado. Estas entidades son responsables de las interacciones y se representan por sus variables. La intensidad de estas interacciones determinó el valor de cada variable (Mani et al. 2005).

La KSIM calculó los impactos positivos y negativos de una variable en otras variables dadas, lo que puede causar una tendencia creciente o decreciente en su estado (Mani et al. 2005). Esta simulación se basó en estas suposiciones: i) Las variables del sistema se limitan entre 0 y 1, ii) Las variables aumentan o disminuyen en función del impacto neto de las otras variables y, es positivo o negativo acorde con los datos de la matriz de impacto cruzado, iii) La respuesta de una variable a un impacto dado disminuye a cero cuando esa variable se aproxima a su límite superior o inferior. En general, el crecimiento limitado y los procesos de decaimiento exhiben un carácter sigmoidal, y iv) En igualdad de condiciones, una variable produce un mayor impacto en el sistema a medida que crece.

El algoritmo consistió en:

- 1) Transformar los valores iniciales de las variables a una escala de medición de 0 a 1;
- 2) Desarrollar una matriz de interacciones o matriz α . En las columnas están las variables causantes de impactos (X_j) y en las filas las receptoras de impactos (X_i);
- 3) Escribir los coeficientes de interacción en los elementos de la matriz α (α_{ij}) para representar el efecto de X_j sobre X_i ; sus valores pueden ser negativos, positivos o neutros. Así cada variable:

$$0 < X_{i(t)} < 1 \quad (\text{ec. 1})$$

para $i = 1, 2, \dots, n$ y $t \geq 0$.

- 4) Determinar el cambio en el estado de la variable X_i del período de tiempo t al período de tiempo $t+\Delta t$ mediante:

$$X_{i(t+\Delta t)} = X_{i(t)}^{P_i} \quad (\text{ec. 2})$$

El exponente P_i a un tiempo dado se determina por:

$$P_{i(t)} = \frac{1 + \frac{\Delta t}{2} \sum_{j=1}^n (|\alpha_{ij}| - \alpha_{ij}) X_j}{1 + \frac{\Delta t}{2} \sum_{j=1}^n (|\alpha_{ij}| + \alpha_{ij}) X_j} = \frac{1 + \frac{\Delta t}{2} |\text{Suma de impactos negativos en } X_i|}{1 + \frac{\Delta t}{2} |\text{Suma de impactos positivos en } X_i|} \quad (\text{ec. 3})$$

donde α_{ij} son elementos de la matriz α , dado el impacto de X_j sobre X_i , y t es período de tiempo de una interacción.

La ecuación (3) garantiza que $P_{i(t)} > 0$ para $i = 1, 2, \dots, n$ y $t \geq 0$. Por tanto, la transformación (ec. 2) mapea el intervalo abierto (0, 1) sobre sí mismo, preservando la acotación de las variables de estado (condición 1 anterior). Si los impactos negativos son mayores que los positivos $P_i > 1$, X decrece, y si los impactos negativos son menores que los positivos $P_i < 1$, X aumenta. Cuando los impactos negativos y positivos son iguales $P_i = 1$, X permanece constante (Kane 1972).

Definición de variables y asignación de valores iniciales

Entre los eventos que son impactados se identifican los bióticos, abióticos y antropológicos (Ordoñez-Díaz y Rueda-Quirón 2017). La definición de sus variables se realizó mediante una interacción lógica causa-efecto entre factores ambientales y socioeconómicos, dando como resultado la selección de tres abióticos (Aire, Hidrología y Suelo), uno biótico (Flora y Fauna) y uno antropológico (Sociedad). Sus valores iniciales se calcularon de acuerdo con su estado actual de conservación ambiental dentro del SAR, siendo definidos por cinco expertos que colaboraron en el proyecto de CONAGUA (2009) y que fueron elegidos por su conocimiento acerca del impacto de actividades humanas (uso y manejo del agua para la agricultura y manejo de las especies del ecosistema) en Cuatro Ciénegas (Fortin et al. 2016). Como requisito adicional, los expertos debían conocer las condiciones ecológicas y socioeconómicas del área de estudio.

Aire: Su valor inicial se asignó con base en la capacidad de dispersión y disolución de los vientos. En general, las fuentes de contaminación son pocas, a pesar de que el SAR se encuentra en un valle. No existen emisiones de consideración por la capacidad de dispersión y disolución de los vientos, generada por su alta velocidad y dirección (15 km/h al noroeste) (CONAGUA 2009). La presencia de los desechos sólidos llevados al basurero municipal a cielo abierto, ubicado dentro del APFFCC, es un impacto directo al ecosistema, provocando contaminación de los mantos freáticos subterráneos y al sistema de pozas por lixiviado y por la quema de plásticos (SEMARNAP 1999; Delgado 2007; Vela-Coiffier et al. 2015). La leña de mezquite para la elaboración de carbón también afecta la calidad del aire y la integridad prístina de los ecosistemas (Vela-Coiffier et al. 2015).

Suelo: Su magnitud se determinó con base en su degradación. En el valle de Cuatro Ciénegas, los suelos se agrupan principalmente en tres tipos: salinos, sódicos salinos y sódicos no salinos, siendo una fuerte limitante para el establecimiento de la agricultura (Delgado 2007); sin embargo, permiten el desarrollo de matorrales y especies vegetales adaptadas (SEMARNAP 1999). Los suelos son cultivados de manera intensiva para producir principalmente alfalfa, durante 6 años, con riego por inundación y aplicación de fertilizantes; y posteriormente por otros forrajes como sorgo y maíz o por cultivos de consumo humano como uva y nuez (Vela-Coiffier et al. 2015; Ortiz y Romo 2016). Lo cual provoca su degradación por la disminución de su productividad debido a la pérdida de fertilidad y el aumento de la salinidad (Sanderman 2012), generando posteriormente su abandono por los agricultores al no poder revertir esta situación y no generar ingresos económicos (Delgado 2007). El 30% del SAR fue degradado por las actividades agrícolas y urbanas (CONAGUA 2009). De 1990 al 2015, la tasa de cambio del uso de Suelo registró la mayor degradación del bosque espinoso (14.5%) por apertura de áreas agrícolas y aprovechamiento de mezquite (*Prosopis spp.*), árbol perenne con amplia distribución geográfica y ecológica en zonas áridas mexicanas (Rodríguez et al. 2014); mientras que las áreas urbanas registraron su mayor expansión (27.25%), incrementando la extracción de agua subterránea para uso poblacional (Leal et al. 2019). Aunque la tasa de cambio del uso agrícola fue muy baja (0.02%) entre 1993 y 2002, la pérdida de la superficie de las pozas fue del 78% (Figuroa et al. 2011; Torres et al. 2012).

Flora y Fauna: Su magnitud se estableció con base en el estado natural de conservación actual. El APFFCC con superficie de 84 347 ha está integrada por ejidos, propiedad particular y propiedad nacional. Aquí se constituye un nicho ecológico único, al poseer una gran diversidad biológica (Dinger et al. 2005; Figuroa et al. 2011; Ortiz y Romo 2016) con el mayor número de endemismo en Norte América (>30). Muchas de sus especies muestran evolución divergente del orden de millones de años, basada en datos morfológicos y moleculares (Vela-Coiffier et al. 2015). Además, destaca la presencia de estromatolitos, microorganismos característicos de la vida temprana en la Tierra (Souza et al. 2006). Sin embargo, algunas actividades que se practican en el valle han ge-

nerado daños a la Flora y Fauna; por citar, el turismo no controlado en pozas y lagunas ha provocado daños a los ecosistemas acuáticos más grandes de la cuenca que posiblemente estén en inicios del proceso de eutroficación (Vela-Coiffier et al. 2015; García y López 2017). La introducción y dispersión de especies invasoras agresivas como *Arundo donax* (carrizo gigante) desplazan especies nativas y colonizan nuevos ambientes, compiten por el recurso hídrico con otras especies, modifican el hábitat acuático original, crean exceso de materia orgánica en el sistema endorreico, e impiden a la fauna terrestre abreviar a orillas de las pozas (Dinger et al. 2005; McGaugh et al. 2006). La extracción de agua subterránea y superficial principalmente para uso agrícola, uso urbano e industrial provoca la disminución de las áreas inundadas y de los niveles de agua en varias pozas, afectando su ecosistema y las especies nativas (Figuroa et al. 2011; Torres et al. 2012; CONAGUA 2020).

Hidrología: Su valor inicial se determinó considerando el estado de conservación histórico del sistema hidrológico superficial y subterráneo natural. Este sistema forma parte de la región hidrológica Bravo-Conchos y pertenece al acuífero de Cuatro Ciénegas (SEMARNAP 1999). Dentro de esta cuenca intermontaña, una red de aguas subterráneas ha producido la actual variedad de hábitats acuáticos que sostienen la diversidad de especies endémicas. Existen alrededor de 500 pozas que varían entre 90 y 460 m de diámetro y que brotan de manantiales, ubicados mayormente en las faldas de la sierra de San Marcos y Pinos, e intercomunicadas por sistemas de drenaje naturales o artificiales (CONAGUA 2009, 2020). También existen ciénegas, pantanos, ríos como el Mezquites, y lagunas como Playitas y Churince (Dinger et al. 2005). En las cartas topográficas de 1964, la superficie de algunos de estos cuerpos de agua todavía era posible distinguirla, pero algunas de éstas fueron drenadas artificialmente mediante canales de riego en 1987, modificando el patrón de inundación del valle y el régimen de recarga y descarga natural del acuífero, lo que provocó desecación de lagos, la desaparición de humedales y el abatimiento de los niveles freáticos (Delgado 2007). De acuerdo con CONAGUA (2009), 101 Mm³/año se extraen aproximadamente de las pozas para riego agrícola dentro y fuera del APFFCC, provocando que la cobertura de los humedales disminuyera 10.5% entre 1990 y 2015, con una pérdida anual de 0.42% en superficie (Leal et al. 2019). Los humedales cercanos a zonas agrícolas y cuyos recursos hídricos se utilizan para la agricultura son los que han tenido un mayor impacto (García y López 2017). Existe también sobreexplotación de agua subterránea, por lo que, en 2013 se impuso una veda al acuífero de Cuatro Ciénegas (SEGOB 2013).

Sociedad: Su magnitud inicial se sustentó en la actividad productiva de la población dentro del SAR. Los habitantes son los actores principales del mapa social del APFFCC. La población que habita los 11 ejidos y la cabecera municipal suman un total de 16 297 habitantes. De acuerdo con el programa de manejo del APFFCC, el 41% de su superficie es ocupada por los 11 ejidos y el resto por pequeños propietarios (SERMANAP 2000), ambos asociados con la actividad agrícola que constituye 40.32% de la población económicamente activa (Ortiz y Romo 2016; CONAGUA 2020). La mayor parte de la población (70% de la mano de obra) se dedica a la manufactura y la agricultura; de ésta última los cultivos forrajes ocupan el 80% de la superficie cultivada bajo riego (CONAGUA 2020). La producción de ganado vacuno, equino y caprino constituye la mayor parte de las actividades ganaderas, lo que provoca un problema latente de sobrepastoreo que supera la capacidad de carga de los pastos entre un 10% y un 40% (Vela-Coiffier et al. 2015). Otras actividades productivas importantes son las maquiladoras, empresas yeseras, servicios turísticos y sobreexplotación de mezquite y candelilla (Delgado 2007). El mezquite se aprovecha como leña o carbón para la cocción de alimentos, pero requiere grandes cantidades de agua y tiempo para alcanzar su adultez, y al no regenerarse podría terminarse en unas décadas. La candelilla (*Euphorbia antisiphilitica* Zucc) es un arbusto perenne, con tallos cilíndricos, densamente compactos, erectos, recubiertos de cera, con apariencia de pequeñas velas, sin hojas y en temporada de lluvias se llena de flores pequeñas (Rojas et al.

2011) que se emplea para la extracción de cera (Vela-Coiffier et al. 2015). El turismo es otra actividad económica que hace uso de las pozas y manantiales como espacios recreativos, pero su infraestructura es inadecuada, está en mal estado y no se controla adecuadamente a los turistas, lo que provoca perturbaciones en los ecosistemas acuáticos (Ortiz y Romo 2016; García y López 2017).

Construcción de escenarios

En este estudio, se incluyeron en el análisis de impacto cruzado y la predicción de tendencias las variables que influyen en los cambios ambientales generados por el proyecto de modernización del riego en el SAR.

En la fase de pronóstico, se construyeron y contrastaron dos escenarios para explorar las condiciones actuales del SAR: 1) Tendencial: se realizó bajo las proyecciones actuales de crecimiento, calculadas mediante el análisis histórico de variables para explorar si los conflictos ambientales pueden agravarse o no, según se tomen medidas preventivas o correctivas, y 2) Contextual: se realizó considerando el efecto de implementar el proyecto de modernización del riego sobre las variables analizadas, con el propósito de modificar su aptitud territorial. Para la realización de esta etapa, se utilizó una hoja de cálculo de Excel y se hicieron proyecciones del 2010 al 2040.

Escala de medición y matriz de impacto cruzado

La escala de medición utilizada para estimar las interrelaciones entre las cinco variables definió dos valores positivos (+1, +2), dos negativos (-1, -2) y un valor cero de no interacción. Relaciones positivas causan el incremento de otras variables y sus intensidades se consideran benéficas relevantes (valor +2) o benéficas considerables (valor +1). Relaciones negativas generan disminución de otras variables y sus intensidades se consideran adversas relevantes (valor -2) o adversas considerables (valor -1). Utilizando esta escala, se pudo construir la matriz α de impactos cruzados de las variables de los escenarios tendenciales y contextuales de la Tabla 1 y 2. Como parte de las variables de interacción que representan el efecto de cambio de X_j sobre X_i , se añadió una variable denomi-

nada intervención del proyecto que vincula las acciones del mundo exterior. Los cinco expertos dieron su opinión sobre la relación entre las variables, asignando valores entre -2 a 2 a cada elemento de la matriz. En el análisis se utilizó la moda de los valores asignados por los expertos.

En la Tabla 1, por ejemplo, la celda correspondiente al renglón 4 y columna 5 de la matriz α tendencial indica que cambios en la Hidrología afectan negativamente a la Sociedad con intensidad adversa relevante ($\alpha_{45} = -2$), y la celda del renglón 4 y columna 2 indica que la Hidrología afecta positivamente al Suelo con intensidad adversa considerable ($\alpha_{42} = 1$).

Intervalo de Confianza

Se utilizó el Método de Percentiles Estándar para construir el Intervalo de Confianza basado en percentiles de la función de distribución empírica. Supone que el estimador bootstrap H^* tiene una distribución aproximadamente normal con media H y desviación estándar σ_H ; por tanto, hay $(1-\alpha)$ probabilidad de que:

$$(H + z_{\alpha/2}\sigma_H < H^* < H + z_{(1-\alpha/2)}\sigma_H)$$

para cualquier muestra aleatoria utilizada en calcular H^* (Efron y Tibshirani 1993). El intervalo de confianza es entonces:

$$(\bar{H}^* + z_{\alpha/2}\sigma_H^* < H < \bar{H}^* + z_{(1-\alpha/2)}\sigma_H^*)$$

donde \bar{H}^* es la media estimada del parámetro bootstrap y σ_H^{*2} su varianza.

$$\bar{H}^* = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^B H_j^* \quad y \quad \sigma_H^{*2} = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^B (H_j^* - \bar{H}^*)^2$$

siendo B el número de muestras bootstrap. La cobertura del intervalo bootstrap se realizó con 0.95 de probabilidad nominal y 1000 repeticiones (Efron y Tibshirani 1993). Ver intervalos de confianza para la media en la Tabla 1 y 2.

Tabla 1. Matriz de impacto cruzado tendencial (valores mostrados como media, desviación estándar, límite superior, límite inferior de opiniones).

Table 1. Trend cross-impact matrix (values shown as mean, standard deviation, upper limit, lower limit of opinions).

X_i	X_j	Aire				Suelo				Flora y Fauna			
	Valor Inicial	media	sd	L. inf	L. sup	media	sd	L. inf	L. sup	media	sd	L. inf	L. sup
Aire	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.00	0.71	-1.80	-0.60	1.20	0.45	1.00	1.40
Suelo	0.70	-1.40	0.55	-2.00	-1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.20	0.45	-1.80	-1.00
Flora y Fauna	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.71	0.20	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00
Hidrología	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	0.45	1.00	1.40	-1.40	0.55	-2.00	-1.20
Sociedad	0.50	1.40	0.55	1.00	1.60	1.40	0.55	1.00	1.60	-1.40	0.55	-2.00	-1.20

X_i	X_j	Hidrología				Sociedad				Intervención			
	Valor Inicial	media	sd	L. inf	L. sup	media	sd	L. inf	L. sup	media	sd	L. inf	L. sup
Aire	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.20	0.45	-1.80	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Suelo	0.70	-1.40	0.55	-2.00	-1.20	-1.00	0.71	-1.60	-0.60	0.00	0.00	0.00	0.00
Flora y Fauna	0.85	1.00	0.71	0.20	1.40	-1.60	0.55	-2.00	-1.40	0.00	0.00	0.00	0.00
Hidrología	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.80	0.45	-2.00	-1.60	0.00	0.00	0.00	0.00
Sociedad	0.50	-1.20	0.45	-1.80	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Donde: Sd: Desviación estándar, L. inf=Límite inferior, L. sup=Límite superior.

Tabla 2. Matriz de impacto cruzado contextual (valores mostrados como media, desviación estándar, límite superior, límite inferior de opiniones).**Table 2.** Contextual cross-impact matrix (values shown as mean, standard deviation, upper limit, lower limit of opinions).

X_i	X_j	Aire				Suelo				Flora y Fauna			
	Valor Inicial	media	sd	L. inf	L. sup	media	sd	L. inf	L. sup	media	sd	L. inf	L. sup
Aire	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.00	0.71	-1.80	-0.60	1.00	0.71	0.20	1.40
Suelo	0.70	-1.20	0.45	-1.80	-1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.00	0.71	-1.80	-0.60
Flora y Fauna	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.71	0.20	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00
Hidrología	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	0.84	0.20	1.60	-1.20	0.45	-2.00	-1.00
Sociedad	0.50	1.20	0.45	1.00	1.40	1.20	0.45	1.00	1.40	1.20	0.45	1.00	1.40

X_i	X_j	Hidrología				Sociedad				Intervención			
	Valor Inicial	media	sd	L. inf	L. sup	media	sd	L. inf	L. sup	media	sd	L. inf	L. sup
Aire	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.00	0.71	-1.80	-0.60	0.00	0.00	0.00	0.00
Suelo	0.70	-1.00	0.71	-1.80	-0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	1.80	0.45	1.20	1.80
Flora y Fauna	0.85	1.00	0.71	0.19	1.40	-1.00	0.71	-1.00	-0.80	1.80	0.45	1.20	2.00
Hidrología	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	-1.20	0.45	-1.80	-1.20	1.80	0.45	1.20	1.80
Sociedad	0.50	1.80	0.45	1.20	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.71	0.25	1.40

Donde: Sd: Desviación estándar, L. inf=Límite inferior, L. sup=Límite superior.

Resultados y Discusión

Después de establecer las matrices α tendencial y contextual, el modelo de simulación se aplicó iterativamente con las ecuaciones (1) y (2) para determinar los cambios de las variables, usando 300 ciclos de simulación que equivalen a 30 años con un factor de escalamiento $\Delta t = 0.1$, para garantizar la convergencia de cada variable dentro del tiempo de simulación.

Con los datos de las matrices α , los impactos ambientales netos de cada una de las variables del sistema fueron estimados para el período de tiempo $t+\Delta t$. En este párrafo se mostrará el resultado del cálculo de la variable Hidrología, en el escenario tendencial y en el tiempo $t+\Delta t=0.02$.

La suma de sus impactos negativos es $1 + \left(\frac{0.02}{2} \cdot 1.2\right) = 1.012$ y la de impactos positivos es $1 + \left(\frac{0.02}{2} \cdot 0.85\right) = 1.085$, por tanto el impacto neto de acuerdo con las ecuaciones (2) y (3), para un intervalo de tiempo $\Delta t = 0.02$, es igual a:

$$P_{\text{Hidrología}(t=0)} = \frac{1 + \frac{0.01}{2} \sum_{j=1}^{n=5} [(|0| - 0) \cdot 0.85 + \dots + (|0| - 0) \cdot 1]}{1 + \frac{0.01}{2} \sum_{j=1}^{n=5} [(|0| + 0) \cdot 0.85 + \dots + (|0| + 0) \cdot 1]} = \frac{1.012}{1.085} = 1.0035$$

$$X_{\text{hidrología}(0+\Delta t=0.02)} = 0.85^{1.0035}_{(t=0)} = 0.8495$$

En las Figuras 1 y 2 se muestran los resultados de los cálculos de los impactos de las variables restantes para el escenario tendencial y contextual a través de los valores del Factor de Calidad Ambiental (CFA), que se discutirá en los siguientes párrafos.

Análisis del escenario tendencial

En este escenario (Fig. 1), los resultados muestran que la degradación del Suelo tiende aumentar (la CFA pasa de 0.70 a 0 en aproximadamente 10 años) mientras que continúe el manejo intensivo de superficies agrícolas con cultivos perenes con altas demandas nutricionales y de agua (como el cultivo de alfalfa), el mal manejo del agua de riego y las prácticas agrícolas deficientes, los cuales conducen a una disminución de la calidad de Suelo por el in-

cremento de la salinidad, y por tanto, la pérdida de fertilidad y el consecuente abandono de los terrenos de cultivo (Delgado 2007; Sanderman 2012). El estado de conservación del sistema hidrológico o Hidrología se prevé pase de 0.70 a 0 en un período de 20 años como resultado del ineficaz manejo del agua para riego ya que incrementará la extracción de agua superficial y subterránea; potenciando el proceso de abatimiento tanto de niveles freáticos como de pozas y humedales (Delgado 2007; García y López 2017) y la reducción de superficies de agua, al grado su posible desecación (Leal et al. 2019). Como resultado de la interacción negativa entre las variables Suelo e Hidrología (Tabla 1, renglón 4 y 5, columna 3), la Flora y Fauna de los ecosistemas acuáticos presenta una intensidad adversa relevante, por lo que su calidad ambiental se vería afectada negativamente, llegando incluso a su extinción local (Torres et al. 2012; Ortiz y Romo 2016) en un período de 30 años (CFA de 0.85 a 0.30). Un ejemplo de esto es el proceso de desecación de la laguna de Churince entre 2006 y 2009, en el que perdió el 99% de su superficie de agua (Ortiz y Romo 2016), destruyendo humedales, así como, de su Flora y Fauna (Ortiz y Romo 2016).

En cuanto a la Sociedad, la Figura 1 muestra una reducción de la CFA durante los primeros 15 años y un incremento (de 0.50 a 0.59) en la proyección a 30 años sin proyecto de modernización del riego. Esta tendencia refleja el impacto negativo ante los cambios de las otras cuatro variables (Tabla 1), así como la capacidad de la población para adaptarse a otras alternativas económicas. La variable Hidrología tiene una relación negativa significativa con Sociedad ($\alpha_{45} = -2$) debido a que el 80% de la actividad económica agrícola depende del riego para la producción de forraje y el 20% para la ganadería (CONAGUA 2020), actividades impactadas por la pérdida de fertilidad (Raiesi 2012) y salinización (Sanderman 2012; Ammari et al. 2013) del suelo, la desecación de cuerpos de aguas superficiales (Leal et al. 2019), la veda de aguas subterráneas (SEGOB 2013) y el incremento en la capacidad de carga de los agostaderos (Vela-Coiffier et al. 2015). Los servicios turísticos como la agricultura también tendrán un impacto económico negativo en la Sociedad por la desecación de las pozas y manantiales ya que éstas son utilizadas como espacios recreativos (Torres et al. 2012; Ortiz y Romo 2016).

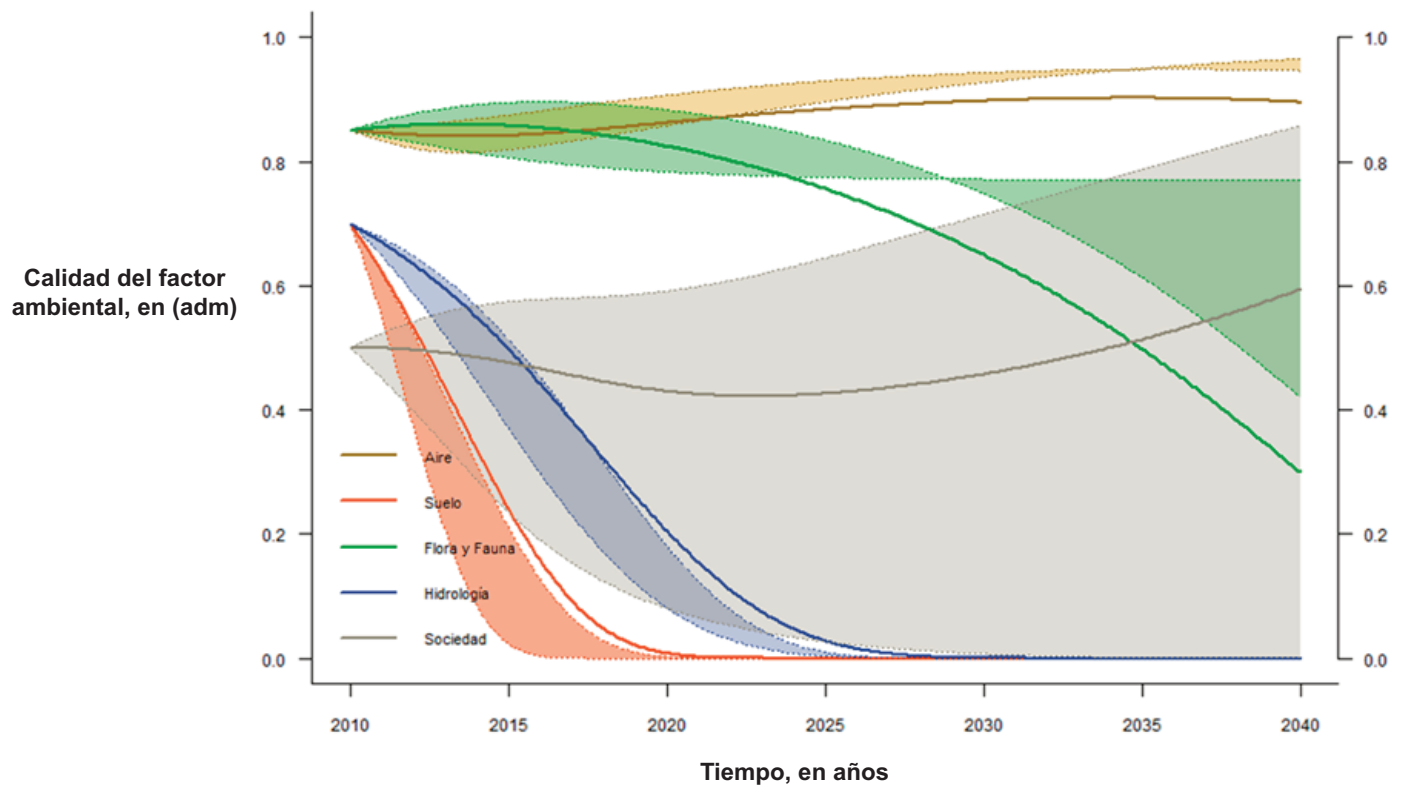


Figura 1. Análisis de la calidad ambiental de los diferentes factores en el escenario tendencial.

Figure 1. Analysis of the environmental quality of the different factors in the trend scenario.

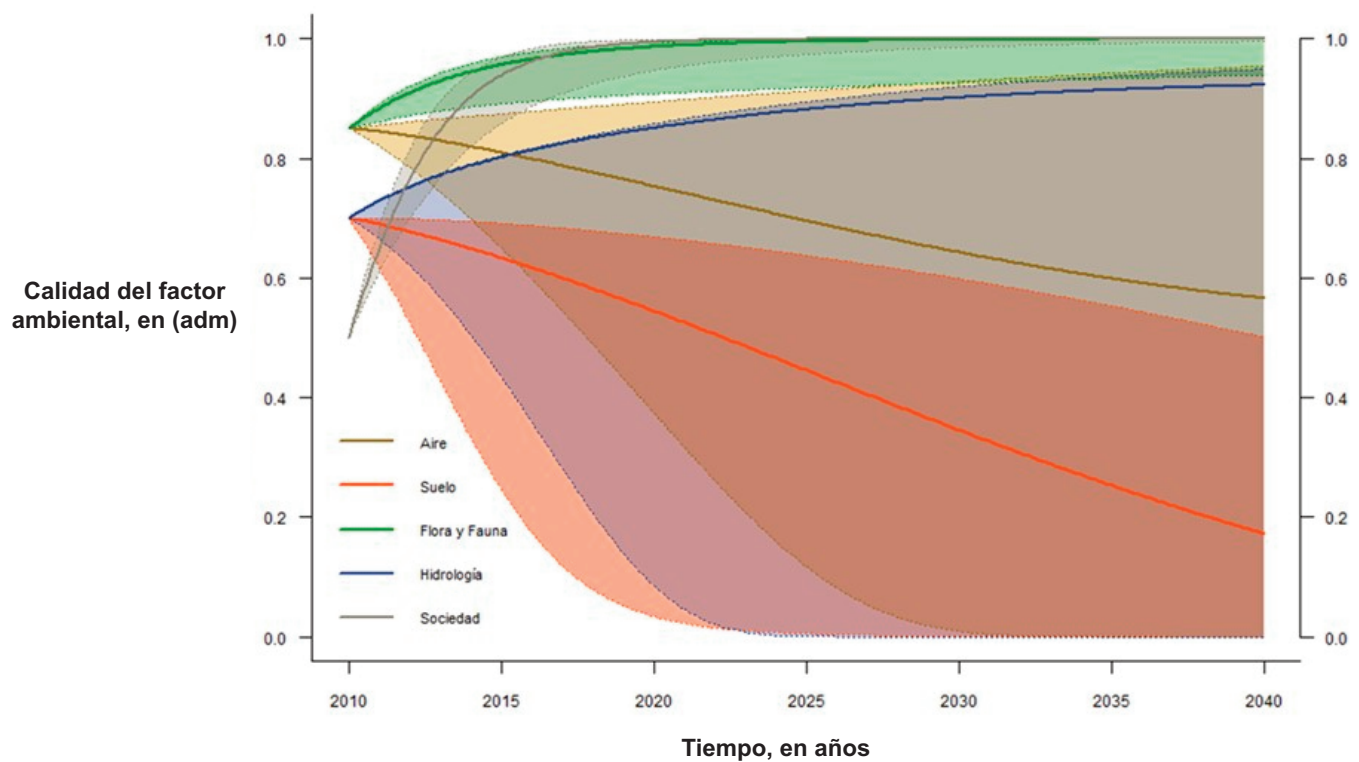


Figura 2. Análisis de la calidad ambiental de los diferentes factores en el escenario contextual.

Figure 2. Analysis of the environmental quality of the different factors in the contextual scenario.

El Suelo, la Hidrología y la Sociedad muestran una relación negativa de intensidad adversa relevante para la Flora y la Fauna, como se muestra en la **Tabla 1** ($\alpha_{23}, \alpha_{43}, \alpha_{53} = -1$) y la **Figura 1**, que será el resultado del aumento de la explotación del mezquite y la candelilla por parte de los ejidatarios (Delgado 2007). Esta sobre-explotación dañará tanto a la biodiversidad de la región (Figueroa 2011) como a las 70 especies catalogadas como endémicas y a las 89 protegidas (NOM-059-ECOL-2001), al aumentar la degradación del bosque espinoso y al exponer más áreas para actividades agrícolas (Leal et al. 2019). La **Figura 1** muestra que la CFA de la Flora y Fauna se verá afectada de manera negativa por el Suelo y la Hidrología, alcanzado un valor de 0.33 para el 2040, siendo las especies más afectadas los estromatolitos que evolucionaron bajo las condiciones originales del valle (Souza et al. 2006); sin embargo, la mayoría de las especies introducidas como el *A. donnax* o carrizo gigante podrían adaptarse o hacer frente al cambio (McGaugh et al. 2006). Finalmente, el Aire no se verá afectado más allá del deterioro natural del ambiente, por la presencia de fuentes móviles de emisiones de contaminantes y de las zonas urbanas.

Análisis del escenario contextual

La **Figura 2** muestra que la tendencia de degradación de Suelo será menor y tendrá un deterioro progresivo natural. Comparando los dos escenarios se tiene que la CFA del suelo llega a cero a los diez años en el escenario sin el proyecto mientras que llega a 0.17 a los treinta años con el proyecto, ya que su implementación tendrá un impacto positivo de intensidad benéfico relevante (**Tabla 2**, $\alpha_{42} = 1$) en la desaceleración de la salinización y la pérdida de productividad (Sanderman 2012) si se mejora el manejo del suelo y se adoptan buenas prácticas agrícolas en el manejo del agua, en la aplicación de cantidades adecuadas de fertilizantes y láminas de lavado. La **Figura 2** muestra cómo el proyecto mejorará la calidad ambiental de la Hidrología al reducir la extracción de agua de las pozas en un 29%, resultando en un valor de 0.92 después de 30 años, versus 0, alcanzado después de 15 años sin el proyecto. Esto significa que cada año dejarán de extraerse 29 267 068 m³ y se recuperarán 30 619 785 m³ más por la mejora de la red de distribución entubada y del sistema de riego a nivel parcelario (CONAGUA 2009). De igual forma, cuando los niveles de agua de las pozas se estabilicen y derramen naturalmente, los humedales se regenerarán y preservarán las zonas inundables y en algunos casos, se recuperarán zonas esenciales para la preservación del ecosistema (Leal et al. 2019; Torres et al. 2012) mejorando la calidad ambiental de la variable Flora y Fauna (Pasando de un valor de 0.3 en el escenario tendencial a 1.0 en el contextual, para 30 años —**Tabla 1** y **2**—). El entubamiento de los drenes artificiales y canales para riego también mejorarán la calidad ambiental del sistema hidrológico, así como la Flora y Fauna de estas áreas, al permitir que se produzca nuevamente un cambio en las poblaciones ecológicas y al reducir la proliferación de especie exóticas en ellos como el *Arundo donnax* (**Tabla 2**, $\alpha_{34} = 1$). Esta especie introducida es una especie agresiva de gran consumo de agua y crecimiento rápido que altera el sistema hídrico, el ciclo de nutrientes, azolva cauces de agua y acelera los ciclos de incendio, provocando el reemplazo de la flora nativa (McGaugh et al. 2006).

La variable Sociedad se beneficiará del fortalecimiento de la agricultura, que es la principal actividad de la región y tendrá un impacto positivo por la derrama económica del turismo a través de la protección de los ecosistemas terrestres y acuáticos (Ortiz y Romo 2016) debido al aumento de la productividad del agua y del suelo (los valores de la matriz de impacto se reducen una unidad entre la **Tabla 1** y la **Tabla 2**) generada por la implementación del proyecto. Comparando las **Tablas 1** y **2**, la calidad del factor ambiental Aire muestra cambios opuestos en las interacciones con y sin proyectos. La calidad del Aire en el escenario contextual (**Fig. 2**) disminuyó de 0.90 a 0.57 por la presencia de fuentes fijas de emisión de contaminantes, así como al posible crecimiento urbano debido a la estabilización ambiental del valle y la estabilización de la producción agrícola.

Los valores estimados de las réplicas bootstrap de las variables Aire, Suelo, Flora y Fauna, Hidrología y Sociedad permitieron obtener de manera directa su intervalo de confianza para los escenarios de predicción analizados (tendencia y contextual). En las **Tablas 1** y **2** se muestra sus estimaciones aplicando bootstrapping a través del Método de Percentiles Estándar (Efron y Tibshirani 1993). Los intervalos de confianza determinaron la incertidumbre en las variables de entrada, así como la variación simultánea de todas ellas. En consecuencia, estos intervalos representan la contribución de cada factor de calidad ambiental a la varianza de salida y calculan sus sumas factoriales, es decir, su sensibilidad, más todos los efectos que sean producto de sus interacciones en el modelo. La **Figura 1** muestra que las variables Suelo, Hidrología y Sociedad son poco sensibles, es decir, sus rangos de incertidumbre son menores a los obtenidos para las variables Aire y Flora y Fauna en el escenario tendencial. Sin embargo, las variables Flora, Fauna y Sociedad son poco sensibles, ya que sus rangos son menores al compararlos con los resultados obtenidos para las variables Aire, Suelo e Hidrología en el escenario con el proyecto (**Fig. 2**).

Conclusiones

Las principales variables efectivas dentro el sistema de estudio fueron el Aire, Suelo, Flora y Fauna, Hidrología y Sociedad. La KSIM indica que las variables Suelo e Hidrología inciden negativamente en la calidad del factor ambiental Flora y Fauna; en contraste, la implementación del proyecto de modernización del riego las impacta positivamente, mejorando la calidad ambiental de Flora y Fauna y Sociedad. A través de la interrelación entre factores biológicos, demográficos, ambientales y ecológicos, esta investigación demuestra que la KSIM es una herramienta valiosa para estudiar los procesos ambientales que ocurren en el ecosistema del valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila con o sin la implementación del proyecto de modernización del riego. Los intervalos de confianza muestran que las variables más sensibles fueron Flora y Fauna en el escenario tendencial; sin embargo, en el escenario contextual, ésta y la Sociedad fueron las menos sensibles. La simulación K también sirve como un punto de partida para análisis cuantitativos más desarrollados, proporcionando una visión holística y mostrando claramente las diferencias entre conservar las tendencias actuales y las que cambian con un proyecto, y ayuda a priorizar el desarrollo de acciones estratégicas para cuantificar y gestionar la conservación y uso sostenible de los recursos ambientales en el ecosistema del valle de Cuatro Ciénegas.

Contribución de los autores

Julio César Buendía Espinoza: Conceptualización, Metodología, Supervisión, Investigación, Curaduría de datos, Análisis formal, Software, Validación, Redacción-borrador original, revisión y edición. Adolfo Antenor Exebio García: Adquisición de fondos, Administración del proyecto, Recursos, Investigación, Validación, Redacción-revisión y edición. Elisa del Carmen Martínez Ochoa: Investigación, Metodología, Supervisión, Curaduría de datos, Validación, Visualización, Redacción-borrador original, revisión y edición.

Referencias

- Ammari, T.G., Tahhan, R., Abubaker, S., Al-zu'bi, Y., Tahboub, A., Ta'any, R., Abu-Romman, S., et al. 2013. Soil salinity changes in the Jordan Valley potentially threaten sustainable irrigated agriculture. *Pedosphere* 23: 376-384. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60029-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60029-6).
- Bojórquez Tapia, L.A., Ortega Rubio, A. 1989. Análisis de técnicas de simulación cualitativa para la predicción del impacto ecológico. *Ciencia* 40: 71-78.
- CONAGUA 2009. *Manifestación de impacto ambiental modalidad regional del proyecto modernización del riego del valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila*. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, Ciudad de México, México. Disponible en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/coahuila/DR_0504.pdf

- CONAGUA 2020. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Cuatro Ciénegas- Ocampo (0504), Estado de Coahuila*. Comisión Nacional del Agua, Dirección Local Coahuila, México.
- Delgado, M.P.A. 2007. *Campaña Para el Uso Eficiente del Agua. Área de Protección de Flora y Fauna Cuatro Ciénegas. Informe final*. Universidad de Guadalajara, CUCSUR, México. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/view/25669525/area-de-proteccion-de-flora-y-fauna-cuatro-cienegas-rareplanet>
- Dinger, E.C., Cohen A.E., Hendrickson, D.A., Marks, J.C. 2005. Aquatic invertebrates of Cuatro Ciénegas, Coahuila, México: Natives and exotics. *The Southwestern Naturalist* 50(2):237-246. DOI: [https://doi.org/10.1894/0038-4909\(2005\)050\[0237:AIOCCC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1894/0038-4909(2005)050[0237:AIOCCC]2.0.CO;2)
- Efron, B., Tibshirani, R. 1993. *An introduction to the bootstrap*. Chapman and Hall. New York, London, Estados Unidos, Reino Unido.
- Erfani, M., Jahanishakib, F., Rezaei, M. 2020. Changes detection of birds and fishes indicators using cross-impact matrix of KSIM in Hamoon international wetlands. *Journal Natural Environmental Hazards* 1(1):1-1. DOI: <https://doi.org/10.22111/JNEH.2020.33333.1624>
- Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., Linaje, M. 2011. Evaluación de la efectividad de las áreas protegidas para contener procesos de cambio en el uso de suelo y la vegetación. ¿Un índice es suficiente?. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 82(3):951-963. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532011000300020&lng=es&tlng=es.
- Fortin, J.K., Rode, K.D., Hilderbrand, G.V., Wilder, J., Farley, S., Jorgensen, C., Marcot, B.G. 2016. Impacts of human recreation on brown bears (*Ursus arctos*): a review and new management tool. *PLoS ONE* 11(1):e0141983. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141983>
- García, G.I., López, L.Á. 2017. Cuatrociénegas: Conflictos asociados al turismo en un área natural protegida. *Cuadernos de Turismo* 40(1):295-314. DOI: <https://doi.org/10.6018/turismo.40.309711>
- Kane, J. 1972. A Primer for a New Cross-Impact Language KSIM. *Technological Forecasting and Social Change* 4(2):129-142. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1625\(72\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0040-1625(72)90010-8)
- Leal, N.O.A., Gómez, B.M.A., Saldaña, F.M. del P. 2019. Tendencias de cambio en los humedales de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México. *Revista Alter, Enfoques Críticos* 1(20):57-77. Disponible en: [5-ALTER20-tendencias.pdf \(squarespace.com\)](https://www.alter20-tendencias.pdf)
- Mani, M., Ganesh, L.S., Varghese, K. 2005. Enhanced futures system: integrated cross-impact analysis and geographic information systems. *Futures Research Quarterly* 21(3):19-45.
- McGaugh, S., Hendrickson, D., Bell, G., Cabral, H., Lyons, K., Mceachron, L., Munoz, O. 2006. Fighting an aggressive wetlands invader: A case study of giant reed (*Arundo donax*) and its threat to Cuatro Ciénegas, Coahuila, México. En: Lozano-Vilano, M. de L., Contreras-Balderas, A.J. (eds.), *Studies of North American desert fishes: In honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist*, pp. 100-115. Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.
- NASA 2020. *Cuenca de Cuatro Ciénegas, México*. Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio, Washington DC., Estados Unidos. Disponible en: <https://www.nasa.gov/image-feature/cuatro-cienegas-basin-mexico>
- Ordoñez-Díaz, M.M., Rueda-Quinóñez, L.V. 2017. Evaluación de los impactos socioambientales asociados a la producción de panela en Santander (Colombia). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria, Mosquera* 18(2):379-396. DOI: http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:637
- Ortiz, A.S.E., Romo, A.M. de L. 2016. Impactos socioambientales de la gestión del agua en el área natural protegida de Cuatro Ciénegas, Coahuila. *Región y Sociedad* 28(66):195-230. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/regsoc/v28n66/1870-3925-regsoc-28-66-00195.pdf>
- Raiesi, F. 2012. Land abandonment effect on N mineralization and microbial biomass N in a semi-arid calcareous soil from Iran. *Journal of Arid Environments* 76: 80-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.08.008>
- Rodríguez, S.E.N., Rojo, M.G.E., Ramírez V.B., Martínez, R.R., Conga, H.M. de la C., Medina, T.S.M., Piña, R.H.H. 2014. Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México. *Ra Ximhai* 10(3):173-193. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46131111013>
- Rojas, M.R., Saucedo P.S., De León, Z.M.A., Jasso, C.D., Aguilar, C.N. 2011. Ensayo: Pasado, Presente y Futuro de la Candelilla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(6):7-18. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v2n6/v2n6a3.pdf>
- RSIS 1995. *Área de protección de flora y fauna de Cuatro Ciénegas*. Servicios de Información sobre sitios Ramsar, Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza. Disponible en: <https://rsis.ramsar.org/es/rsi/734?language=es>
- Sanderman, J. 2012. Can management induce changes in the carbonate system drive soil carbon sequestration? A review with particular focus on Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 155: 70-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.015>
- SEGOB 2013. Decreto por el que se establece como zona reglamentada aquella que ocupa el acuífero denominado Cuatrociénegas, ubicado en el Estado de Coahuila. Secretaría de Gobernación, México. *Diario Oficial de la Federación de México*, 02 de septiembre de 2013. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5312514&fecha=02/09/2013
- SEMARNAP 1999. *Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Cuatrociénegas*. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México. Disponible en: https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/151_libro_pm.pdf
- SERMANAP 2000. Programa de Manejo del Área Natural Protegida con el carácter de Área de Protección de Flora y Fauna la región conocida como "Cuatrociénegas". Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca, Ciudad de México, México. *Diario Oficial de la Federación de México*, 24 de marzo de 2000 (Primera Sección), pp 49-86. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2052745&fecha=24/03/2000
- SEMARNAT 2005. *Estudio hidrológico de los acuíferos el Hundido y Cuatrociénegas, Coahuila*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Disponible en: http://www.desertfishes.org/cuatroc/literature/pdf/IMTA_2005_Hidrogeologia_Hundido_Cuatrociénegas.pdf
- Souza, V., Espinosa-Asuar, L., Escalante, A.E., Eguarte, L.E., Farmer, J., Forney, L., Lloret, L., et al. 2006. An endangered oasis of aquatic microbial biodiversity in the Chihuahuan desert. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(17):6565-6570. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0601434103>
- Souza, V., Siefert, J.L., Escalante, A.E., Elser, J.J., Eguarte, L.E. 2012. The Cuatro Ciénegas Basin in Coahuila, Mexico: An Astrobiological Precambrian Park. *Astrobiology* 12(7):641-647. DOI: <https://doi.org/10.1089/ast.2011.0675>
- Torres, M., Reyes-Chavez, D., Prol-Ledesma, R. 2012. Change Analysis (1977-2000) in the Area Covered by the Hot and Cold Pools in Cuatro Ciénegas, Coahuila, Mexico. *Journal of the Arizona-Nevada Academy of Science* 44(1):59-68. DOI: <https://doi.org/10.2181/036.044.0107>
- Torruco, G.D., González, S.M.A., Torruco, G.A.D. 2013. Las playas de Quintana Roo: Sus riesgos y vulnerabilidad. *El Periplo Sustentable* (24):155-172. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1934/193424835007.pdf>
- Vela-Coiffier, M.P., Vela-Coiffier, E.L., Lozano-García, D.F. 2015. *Evaluación del conocimiento actual del APFF de Cuatrociénegas, Coahuila: FASE 1*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Centro de Calidad Ambiental. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. JN002. México DF. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfJN002.pdf>