



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO HÍDRICO ESTACIONAL DE LA SUBCUENCA ASOCIADA A LA LAGUNA COSTERA PARAMÁN-XOLA COMO MARCO DE GESTIÓN PARA SU REHABILITACIÓN

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO(A) EN CIENCIAS

PRESENTA:

SOFÍA ESCOTO HERNÁNDEZ

TUTOR(A) O TUTORES PRINCIPALES:

DR. STEVEN PETER REED CZITROM BAUS
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. FRANCISCO FLORES VERDUGO
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA, UNIDAD MAZATLAN, UNAM

DR. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA
INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM

DR. ARTURO RUIZ LUNA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.

DRA. OLIVIA SALMERÓN GARCÍA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA, UNAM

ASESOR(A) EXTERNO(A):

M. EN C. GABRIELA GÓMEZ RODRÍGUEZ
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

DR. ENRIQUE NÚÑEZ LARA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARMEN

M. EN C. IVÁN PENIÉ RODRÍGUEZ
OCEANUS INTERNATIONAL

MÉXICO, CD. MX., OCTUBRE, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO HÍDRICO ESTACIONAL DE LA SUBCUENCA ASOCIADA A LA LAGUNA COSTERA PARAMÁN-XOLA COMO MARCO DE GESTIÓN PARA SU REHABILITACIÓN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO(A) EN CIENCIAS

PRESENTA:

SOFÍA ESCOTO HERNÁNDEZ

TUTOR(A) O TUTORES PRINCIPALES:

DR. STEVEN PETER REED CZITROM BAUS
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. FRANCISCO FLORES VERDUGO
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNIDAD MAZATLAN, UNAM

DR. PAULO SALLES AFONSO DE ALMEIDA
INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM

DR. ARTURO RUIZ LUNA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.

DRA. OLIVIA SALMERÓN GARCÍA
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

ASESOR(A) EXTERNO(A):

M. EN C. GABRIELA GÓMEZ RODRÍGUEZ
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

DR. ENRIQUE NÚÑEZ LARA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARMEN

M. EN C. IVÁN PENIÉ RODRÍGUEZ
OCEANUS INTERNATIONAL

MÉXICO, CD. MX., OCTUBRE, 2023

ÍNDICE

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN.....	8
HIPOTESIS.....	11
OBJETIVOS.....	11
ANTECEDENTES.....	12
REGIÓN HIDROLÓGICA.....	12
LOS HUMEDALES.....	15
LAS LAGUNAS COSTERAS DE CONEXIÓN INTERMITENTE CON EL MAR (LCCIM).....	15
<i>Servicios ecosistémicos</i>	<i>17</i>
<i>Procesos de transformación e impactos</i>	<i>19</i>
VALORACIÓN DEL CAPITAL NATURAL	22
<i>Indicadores e Índices ambientales</i>	<i>22</i>
<i>Instrumentos de política ambiental como elementos de evaluación</i>	<i>23</i>
<i>Toma de decisiones sobre los servicios ecosistémicos.....</i>	<i>24</i>
ÁREA DE ESTUDIO	28
LCCIM PARAMÁN-XOLA (LPX).....	28
<i>Dinámica hidrológica</i>	<i>29</i>
<i>Relevancia ecológica.....</i>	<i>31</i>
<i>Servicios ambientales.....</i>	<i>33</i>
<i>Problemática ambiental.....</i>	<i>34</i>
MATERIALES Y MÉTODOS	35
INVEST: RENDIMIENTO HÍDRICO ESTACIONAL	35
<i>Limitaciones del modelo</i>	<i>41</i>
<i>Insumos.....</i>	<i>42</i>
<i>Procesamiento y Calibración.....</i>	<i>42</i>
RESULTADOS.....	50
DISCUSIÓN.....	56
CONCLUSIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. REGIONES HIDROLÓGICAS DE MÉXICO TOMADO DE (SEMARNAT, ATLAS DIGITAL GEOGRÁFICO - AGUA, 2010)	13
FIGURA 2. CUENCAS HIDROLÓGICAS DE MÉXICO TOMADO DE (SEMARNAT, ATLAS DIGITAL GEOGRÁFICO - AGUA, 2010)	14
FIGURA 3. REGIONES HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVAS DE MÉXICO TOMADO DE (SEMARNAT, ATLAS DIGITAL GEOGRÁFICO - AGUA, 2010)	15
FIGURA 4. PERFIL IDEALIZADO DE UNA LAGUNA COSTERA DE CONEXIÓN INTERMITENTE CON EL MAR	16
FIGURA 5. LISTADO DE PROCESOS FUNCIONALES EN LOS ECOSISTEMAS Y ESQUEMA DE PROCESOS QUE INTEGRAN LA DINÁMICA HIDROLÓGICA. TOMADO DE (ESCOBAR, 2008)	17
FIGURA 6. ESQUEMA GENERAL DE LOS PROCESOS QUE PUEDEN AFECTAR DIRECTA E INDIRECTAMENTE A LAS LCCIM. ADEMÁS DE LOS PROCESOS INDICADOS EN LA FIGURA, LA EXTRACCIÓN DEL AGUA MEDIANTE EL BOMBEO DE POZOS Y NORIAS QUE ABATEN EL MANTO FREÁTICO O EL LENTE DE AGUA DULCE FÓSIL (COMENTARIO PERSONAL DR. FRANCISCO FLORES VERDUGO, 2023)	20
FIGURA 7. FUNCIÓN DE PRODUCCIÓN SEGUIDA POR LOS MODELOS INVEST (SHARP, 2018)	25
FIGURA 8. UBICACIÓN DE LCCIM PARAMÁN-XOLA DENTRO DE LA SUBCUENCA RH15Ca RÍO TOMATLÁN	28
FIGURA 9. CONTEXTO HIDROLÓGICO DE LA LAGUNA PARAMÁN-XOLA DENTRO DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 15 COSTA DE JALISCO	29
FIGURA 10. PATRÓN CLIMÁTICO DE LPX (1994-2020). TOMADO DE (CZITROM S. G.-F., PDP)	30
FIGURA 11. REGIONES PRIORITARIAS ASOCIADAS A LPX	32
FIGURA 12. APARIENCIA DEL SOFTWARE INTEGRATED VALUATION OF ECOSYSTEM SERVICES AND TRADEOFFS. IMAGEN TOMADA DEL SOFTWARE.	35
FIGURA 13. APARIENCIA DEL SOFTWARE INTEGRATED VALUATION OF ECOSYSTEM SERVICES AND TRADEOFFS: MODELO RENDIMIENTO HÍDRICO ESTACIONAL (SEASONAL WATER YIELD). IMAGEN TOMADA DEL SOFTWARE.	36
FIGURA 14. MODELO DE BALANCE HÍDRICO POR PÍXEL PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA LOCAL TOMADO DE (SHARP, 2018)	38
FIGURA 15. MODELO DE LA GENERACIÓN DE FLUJO BASE O REAL Y POSIBLE TRAYECTORIA, ESTIMANDO EL AGUA DISPONIBLE CONSIDERANDO LA PRECIPITACIÓN (P), LOS FLUJOS RÁPIDOS (QF) Y LA RECARGA LOCAL (L) TOMADO DE (SHARP, 2018) ...	39
FIGURA 16. PERFIL PERFIL DE UN SUMIDERO A) Y PERFIL DE UN PICO B), ANTES Y DESPUÉS DE EJECUTAR LA HERRAMIENTA RELLENAR (ESRI, 2023).	43
FIGURA 17. COBERTURA Y USO DE SUELO PRESENTES EN LA SUBCUENCA, LA CLASIFICACIÓN FUE SIMPLIFICADA A PARTIR DEL CONJUNTO DE DATOS VECTORIALES DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN, SERIE VII 2018 DEL INEGI 2021.	44
FIGURA 18. DIAGRAMA DE PRECIPITACIÓN PARA CAMPO ACOSTA MUESTRA CUÁNTOS DÍAS AL MES, SE ALCANZAN CIERTAS CANTIDADES DE PRECIPITACIÓN (METEOBLUE, 2023).	48
FIGURA 19. INSUMOS TIPO RÁSTER: PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL WORLDCLIM (HARRIS, 2014). EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL POR MES CGIAR-GLOBAL ARIDITY AND PET DATABASE (ZOMER, 2022)	50
FIGURA 20. INSUMOS TIPO RÁSTER: A) GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO (ORNL DAAC NASA) (ROSS, 2020), B) COBERTURA Y USO DE SUELO (INEGI, 2021), C) MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (INEGI, 2013)	50

FIGURA 21. COMPARACIÓN DE LA RED HIDROGRÁFICA ESCALA 1:50 000 EDICIÓN 2.0 (CONAGUA, 2010) Y LOS FLUJOS MODELADOS “STREAM.TIF”, USANDO EL VALOR VUA = 4500.....	51
FIGURA 22. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ÍNDICE DE FLUJOS RÁPIDOS (QF).....	52
FIGURA 23. REPRESENTACIONES GRÁFICAS DE LOS ÍNDICES DE RECARGA LOCAL (L) Y FLUJO BASE (B)	53
FIGURA 24. IDENTIFICACIÓN DE LOS FLUJOS HIDROLÓGICOS EN LA SUBCUENCA RH15CA.....	54
FIGURA 25. FLUJOS RÁPIDOS (QF) MENSUALES. LOS VALORES ESTÁN EXPRESADOS EN MILÍMETROS (MM).....	55
FIGURA 26. CONTEXTO DEL ESCENARIO PARA LA GESTIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO DE LA ZONA DE ESCURRIMIENTOS PLUVIALES PROVENIENTES DE LA ZONA MEDIA DE LA SUBCUENCA.....	57
FIGURA 27. CONTEXTO DEL ESCENARIO PARA LA GESTIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO DEL ÁREA INTERMEDIA CON LA LAGUNA DE CHALACATEPEC. LA ZONIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y APORTES FLUVIALES FUE TOMADA DE (YÁÑEZ-ARANCIBIA A. E., 2009).....	59
FIGURA 28. IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS INVEST EN EL MUNDO. MODIFICADO DE (STANFORD UNIVERSITY, 2023).....	61

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LAS LCCIM (MODIFICADO DE MEA, 2005).....	18
TABLA 2. MODELOS INVEST (STANFORD UNIVERSITY, 2023)	26
TABLA 3. RESUMEN RESUMEN DEL PRESUPUESTO ESTACIONAL DE AGUA EN LPX. TOMADA DE (YÁÑEZ-ARANCIBIA A. E., 2009) 31	
TABLA 4. FUENTES DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL	42
TABLA 5. SIMPLIFICACIÓN DEL SISTEMA CONCEPTUAL DEL CONJUNTO DE DATOS VECTORIALES DE USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN, SERIE VII 2018 DEL INEGI 2021, PARA LA CONFORMACIÓN DE 16 CLASES SIMPLIFICADAS ASOCIADAS A UN CÓDIGO DE USO DE SUELO (LUCODE POR SU REFERENCIA EN INGLÉS)	45
TABLA 6. TABLA DE REFERENCIA BIOFÍSICA CONSTRUIDA PARA EL ESTUDIO	47
TABLA 7. TABLA DE VALORES CORRESPONDIENTES A LOS GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELO (ROSS, 2020)	47
TABLA 8. TABLA DE EVENTOS DE LLUVIA PARA LA LOCALIDAD CAMPO ACOSTA, CONSTRUIDA A PARTIR DE (METEOBLUE, 2023)...	49

RESUMEN

Conceptos clave: Paramán-Xola, laguna costera de conexión intermitente con el mar, Servicios Ambientales, InVEST, Rendimiento hídrico estacional.

Paramán-Xola (LPX) es una laguna costera de conexión intermitente con el mar, ubicada en el municipio de Tomatlán, Jalisco. Está asociada a la subcuenca Río Tomatlán A, una región de alta evapotranspiración que regularmente supera la precipitación. Es un humedal relevante ecológicamente, que brinda importantes servicios a los habitantes, quienes se benefician del turismo y la producción de sal. La pesca se ha visto afectada por la alteración de su dinámica hidrológica. La subcuenca ha sufrido importantes cambios de cobertura y uso de suelo, incrementándose el uso agrícola y perdiéndose cobertura de selva baja caducifolia. Para evaluar el efecto de estos cambios en la hidrología y considerando un entorno de evaluación carente de información local y de alta resolución, se utiliza el modelo de Rendimiento Hídrico Estacional (Seasonal Water Yield), del paquete de modelos semicuantitativos InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) que cuantifican la contribución relativa de cada parcela a la generación de corrientes de agua y su distribución en el espacio, calculando tres índices: flujo rápido (QF), flujo base (B) y recarga local (L). Los resultados obtenidos son un marco de referencia de la magnitud y distribución de los flujos hidrológicos, así como la dinámica e intereses humanos. Permiten contrastar dos escenarios propuestos para fomentar la recuperación de la dinámica de la laguna. La implementación del escenario de gestión de los usos de suelo, es más compleja por los conflictos socio-culturales y los efectos se esperarían a mayor plazo, aunque se alinea más a los requerimientos ecológicos. La instalación del sistema de Bombeo SIBEO, como ejecución del escenario de implementación de un mecanismo de apertura artificial de la boca que no dependa de la hidrología de la cuenca, se posiciona como la solución más viable en tiempo de respuesta, costo y facilitadora en los conflictos socio-culturales.

INTRODUCCIÓN

Las lagunas costeras de conexión intermitente con el mar (LCCIM) son estuarios separados del mar por una barra arenosa construida y modificada por los procesos de erosión y depósito locales. Esta barra se abre periódicamente permitiendo el contacto entre las masas de agua dulce y salada (Pritchard, 1952; Dyer, 1997; Kjerfve, *Coastal Lagoon Processes*, 1994; Mahapatro, 2013). Las LCCIM son ecosistemas altamente productivos por su ubicación en la zona costera, el espacio de transición entre el ambiente terrestre y el marino, en la que el mar y la tierra ejercen una influencia mutua (Dyer, 1997; Carter, *Coastal environments*, 2002; Rodrigues-Filho, 2023).

En términos hidrológicos y geomorfológicos, los ambientes costeros con las LCCIM son fuentes, sumidero y transformadores de la materia orgánica particulada y minerales transportados por la red de drenaje desde la parte alta de la cuenca, además de ser sumideros de carbono y estabilizadores del clima (Ray, 1991; Toledo, 2003; Berlanga-Robles C. A.-L., 2008). La disponibilidad de este subsidio energético genera la alta productividad y diversidad biológica de las cuales el ser humano ha obtenido diversos beneficios (Contreras-Espinoza, 1993; Rodrigues-Filho, 2023).

Entre los servicios o beneficios que proveen los sistemas costeros al ser humano están la purificación y almacenamiento de agua, provisión de comida, la recreación y el ecoturismo, así como otros de gran importancia pero menos perceptibles para la mayoría de las personas, como son la regulación climática y la protección contra inundaciones. Por lo tanto, las LCCIM tienen gran importancia económica y social, su aprovechamiento ha generado grandes ganancias pero sin duda traerá consecuencias a corto y largo plazo en el bienestar humano tales como mayor nivel de afectación ante fenómenos climáticos y disparidad en el acceso al agua y comida (Canu, 2018; Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005). Estimar la ganancia en términos monetarios es complejo ya que gran parte de los bienes y servicios involucrados carecen de mercado (Pernil, 2011; Spurgeon, 1998).

La presión que las actividades humanas han ejercido sobre estos ecosistemas no se limita a la contaminación y modificación directa de las LCCIM. Dada su ubicación en la parte baja de la cuenca, estos estuarios reciben de forma acumulada los efectos de los procesos antropogénicos que ocurren en las partes altas (Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003). El cambio en la cobertura y uso de suelo es uno de los que mayor impacto tiene sobre la dinámica de flujos en las cuencas (Berlanga-Robles C. A.-L.-L.-G., 2011; Bhaduri B. H., 2000). El agua constituye el principal medio de conexión entre las zonas de la cuenca (conectividad hidrológica), las modificaciones en la hidrología de la cuenca alteran los procesos de mezcla, circulación y la dinámica con la marea, así como el flujo de nutrientes como el nitrógeno y otras sustancias que pueden resultar contaminantes (Pringle C. E., 2001; Pringle C. , 2003).

Es una realidad que los ecosistemas marinos y costeros son altamente vulnerables, considerando que no se cuenta con el conocimiento necesario sobre su estructura, composición, funcionamiento, estado actual y las tendencias y generadores de cambio (Espejel Carbajal, 2008; Rodríguez-Ortega, 2008; Lara-Lara J. R.-H., 2008a). La generación eficiente de información sobre los ecosistemas, es un aspecto fundamental para la correcta toma de decisiones acerca de su gestión y generación de políticas e instrumentos de planeación ambiental adecuados (Espejel Carbajal, 2008; Rodríguez-Ortega, 2008).

Ante este panorama, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO por sus siglas en inglés), recomienda la realización de reconocimientos rápidos comparando ecosistemas en lugar de estudios detallados, a fin de sentar las bases de la ordenación y priorización de esfuerzos futuros. Así mismo, invita al uso de tecnología que aumente la precisión y eficiencia, así como la velocidad de las actividades de

planeación, sin menoscabo de la continuidad y robustez conforme más datos sean generados (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1996). En este sentido, la tecnología de percepción remota permite obtener datos de cobertura y uso de suelo a diferentes escalas espaciales y temporales para alimentar modelos de evaluación.

Si bien es complejo conceptualizar y medir los beneficios que brindan en general los ecosistemas, es una necesidad imperiosa ante la rápida transformación que los seres humanos hemos hecho de los ecosistemas (Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005). El concepto de servicios ecosistémicos ha tomado ímpetu a partir de la publicación de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio y pese al debate sobre la construcción del concepto, la eficiencia en la evaluación y valoración, ha crecido la aceptación sobre el relacionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano (de Groot, 2010). El enfoque monetario de la evaluación de los servicios ecosistémicos, es un enfoque estratégico que permite traducir la importancia de estos, en términos ampliamente perceptibles para quien no es un especialista en el tema (Canu, 2018).

Partiendo de las consideraciones anteriores, en este trabajo se utiliza InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), un paquete de modelos semicuantitativos que evalúa espacialmente bienes y servicios ecosistémicos, desarrollado en el marco del proyecto Capital Natural, una colaboración interdisciplinaria con el objetivo de hacer más fácil y accesible la valoración del capital natural, enfocándose en encaminar la comprensión de la naturaleza hacia la toma de decisiones (Sharp, 2018; Stanford University, 2023). Un aspecto importante de este conjunto de modelos es que se han desarrollado para aplicaciones en entornos con escasez de datos, donde la necesidad de herramientas de soporte de decisiones es alta (Hamel, 2020).

Dado que los servicios ambientales que brindan las lagunas costeras están estrictamente relacionados a los flujos de agua en la cuenca, la implementación de cualquier plan de gestión debe evitar dañar estos flujos, priorizando la calidad del agua y el mantenimiento de los flujos subterráneos de mediano y largo plazo, que son tan importantes para mantener la provisión de agua en época de secas (Hamel, 2020; Brauman, 2015). Por lo tanto, se eligió implementar el modelo del rendimiento hídrico estacional de la paquetería InVEST, que estima las contribuciones relativas de agua de las diferentes partes de un paisaje a lo largo del año, ofreciendo información sobre cómo los cambios en los patrones de uso de la tierra afectan la producción anual del agua superficial. El modelo calcula índices espaciales para estimar los flujos rápidos (escurrimientos que ocurren horas o máximo días después de los eventos de precipitación) y flujos base (potencial y real, agua que puede infiltrarse y tener tiempos largos de residencia en la cuenca). El modelo no genera una estimación cuantitativa del flujo base, solo contribuciones relativas (Sharp, 2018).

Se eligió como sitio de estudio la LCCIM Paramán-Xola (LPX) ubicada en la costa de Jalisco, municipio de Tomatlán, cuya dinámica de conexión con el mar se ha interrumpido de forma importante, tardando hasta 3 años en que la apertura de boca ocurra de manera natural (Navarro Rodríguez, 2022). Esto ha afectado los beneficios o servicios ambientales que la población local obtiene de ella; como son la producción de sal, turismo y pesca de autoconsumo. Un ejemplo de esto es la disminución en la productividad de la laguna, debido al azolvamiento, falta de intercambio de nutrientes y entrada de larvas, que ha llevado a los pescadores a migrar hacia otros cuerpo de agua como es la laguna de Chalacatepec (Czitrom S. G.-F., PDP). Por otra parte, LPX es un sitio de importancia ecológica, constituye el quinto humedal más grande del estado, clasificado como Sitio Ramsar desde el 2008, principalmente por ser parte de una red de humedales fundamentales para la supervivencia de aves acuáticas, locales y migratorias; además de ser un hábitat crítico de fauna acuática (RAMSAR, SEMARNAT, CONANP, SEMADES, GMT & UdeG, 2008).

Estudios sobre LPX (Yáñez-Arancibia A. D.-G.-L.-G.-G., 2014; Czitrom S. B., 2021; Navarro Rodríguez, 2022; Czitrom S. G.-F., PDP) han resaltado la importancia de rehabilitar los flujos que alimentan la laguna como la vía ecológicamente más aceptable, pero advirtiendo que lo hace poco viable el conflicto entre los grupos ocupados en las diferentes actividades económicas y que demandan el abastecimiento de agua como insumo. Por ello, se ha propuesto implementar soluciones basadas en ingeniería para compensar la alta pérdida de agua por evapotranspiración y fomentar la apertura de la boca (Yáñez-Arancibia A. D.-G.-L.-G.-G., 2014; Czitrom S. G.-F., PDP).

Por lo tanto, este trabajo utiliza el modelo de rendimiento hídrico estacional InVEST aplicado a la hidrología de LPX, para estimar espacialmente y temporalmente la contribución relativa de las parcelas de la subcuenca asociada, a la generación de flujos rápidos y flujos base. Se espera que los resultados permitan identificar espacialmente las zonas de mayor relevancia para la generación de flujos que alimenten a LPX, los usos de suelo y cobertura vegetal asociados a estas zonas, así como las variaciones estacionales de dichos flujos. Esta información busca contribuir al proceso de toma de decisiones con respecto a las opciones y propuestas planteadas para la rehabilitación de la laguna y la recuperación de los servicios ambientales que provee.

Los modelos InVEST han sido usados en múltiples estudios y procesos de toma de decisiones, pues permiten generar escenarios sobre la prestación de servicios en un entorno actual y cómo estos servicios pueden verse afectados por nuevos programas, políticas y condiciones en el futuro (Kovacs, 2013; Gao, 2017; Lovera Pons, 2018; Hamel, 2020; Stanford Online, 2023)

HIPOTESIS

Los cambios históricos en el uso del suelo y cobertura vegetal en las zonas altas e intermedias de la subcuenca Río Tomatlán A, han afectado los flujos hidrológicos que contribuyen al mecanismo de cierre y apertura de la barra arenosa que separa a laguna costera Paramán-Xola (LPX) del mar. Utilizar el modelo de rendimiento hídrico estacional InVEST permitirá identificar espacialmente las zonas de mayor relevancia para la generación de flujos que alimentan a LPX, los usos de suelo y cobertura vegetal asociados a estas zonas, así como las variaciones estacionales de dichos flujos.

OBJETIVOS

Objetivo general

Identificar espacialmente las zonas de mayor relevancia para la generación de flujos hidrológicos que alimentan a la laguna costera de conexión intermitente con el mar Paramán-Xola (subcuenca Río Tomatlán A de la Cuenca RH15-C Tomatlán-Tecuán), los usos de suelo y cobertura vegetal asociados a estas zonas, así como las variaciones estacionales de dichos flujos; para contribuir a la toma de decisiones con respecto a su rehabilitación de desde una perspectiva de manejo de cuenca.

Objetivos específicos

- Identificar los usos de suelo y cobertura vegetal presentes en la subcuenca, que incidan de forma relevante el flujo hidrológico asociado a la laguna Paramán-Xola.
- Modelar los flujos rápidos (posteriores a los eventos de lluvia), recarga (flujo base potencial) y el flujo base (durante el tiempo de secas) utilizando el modelo Rendimiento Hídrico Estacional del paquete de modelos Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff o Valoración Integrada de Servicios y Compensaciones Ecosistémicas (InVEST por sus siglas en inglés).
- Analizar la relación entre los usos de suelo y cobertura vegetal de la subcuenca y la contribución relativa de cada parcela de terreno al flujo de agua, a fin de identificar posibles oportunidades de manejo que contribuyan a la rehabilitación de la laguna Paramán-Xola.

ANTECEDENTES

La zona costera es un espacio dinámico de transición entre el ambiente terrestre y el marino, en el que la tierra, la atmósfera, el mar y el agua dulce ejercen una influencia mutua (Silva, 2017). Esta franja incluye dos subzonas, la extensión de la plataforma continental es el límite hacia el mar y tierra adentro el límite es definido por el alcance de la influencia marina (Carter, Coastal environments, 2002; Casco Montoya, 2004; Lara-Lara J. R.-E., 2008b).

Esta zona alberga algunos los ecosistemas más productivos del mundo gracias a que funciona como área de depósito dentro de una región hidrológica. Para estudiar a los ecosistemas costeros y hacer una mejor gestión de ellos, es importante identificar los parámetros básicos para el funcionamiento de la dinámica que conecta a las diferentes partes del sistema y que son responsables de la diversidad y funcionamiento del ecosistema en sí (Dyer, 1997; Ray, 1991; Toledo, 2003). Entre los factores que permiten el funcionamiento de la zona está el escurrimiento del agua en la parte terrestre a través del sistema de cuencas. Parte de estos escurrimientos son superficiales y otros subsuperficiales, se dirigen hacia las zonas bajas alimentando humedales, manglares, lagunas, playas y dunas; movilizand o diferentes tipos de sedimentos y nutrientes (Silva, 2017).

Derivado de esta productividad, la zona costera tiene una relevancia estratégica para el desarrollo económico de un país, como lo demuestra la gran cantidad y diversidad de actividades productivas que se desarrollan en ella. En muchos casos existe un crecimiento en dicha región que genera un desarrollo desordenado, provocando conflictos ambientales, los cuales en determinado momento actuarán en detrimento de la calidad de vida de la población y en la disminución de la competitividad de las actividades económicas (Lara-Lara J. R.-E., 2008b)

Región hidrológica

Una región hidrológica (RH) es un área territorial cuya estructura general se basa en la forma de la superficie terrestre (orografía) que determina el patrón de escurrimientos (hidrología). Su unidad básica para la gestión de recursos hídricos es la cuenca hidrológica, por lo que mínimamente una región hidrológica contiene una cuenca. Primeramente, se distinguen dos grandes zonas en una región hidrológica: la terrestre y la marina (Ray, 1991; CONAGUA, 2018).

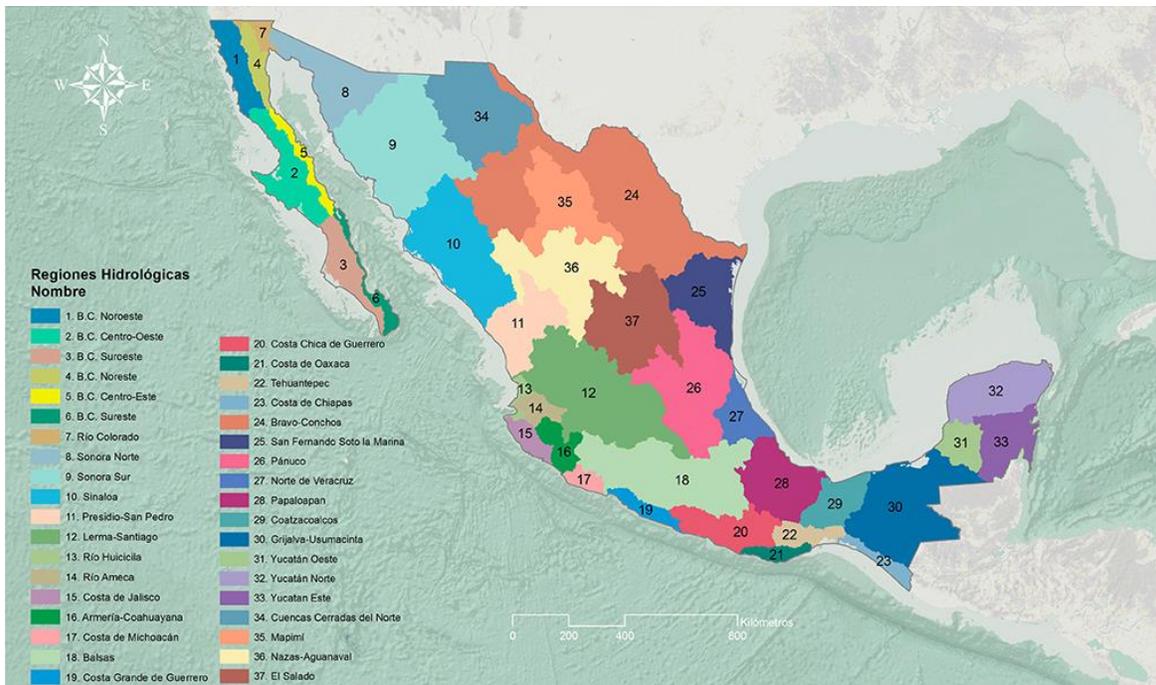


Figura 1. Regiones Hidrológicas de México tomado de (SEMARNAT, Atlas Digital Geográfico - Agua, 2010)

La zona terrestre se compone de cuencas hidrológicas, unidades de terreno drenadas por un único sistema hacia un mismo punto, conocido como punto de salida, que puede ser un cuerpo de agua (interior o costero) o desembocar directamente al mar (Cotler Ávalos, Galindo Alcantar, González Mora, & Pineda López, 2013). Por tanto, esta zona inicia en la parte alta de las cuencas (zonas montañosas), considerada el área de producción de materia prima, la cual es llevada a través del área de transferencia o transporte por la red de drenaje superficial y subsuperficial. Finalmente, los materiales transportados son depositados en la zona costera, quedando disponible para su aprovechamiento. Los materiales transportados suelen corresponder a sedimentos orgánicos o inorgánicos, tales como arenas, limo y arcillas, los cuales pueden ser nutrientes y/o ayudar a mantener el equilibrio de las playas y dunas costeras, al ser uno de los principales contribuyentes de la geomorfología de la zona (Ray, 1991; Toledo, 2003; Silva, 2017). La zona marina inicia con un área cubierta constantemente de agua y sujeta a condiciones cambiantes debido a la marea. La región marina, finaliza en el borde externo de la plataforma continental (aproximadamente 200 m de profundidad), cuyas aguas tienen influencia marina y continental (Ray, 1991; Toledo, 2003)

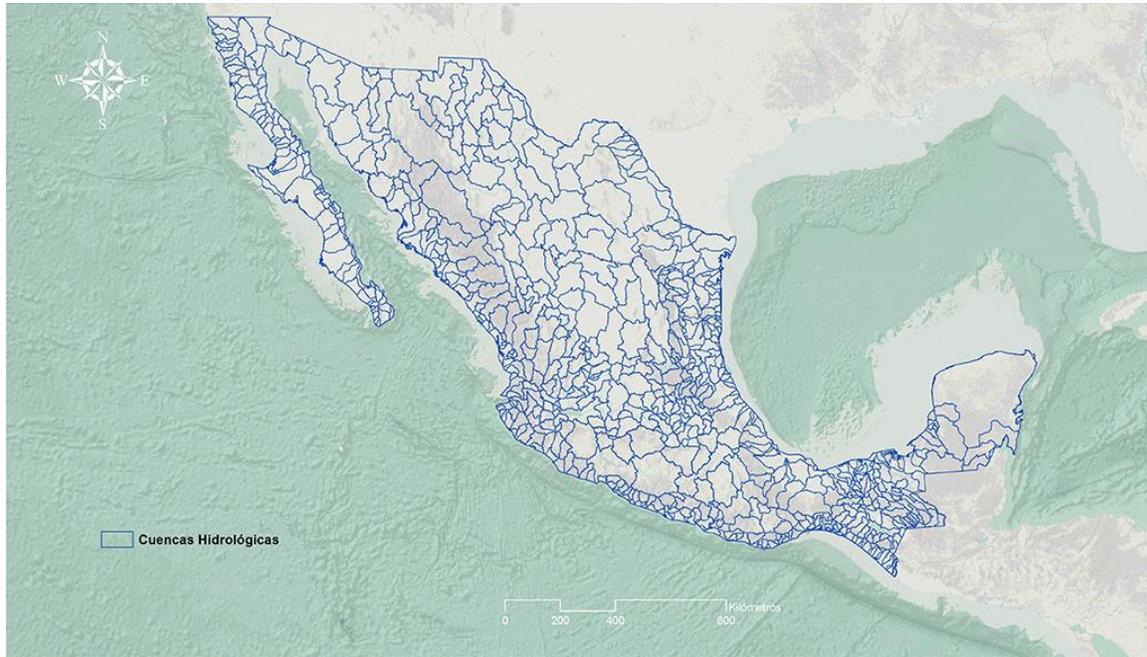


Figura 2. Cuencas hidrológicas de México tomado de (SEMARNAT, Atlas Digital Geográfico - Agua, 2010)

Aunque todas estas áreas están conectadas por flujos de masa, energía y biota, las conexiones más fuertes se llevan a cabo a través de la zona costera (Ray, 1991). Esta angosta franja tiene diferentes rasgos morfológicos entre los cuales están las lagunas costeras de conexión intermitente con el mar (Ray, 1991; Toledo, 2003; De la Lanza-Espino, 2004; Silva, 2017).

Con el objetivo de administrar el recurso hídrico nacional por parte del gobierno mexicano, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ha delimitado trece regiones hidrológico-administrativas (RHA), administradas por los llamados organismos de cuenca. La regionalización de conforma las RHA, respeta la división política municipal, con el fin de facilitar la administración e integración de los datos socioeconómicos. Mientras que las regiones hidrológicas (RH) son unidades de terreno que respetan los límites naturales de las grandes cuencas de México. Se han definido 757 cuencas organizadas en 37 RH y agrupadas en las 13 RHA (CONAGUA, 2018)



Figura 3. Regiones Hidrológico-Administrativas de México tomado de (SEMARNAT, Atlas Digital Geográfico - Agua, 2010)

Los Humedales

Los humedales son ecosistema determinados por la cantidad, calidad y estacionalidad de los aportes de agua (hidrología). Comprende una gran variabilidad ambiental, diferenciada en gran medida, por el grado de humedad o inundación. El origen de los aportes de agua y los flujos de nutrientes, son también factores determinantes en la variabilidad. La relevancia de estos factores está relacionada a la ubicación geográfica del humedal; aquellos ubicados en las tierras inundables de la planicie costera, recibirán aportes de agua dulce del altiplano y tendrán influencia de la marea, por lo que el patrón estacional e interanual de inundación (hidroperiodo), así como la salinidad, definirán su estructura, composición biológica y procesos metabólicos (Lara-Lara J. R.-E., 2008b; Flores Verdugo F. M., 2007). Berlanga-Robles y colaboradores, propusieron una estructura jerárquica para su clasificación con tres ámbitos (marino-costero, continentales y artificiales), cinco sistemas (marino, estuarino, fluvial, lacustre y palustre), ocho subsistemas y 26 clases (naturales y nueve artificiales) (Berlanga-Robles C. A.-L., 2008).

Las lagunas costeras de conexión intermitente con el mar (LCCIM)

Las lagunas costeras de conexión intermitente con el mar son humedales marino-costeros, acumulados en una depresión de la zona costera (Lara-Lara J. R.-E., 2008b; Álvarez Arellano, 1994; Berlanga-Robles C. A.-L., 2008). En términos geomorfológicos, las LCCIM son sistemas estuarinos, pues en ellas ocurre la mezcla de masas de agua salada (marina) y agua dulce (continental) (Contreras-Espinoza, 1993; Aldeco, 1994; Berlanga-Robles C. A.-L., 2008). Por definición, poseen una o más entradas comúnmente conocidas como bocas, que son más estrechas en relación con la extensión de la barrera arenosa que encierra el cuerpo de agua (figura 4). Estas entradas, permiten un contacto permanente o intermitente con el mar, dependiendo de los procesos de depósito y erosión locales (Strahler, 1963; Kjerfve, Coastal Lagoon Processes, 1994; Dyer, 1997).

Las LCCIM pueden ser encontrados en países como Australia, Sudáfrica, Nueva Zelanda, Brasil, Uruguay y México (Haines, 2006). Es común que los sistemas costeros de México estén relacionados a un sistema de corrientes, ya sea permanente o temporal (Lara-Lara J. R.-E., 2008b).

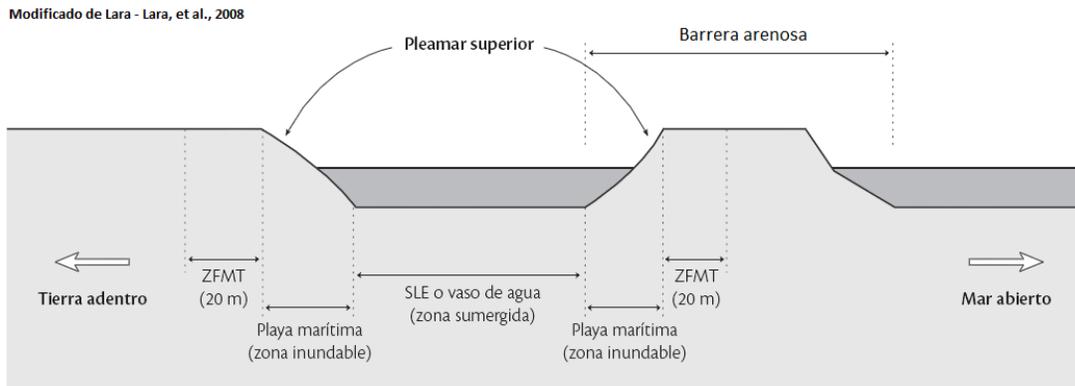


Figura 4. Perfil idealizado de una laguna costera de conexión intermitente con el mar

La dinámica hidrológica: Relevancia de la conectividad hidrológica y el hidroperiodo

La hidrología como ciencia estudia al agua sobre y dentro de la superficie terrestre, sus propiedades, su relación con los procesos ambientales y los seres vivos (Bales, 2015). La dinámica hidrológica de una región está determinada por la cantidad, calidad y estacionalidad de los aportes de agua, siendo la precipitación fuente clave de entrada de agua a los ecosistemas y la evaporación un proceso de pérdida muy importante (Escobar, 2008). Como parte de la dinámica del agua, el hidroperiodo se refiere al patrón temporal y de intensidad, de los flujos de agua dulce y la interacción de las mareas, que determinan la frecuencia y duración de la inundación de los humedales (Flores Verdugo F. A., 2007). Desde el punto de vista ecológico, la conectividad hidrológica se refiere a la transferencia de materia, energía y organismos a través del flujo de agua, entre las diferentes zonas de la cuenca, conectando los diferentes elementos del paisaje (Jackson, 2010).

En el caso general de los ecosistemas marinos y costeros será determinante la conectividad de las corrientes y masas agua, mismas que determinarán su dinámica funcional (Escobar, 2008). Dentro de los ecosistemas costeros, para las LCCIM destacan las condiciones variables de sus entradas, lo cual las hace más sensibles a las interferencias humanas (Czitrom S. P., 2010). La frecuencia y duración de las inundaciones serán entonces determinadas por los aportes recibidos de los ríos, la marea, escurrimientos regionales, nivel freático y los procesos de acreción. Los aportes fluviales que reciban serán también influidos por del clima de la región, que definirá el patrón estacional, recurrencia e intensidad de las lluvias (Lara-Lara J. R.-E., 2008b; Flores Verdugo F. M., 2007). Las modificaciones naturales o humanas en la hidrología de la cuenca, asociada a un LCCIM, alterarán los procesos de mezcla, circulación y la dinámica con la marea, así como el flujo de nutrientes como el nitrógeno y otras sustancias que pueden resultar contaminantes (Pringle C. E., 2001; Pringle C. , 2003).

Dado que la hidrología e hidroperiodo determinan en buena parte el funcionamiento de estos ecosistemas, toda variación tendrá repercusiones importantes en su estructura y funcionamiento biológico y químico (figura 5). Se modificará la salinidad, los flujos y acumulación de materia orgánica e inorgánica, por tanto, la composición química del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Esto a su vez, alterará la distribución y composición de la diversidad biológica, incluso puede provocar la pérdida del hábitat y de los servicios ecosistémicos (Lara-Lara J. R.-E., 2008b; Flores Verdugo F. M., 2007).

Dinámica hidrológica	Dinámica energética	Dinámica biogeoquímica
1 (*) <i>Ingreso de agua en forma de lluvia</i>	11 (*) <i>Ingreso de energía por radiación solar</i>	16 (*) <i>Entrada de materiales por lluvia y viento</i>
2 (T) <i>Infiltración y percolación</i>	12 (*) <i>Albedo</i>	17 (*) <i>Emisiones de gases N₂O, CH₄, CO₂</i>
3 (T) <i>Escorrentía superficial</i>	13 (*) <i>Almacenes de biomasa</i>	18 (*) <i>Descomposición de materia orgánica</i>
4 (T) <i>Escorrentía basal</i>	14 (*) <i>Productividad primaria</i>	19 (*) <i>Almacenes de carbono y nutrientes</i>
5 (T) <i>Evapotranspiración</i>	15 (A) <i>Quimioautotrofia</i>	20 (*) <i>Fijación de nitrógeno</i>
6 (T) <i>Dinámica del agua en el suelo</i>		21 (*) <i>Flujos de materia orgánica y minerales</i>
7 (T) <i>Almacenamiento de agua en el suelo</i>		22 (T) <i>Reciclaje de nutrientes</i>
8 (A) <i>Evaporación</i>		23 (T) <i>Arrastre de materiales por erosión</i>
9 (A) <i>Conectividad por corrientes y masas de agua</i>		24 (T) <i>Lixiviación de materiales</i>
10 (A) <i>Balance de energía en ecosistemas acuáticos</i>		25 (A) <i>Surgencias marinas</i>

Abreviaturas: T= ambientes terrestres, A= ambientes marinos, *= ambos ambientes

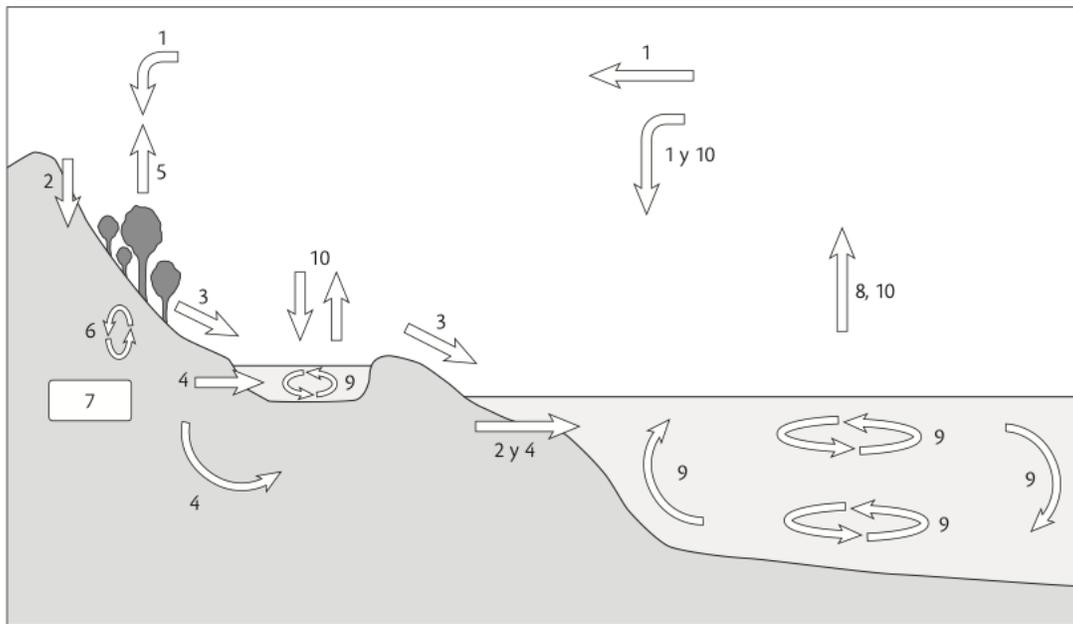


Figura 5. Listado de procesos funcionales en los ecosistemas y esquema de procesos que integran la dinámica hidrológica. Tomado de (Escobar, 2008)

Servicios ecosistémicos

Los llamados servicios del ecosistema o ambientales, fueron enlistados como parte de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA por sus siglas en inglés) y son todos aquellos beneficios que las personas obtenemos de los ecosistemas. En la tabla 1 se resumen los servicios derivados de las LCCIM según la MEA en su reporte sobre el bienestar humano (MEA, 2005).

En términos generales se puede hacer una división muy general de los beneficios que obtenemos de los ecosistemas, diferenciando entre bienes y servicios. Los primeros tienden a ser más tangibles debido a su naturaleza física, y son conocidos como servicios de provisión o suministro, como son los alimentos, el agua dulce, materiales de construcción y de producción de energía. Sin embargo, los servicios o procesos de regulación y apoyo son igual de relevantes, pero poco percibidos, pese a estar relacionados con la regulación de las condiciones ambientales que nos rodean. Hay una categoría basada en la percepción humana de los ecosistemas, los servicios culturales, los cuales mezclan beneficios tangibles e intangibles, dado que se asocian con la recreación, espiritualidad o la educación (tabla 1) (Alcamo J., 2003; Balvanera, 2009).

Tabla 1. Servicios ecosistémicos de las LCCIM (modificado de MEA, 2005)

Provisión	<ul style="list-style-type: none"> • alimento • agua dulce • fibra y combustible • bioquímicos • materiales genéticos
Regulación	<ul style="list-style-type: none"> • del clima • del agua (flujos hidrológicos) • del agua y tratamiento de residuos • de la erosión • de desastres naturales • polinización
Culturales	<ul style="list-style-type: none"> • espirituales y de inspiración • recreativos • estéticos • educacionales
Apoyo	<ul style="list-style-type: none"> • formación de suelos • ciclo de los nutrientes

Desde la perspectiva ecológica, las LCCIM son ecosistemas costeros muy particulares como resultado de su origen y evolución geológica, aunado a la variedad de regímenes climáticos, la dinámica fluvial y los aportes continentales (De la Lanza-Espino, 2004). Los nutrientes depositados en la zona costera por los escurrimientos de agua dulce, sumados a los materiales aportados por la entrada de agua marina, constituyen un subsidio energético considerablemente mayor al disponible en otros sistemas acuáticos, lo que los sitúa entre los ecosistemas más productivos en el mundo (Contreras-Espinoza, 1993; De la Lanza-Espino, 2004). Así mismo, la existencia de áreas de influencia dulceacuícola, salobres y otras con clara influencia marina, permite el desarrollo de una gran diversidad de especies. Gracias a la disponibilidad de recursos y a su forma semicerrada, muchos organismos las utilizan como áreas de alimentación, protección y reproducción, situación estrechamente ligada a la actividad pesquera (Contreras, 2004).

Las pesquerías litorales son solo uno de los servicios que estos ecosistemas brindan al hombre y que han sido de gran importancia para el desarrollo humano. Además de proveer diversos insumos de aprovisionamiento, varias LCCIM se han convertido en centros de desarrollo humano gracias a que propicia anclajes protegidos y de fácil acceso para la navegación (Dyer, 1997).

Esta zona de transición permite el desarrollo de vegetación halófila, como es el caso de los manglares, la cual tiene un papel fundamental en la productividad del ecosistema. Por sí mismos, los manglares proveen importantes servicios ambientales como la estabilización de la costa actuando como barrera de protección ante huracanes, secuestran carbono, funcionan como filtros biológicos y proveen hábitat a diferentes especies. Probablemente esta última función es la más conocida, por lo que popularmente se les ha denominado “guarderías del mar”. Si bien los servicios de apoyo y regulación son sustanciales, los servicios

culturales (turismo) y de provisión son usualmente mayormente percibidos y pueden llegar tener mayor peso en procesos de evaluación con un enfoque económico (Getzner, 2020; Canu, 2018; Lara-Lara J. R.-E., 2008b).

Procesos de transformación e impactos

El desarrollo económico y demás requerimientos asociados al crecimiento de la población ejercen gran presión sobre éstos frágiles ecosistemas llevando a la pérdida de importantes servicios ambientales. El rápido crecimiento poblacional desencadena a la misma velocidad los fenómenos propios de la urbanización, las necesidades de la población cada vez son mayores y las actividades para solventarlas se intensifican (Canu, 2018; Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003; León, 2004). Para el 2008, aproximadamente el 15 % de la población mexicana habitaba en una franja de 100 km de la planicie costera, considerando que se incluyen algunas de las localidades con las mayores tasas de crecimiento poblacional del país (Lara-Lara J. R.-E., 2008b).

El incremento en la actividad comercial y la industria han provocado modificaciones directas a la estructura de las LCCIM, además de generar altos niveles de contaminación. Sin embargo, las LCCIM no solo reciben los impactos directos del área circundante, pues debido a su ubicación en el fondo de la cuenca también reciben de forma indirecta y acumulativa, los impactos generados por las actividades humanas que ocurren en las zonas altas (Muñoz Sevilla, 2004; Ruiz-Luna & Berlanga-Robles, 2003). En la figura 6 se esquematizan algunos ejemplos de estas actividades que pueden estar afectando a las LCCIM: desarrollo de infraestructura, sobreexplotación de agua y organismos (sobrepesca), contaminación e introducción de especies invasoras y cambio de cobertura y usos de suelo. Estos elementos son generadores directos e indirectos de la degradación y pérdida de los ecosistemas, así como de los servicios que éstos proveen, al mismo tiempo que los hace más vulnerables a otros impactos producidos por la variabilidad y cambio climáticos (Lara-Lara J. R.-E., 2008b; Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005).

El cambio en la cobertura y usos de suelo es lo que mayor impacto tiene sobre la hidrología de la cuenca. Las consecuencias no solo se perciben a nivel local y regional, sino que alcanzan escalas globales dado que sucede en prácticamente todo el mundo; además contribuye a la emisión de gases de invernadero y por tanto al cambio climático global (Berlanga-Robles C. A.-L.-L.-G., 2011; Bhaduri B. H., 2000).



Figura 6. Esquema general de los procesos que pueden afectar directa e indirectamente a las LCCIM. Además de los procesos indicados en la figura, la extracción del agua mediante el bombeo de pozos y norias que abaten el manto freático o el lente de agua dulce fósil (comentario personal Dr. Francisco Flores Verdugo, 2023)

La conversión de suelos forestales a pastizales o áreas agrícolas modifica los patrones de escurrimiento, infiltración y retención del suelo. Se espera que disminuya la infiltración y escurrimientos subterráneos, mientras que los escurrimientos superficiales sean mayores y más rápidos. Cuando la tendencia de cambio es la urbanización, estos impactos se potencializan, el riesgo de inundación aumenta debido al incremento en las superficies impermeables y los sistemas de drenaje (Bhaduri B. H., 2000; Bhaduri B. M., 2001)

Aunado a lo anterior, la disponibilidad y calidad de agua se ven comprometidos por el desvío de cauces naturales y en general por el manejo de agua que se realice a los diferentes niveles de la cuenca, al mismo tiempo se modifica la cantidad y calidad de nutrientes que llegan hasta las zonas de cría y pesca. Los nutrientes clave para la producción primaria en los cuerpos de agua son el nitrógeno y el fósforo, aunque históricamente se ha considerado al nitrógeno como el nutriente primario limitante en la productividad de sistemas estuarios, especialmente en aquellos que sufren gran influencia de las actividades humanas (Howarth, 1988; Downing, 1997; Paerl, 2009). La contaminación de los escurrimientos al pasar por las zonas urbanizadas y agrícolas altera los niveles de producción en las LCCIM, debido a baja disponibilidad de nutrientes o por enriquecimiento, generando una excesiva producción de materia orgánica (eutrofización). Esto último, puede llevar a la proliferación de algas nocivas, generación de zonas hipóxicas y destrucción del hábitat de organismos como los peces (Paerl, 2009; Berlanga-Robles C. A.-L.-G., 2011; Bhaduri B. H., 2000; Goonetilleke, 2005; Tong, 2002).

Los patrones de cambio pueden ser utilizados como un indicador mediante el cual evaluar los impactos de las actividades humanas sobre el ecosistema y los servicios que éste brinda. El análisis de estos cambios genera más información sobre las características del territorio y permite establecer estrategias para amortiguar, corregir y prevenir las tendencias negativas sobre la salud del ecosistema y al mismo tiempo del ser humano. Valiéndose de lo anterior, se puede elaborar mejores planes y políticas de manejo dentro de un contexto de desarrollo sostenible (Berlanga-Robles C. A.-C.-B.-L., 2010)

Para que los instrumentos de política y planeación ambiental funcionen adecuadamente no solo es importante tener más información sobre la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas, también es fundamental conocer su estado actual y las tendencias y generadores de cambio (Espejel Carbajal, 2008). La carencia de información a diferentes niveles, la falta de integración de la información existente y la dificultad para la realización de trabajos con la colaboración de diferentes grupos científicos, son parte de la problemática (Soberón, 2008).

En relación con la problemática planteada, el conocimiento de los ecosistemas marinos y costeros es más escaso y fragmentado que en el ámbito terrestre; lo que aumenta el riesgo de que sean degradados (Lara-Lara J. R.-H., 2008a). Debido a ello, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) recomienda trabajar sobre la gestión de cuencas aun cuando se cuenten con recursos limitados. Para ello proponen la realización de reconocimientos rápidos y trabajos con los datos disponibles, buscando la comparación en lugar de estudios detallados, a fin de sentar las bases de la ordenación y priorización de esfuerzos futuros. Dichos estudios deberán recurrir a la tecnología que aumente la precisión y eficiencia, así como la velocidad de las actividades de planeación, sin menoscabo de la continuidad y robustez conforme más datos sean generados (FAO, 1996).

Valoración del Capital Natural

Se entiende por capital todo recurso o activo que genere valor para las personas (Capital Coalitions, 2023). El patrimonio de cada país se compone de distintos tipos de capital, siendo probablemente el económico el más conocido. Con el objetivo de facilitar la comprensión del valor de los ecosistemas y la diversidad biológica, así como la relación que tienen con el bienestar humano, se ha construido el concepto de Capital Natural. El conjunto de ecosistemas, naturales y manejados por el ser humano, que generan bienes y servicios y son perpetuables ya sea por sí mismos o por el manejo humano, constituye el Capital Natural de un país (Sarukhán, 2009)

Es de suma importancia el generar herramientas tales como modelos e índices que ayuden a la cuantificación y valoración de este capital, considerando que, ante el desconocimiento y falta de monitoreo, es afectado rápidamente por la transformación que el ser humano realiza para obtener bienes y servicios, llevándolo a la degradación y agotamiento (Sarukhán, 2009; Sharp, 2018).

Se consideran a los indicadores ambientales y modelos ecológicos como una opción apropiada, utilizándose como herramientas básicas para la planeación y evaluación de políticas y programas de protección al ambiente (Rodríguez-Ortega, 2008).

Indicadores e Índices ambientales

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) define a los indicadores como un parámetro o valor derivado de parámetros que proporcionan información para describir el estado de un fenómeno, ambiente o área, con un significado que va más allá del directamente asociado con el valor del parámetro mismo. Un parámetro es entonces una propiedad medible que en sí mismo puede constituir un indicador, un conjunto de parámetros o indicadores constituyen un índice. Se conoce como índices ambientales al conjunto de indicadores o parámetros integrados como una serie de expresiones o fórmulas, éstos generalmente tienen el objetivo de proveer información clave para dar una imagen clara y completa del estado del ecosistema (Rodríguez-Ortega, 2008).

Los índices e indicadores pueden constituir herramientas que simplifiquen y cuantifiquen la complejidad de los sistemas ambientales, involucrando diversos elementos del medio biofísico y/o socioeconómico, generando información científica y técnica con poca inversión tiempo y dinero, así como fácil de comunicar a todos los posibles participantes del proceso de toma de decisiones. Este análisis implica, no sólo realizar la enumeración de los impactos, sino evaluar la intensidad, magnitud y reversibilidad de estos (Altieri, 2002; Gaviño, 2000)

México cuenta con el Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA) que depende de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), cuya estructura sigue el modelo de Presión- Estado-Respuesta propuesto por Environment Canada y la OCDE. El modelo indica que las actividades humanas generan una serie de presiones sobre el medio ambiente, alterando la calidad y disponibilidad de recursos y servicios ambientales, es decir afectando el estado del ecosistema, en respuesta se han generado diversos instrumentos políticos, económicos y sectoriales. (Rodríguez-Ortega & Flores Martínez, 2008). El SNIA se compone de distintos conjuntos de indicadores: conjunto básico del desempeño ambiental, conjunto de indicadores clave, conjunto crecimiento verde, conjuntos estatales, conjuntos regionales y conjuntos internacionales). Los conjuntos de indicadores cubren los temas prioritarios de la agenda ambiental nacional, toman como referencia a diferentes instrumentos de política ambiental y muestran de forma independiente, tendencias de cambio en temas de biodiversidad, residuos, atmósfera, agua, suelos y recursos forestales (SEMARNAT, Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales, 2023).

Como parte de los indicadores Clave del SNIA, los indicadores clave 1 y 2 de Biodiversidad se enfocan en evaluar los esfuerzos enfocados en conservar la vegetación natural, considerada como el principal reservorio de la biodiversidad y un factor fundamental en mantener los servicios ambientales. Mencionan a las Áreas Naturales Protegidas, los Humedales de la Convención Ramsar y los Programas de Pago por Servicios Ambientales, como 3 de los principales instrumentos de política ambiental enfocados en conservar la vegetación, evitar el cambio de uso de suelo y la degradación de los ecosistemas. Otros indicadores relacionados con la temática (SEMARNAT, Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales, 2023):

- Indicadores de Crecimiento Verde > Capital Natural > 3.1.1 Extensión y condición de los ecosistemas terrestres
- Indicadores de Crecimiento Verde > Capital Natural > 3.1.2 Cambio de uso del suelo
- Indicadores de Crecimiento Verde > Capital Natural > 3.1.4 Superficie protegida y bajo manejo sostenible
- Conjunto Básico del Desempeño Ambiental > Biodiversidad > Ecosistemas Terrestres > Presión > 6.1-1. Cambio de uso del suelo. Este indicador es parte de la lista de indicadores de Desarrollo Sustentable de las Naciones Unidas, la Iniciativa de Integración Ambiental de la Oficina Estadística de la Unión Europea, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), el Ministerio de Medio Ambiente de España y por la Unión Internacional de las Ciencias Geológicas.

En el caso del agua, los indicadores que evalúan el grado de presión sobre los recursos hídricos, haciendo referencia al grave problema que representa para las poblaciones humanas, especies y ecosistemas, el extraer un volumen de agua mayor al disponible (SEMARNAT, Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales, 2023).

- Indicador clave 9 > Grado de presión sobre los recursos hídricos
- Conjunto Básico del Desempeño Ambiental > Agua > Indicador básico 2.1-6 Grado de presión sobre los recursos hídricos. Este es un indicador utilizado por diferentes organismos internacionales (ONU, OCDE, WWF) como indicador de la sustentabilidad del agua a largo plazo.

Otro grupo de indicadores de alta relevancia respecto a la descripción del estado de los ecosistemas y los servicios que el ser humano obtiene de ellos, son los Indicadores para el Desarrollo Sostenible. Estos indicadores globales y locales, son parte de la Agenda para el Desarrollo Sostenible que contempla el cumplimiento de los 17 objetivos de Desarrollo sostenible (Gobierno de México, 2022).

Instrumentos de política ambiental como elementos de evaluación

Los instrumentos de política pública en materia ambiental tienen el objetivo de conservar y proteger el medio ambiente, así como promover el reconocimiento, respeto y garantía del derecho humano al medio ambiente sano para el desarrollo y bienestar de la población. La perspectiva de su aplicación es comúnmente antropocéntrica y legítima la intervención del estado en la protección del medio ambiente. Los instrumentos se clasifican como de regulación directa, administrativos, económicos y educativos, contemplando instrumentos nacionales y también la vinculación con tratados internacionales (Anglés Hernández, 2021).

Convención Ramsar

Dada la importancia de los humedales para el bienestar humano, se negoció en el decenio de 1960, el acuerdo sobre la “Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas”, tratado firmado el 3 de febrero de 1971, entrando en vigor en 1975. La Convención conocida

como Ramsar, tiene la misión de “conservar y promover el uso racional de los humedales, mediante acciones locales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo” (Ramsar Convention Secretariat, 2014).

Las Partes Contratantes de Ramsar han tenido el compromiso de identificar los humedales que cumplen los criterios para ser incluidos en la Lista de Humedales de Importancia Internacional, haciendo énfasis en el mantenimiento de los componentes, procesos y beneficios/servicios del ecosistema. Hoy la lista se compone de 2, 400 sitios propuestos por las 172 Partes Contratantes en el mundo (Ramsar Convention Secretariat, 2014).

Toma de decisiones sobre los servicios ecosistémicos

Se reconoce que el nivel de conocimiento sobre el estado de los servicios ecosistémicos es en muchos casos limitada y escasa, además de que poca información es registrada sobre el costo que tiene el agotamiento de los servicios y menos se sabe sobre el valor económico de los servicios no comercializados. En términos generales, se tiene una mayor certeza sobre las conclusiones globales, no así para la escala nacional o local, donde la información para la toma de decisiones es típicamente insuficiente. En este sentido, las evaluaciones juegan un papel muy importante para primeramente identificar dónde existe mayor incertidumbre y establecer medidas de precaución (Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, 2005).

Los modelos ecológicos se han utilizado históricamente para estudiar la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Si bien proporcionan una visión simplificada, esta información puede ser muy valiosa para ayudar a tomar mejores decisiones sobre el manejo de los recursos ambientales. Para robustecer la información, se ha promovido el uso de múltiples modelos o de modelos socio-ecológicos con un enfoque integral, para complementar resultados, abordar mejor la complejidad de los ecosistemas y la interacción de los seres humanos en diferentes escalas, así como reducir la incertidumbre (Lewis, 2021; Piroddi, 2021).

En el caso específico de la evaluación de los servicios ecosistémicos relacionados a la hidrología de una cuenca, el utilizar modelos hidrológicos espacialmente explícitos es una opción para obtener información sobre los flujos en el paisaje (Hamel, 2020). La consideración del espacio como una de las variables en los modelos de evaluación, permite tener otra perspectiva sobre las dinámicas y patrones dentro de los ecosistemas (Zavala, 2006). Un ejemplo conocido es el modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool), el cual permiten simular flujos dentro de una cuenca identificando unidades de respuesta hidrológica, es decir unidades de terreno dentro de la cuenca que poseen atributos únicos respecto al tipo, cobertura y uso de suelo. SWAT es utilizado para simular la calidad y cantidad de los flujos hidrológicos y predecir el impacto que tendrán el cambio en el uso de suelo, las prácticas de manejo y el cambio climático (Texas A&M University & USDA, 2023). Otro modelo es RHESys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System), el cual además de simular los flujos de agua, también permite modelar los ciclos de transportación de carbono y nutrientes de forma integral a lo largo del espacio de la unidad de terreno (Tague, 2004). Modelos como los mencionados requieren de la parametrización de los procesos hidrológicos para grandes unidades de paisaje, la información requerida puede no estar disponible en muchas regiones y su calibración y manejo puede requerir ser un experto. Ante una necesidad de toma de decisiones por parte de algún grupo de interés no experto y/o con carente información, otra opción son los índices topográficos desarrollados bajo el concepto de la influencia que tiene la topografía y las propiedades del suelo sobre los flujos hidrológicos (Hamel, 2020).

Modelos InVEST

El proyecto Capital Natural es un esfuerzo pionero en reunir ciencia, tecnología y multidisciplinares alianzas intersectoriales, para promover que la naturaleza y el ser humano prosperen. Se visualiza como un puente que permite llevar la mejor ciencia hacia los tomadores de decisiones y las comunidades, promoviendo acciones que permitan el crecimiento inclusivo y sostenibles. Las acciones del proyecto tienen el objetivo de promover el conocimiento y conciencia del valor de los servicios ecosistémicos. ¿Dónde invertir?, ¿Cuánto y dónde proteger?, ¿Qué elementos son los activos básicos y cruciales para lograr la restauración y mantenimiento de los servicios ecosistémicos? Son preguntas que nos ayudan a identificar y generar las políticas y mecanismos financieros para incentivar la inversión eficiente e inteligente hacia acciones específicas para la protección, restauración, rehabilitación de los ecosistemas y por ende de los beneficios que de ellos obtenemos (Stanford Online, 2023).

Uno de los esfuerzos del Proyecto Capital para traducir el conocimiento científico en acciones, es el desarrollo y actualización del software InVEST, con el fin de facilitar el uso del conocimiento del capital natural en la toma de decisiones sobre la gestión del medio ambiente. El software Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoff o Valoración Integrada de Servicios y Compensaciones Ecosistémicas (InVEST por sus siglas en inglés) es una herramienta enfocada en los tomadores de decisiones en puestos de gobiernos, organizaciones sin fines de lucro, instituciones financieras y corporaciones que tienen dentro de sus funciones y operaciones, la gestión de recursos naturales. El fin es habilitarlos para evaluar compensaciones asociadas a diferentes alternativas de gestión, identificando áreas de inversión en capital natural, buscando el equilibrio entre los objetivos ambientales y económicos de las diversas entidades (Natural Capital Project (NatCap), 2021)

Se compone de conjunto de modelos de código abierto que permiten explorar cómo los cambios en los ecosistemas pueden generar cambios en los servicios ambientales. La plataforma tiene un diseño modular y multiservicio, usando mapas como fuente de información y como formato de salida de resultados en términos biofísicos o económicos (Stanford Online, 2023).

Los modelos funcionan dentro de un marco simple que considera tres elementos en la cadena de producción (Figura 7):

- Suministro: El capital natural potencialmente disponible en el ecosistema (estructura y funcionamiento)
- Servicio: Se compone de la demanda por parte de los beneficiarios y la ubicación de estos.
- Valor: Considera las preferencias sociales para establecer métricas económicas y sociales.



Figura 7. Función de producción seguida por los modelos InVEST (Sharp, 2018)

Este enfoque permite que los mapas y reportes obtenidos como resultado, constituyan una herramienta práctica para los tomadores de decisiones, mediante la cual puedan identificar las áreas donde resultaría más eficiente generar una acción o proyecto que beneficie el desarrollo humano y la conservación. En la tabla 2 se enlistan los modelos InVEST disponibles.

Tabla 2. Modelos InVEST (Stanford University, 2023)

Modelos de Servicio	Descripción
Almacenamiento y secuestro de carbono	Estima la cantidad actual de carbono almacenado en un paisaje y valora la cantidad de carbono secuestrado a lo largo del tiempo
Efecto de borde de carbono Forestal	Estima la cantidad de carbono almacenado en un paisaje tropical, teniendo en cuenta la degradación debida a la fragmentación de los bosques que genera efectos de borde.
Carbono azul costero	Estima la cantidad de carbono almacenado y secuestrado en los hábitats costeros (como los manglares) y cuantifica el valor marginal del secuestro de carbono a lo largo del tiempo.
Rendimiento hídrico anual	Cuantifica la cantidad promedio anual de agua producida en una cuenca hidrográfica y valora el suministro de agua dulce para la producción de energía hidroeléctrica en los embalses.
Rendimiento hídrico estacional	Cuantifica la contribución de una cuenca al caudal mensual de agua dulce y proporciona índices relativos de su contribución al caudal base de la cuenca.
Tasa de liberación de nutrientes	Estima la escorrentía de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que ingresa a las corrientes de agua dulce en una cuenca.
Tasa de liberación de sedimentos	Mapea la ubicación y la cantidad de erosión producida en una cuenca, y la cantidad de sedimento que ingresa a las corrientes de agua dulce.
Vistas sin Obstáculos: disposición de calidad escénica	Utiliza un análisis de cuenca visual para estimar la visibilidad de las características u objetos, como el desarrollo costero, las zonas despejadas o las instalaciones de acuicultura.
Recreación y Turismo	Utiliza datos de las redes sociales para comprender dónde se recrean las personas y relaciona esta información con la ubicación de hábitats naturales y otras características que influyen en cantidad de turistas y visitas realizadas a los hábitats naturales
Producción de energía de las olas	Mide y valora el potencial que tienen las olas del mar para generar energía
Producción de energía eólica marina	Mide y valora el potencial que tiene el viento sobre grandes superficies oceánicas y de lagos grandes para generar energía

Producción acuícola de peces marinos	Estima el peso y el valor económico del salmón del Atlántico cultivado en granjas salmoneras
Pesquerías	Estima el volumen de la captura y el valor económico de la pesquería de alguna especie
Calidad de hábitats	Utiliza la calidad del hábitat para representar la biodiversidad de un paisaje; estima la degradación del hábitat y de los tipos de vegetación causada por diferentes amenazas
Evaluación de riesgos de hábitat	Evalúa los riesgos planteados a múltiples hábitats en términos de la exposición a las actividades humanas y la consecuencia específica al hábitat de esa exposición para la prestación de servicios ecosistémicos
Abundancia de polinizadores: polinizadores de cultivos	Se centra en las abejas silvestres como un polinizador animal clave y estima la abundancia de las abejas en un paisaje, así como la contribución de esas abejas a la polinización de los cultivos.
Producción de cultivos	Estima el rendimiento del cultivo y el valor de los nutrientes para un conjunto fijo de cultivos.
Enfriamiento urbano	Estima la reducción de calor en las ciudades proporcionada por la vegetación.
Mitigación del riesgo de inundación urbana	Calcula la reducción en la escorrentía de las aguas pluviales relacionadas con la infraestructura natural en las ciudades.

ÁREA DE ESTUDIO

LCCIM Paramán-Xola (LPX)

Se ubica en la zona centro occidental del litoral del Pacífico mexicano, que corresponde a la porción central de la costa del estado de Jalisco, en la playa Chalacatepec en el municipio de Tomatlán (Coordenadas 19° 43'N, 106°16'W). LPX es una laguna somera con un máximo promedio de 2 m, que tiene una conexión efímera con el mar ya que principalmente se alimenta de corrientes de baja magnitud (Yáñez-Arancibia A. D.-G.-L.-G.-G., 2014; Navarro Rodríguez, 2022). Está sujeta a una marcada temporalidad en los aportes de agua, durante la época de secas pierde gran parte de su volumen total, entre el 60 % y 80%, alcanzando altos niveles de salinidad (12 ups, valor mínimo registrado en 2012 y 185.75 ups, valor máximo registrado en 2010), por lo que se le considera una laguna hipersalina (Navarro Rodríguez, 2022). En el 2009 se estimó un volumen máximo en el mes de agosto de $9,682 \times 10^3 \text{ m}^3$ y un mínimo de $380 \times 10^3 \text{ m}^3$, durante mayo y junio (SEMADET, 2015; Czitrom S. B., 2021; Navarro Rodríguez, 2022).

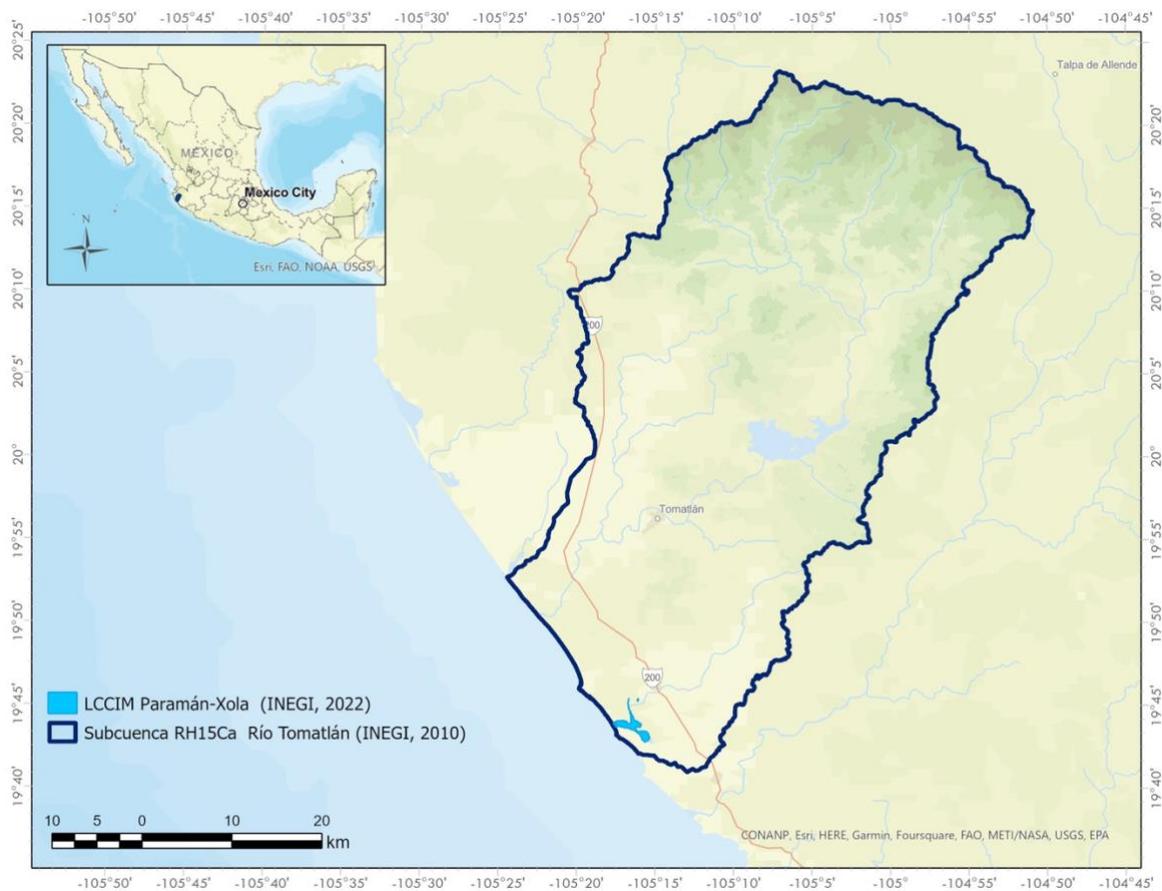


Figura 8. Ubicación de LCCIM Paramán-Xola dentro de la subcuenca RH15Ca Río Tomatlán

La laguna está asociada a la subcuenca Río Tomatlán A (superficie de aportación 1,150.49 Km²), perteneciente a la cuenca Tomatlán-Tecuán, Región Hidrológica 15 Costa de Jalisco, Región Hidrológico-Administrativa VIII, conformada por la cuenca Lerma-Santiago-Pacífico (Comisión Estatal del Agua Jalisco, 2023; Navarro Rodríguez, 2022).

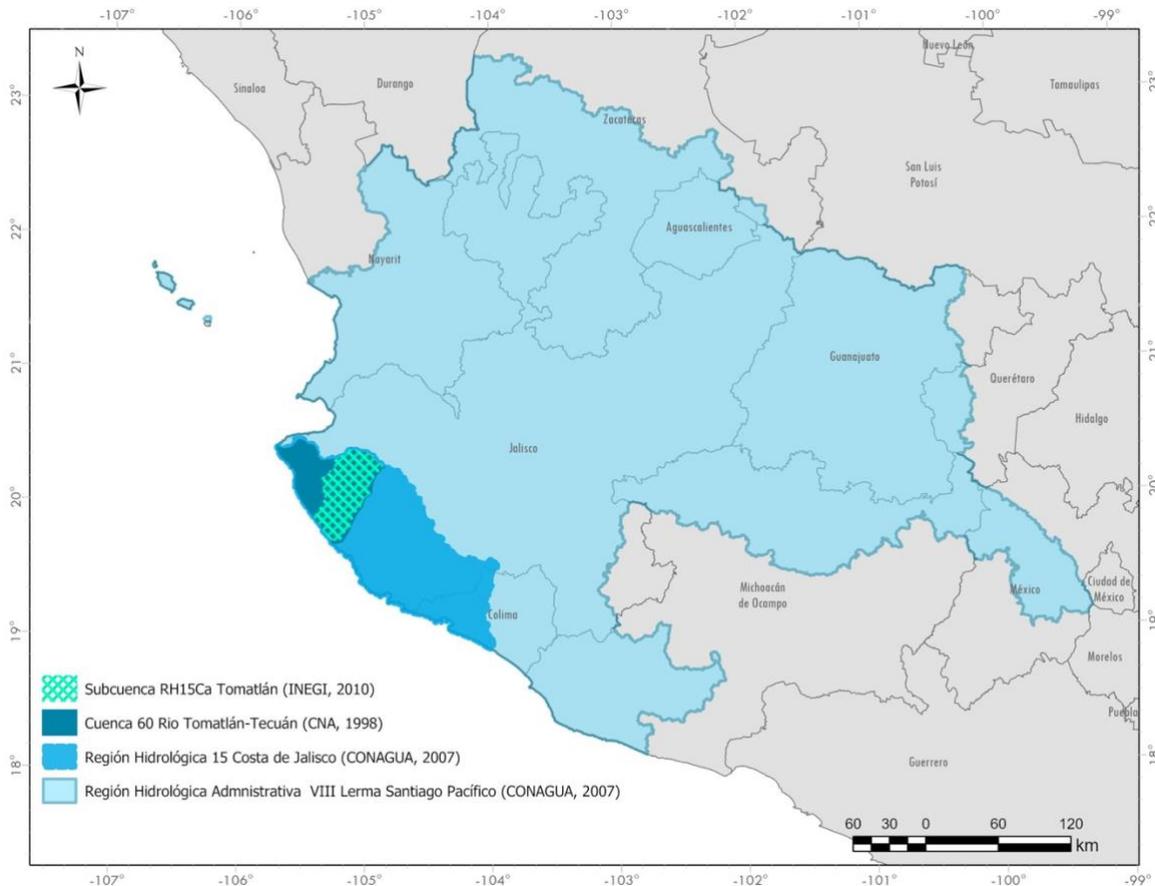


Figura 9. Contexto hidrológico de la Laguna Paramán-Xola dentro de la Región Hidrológica 15 Costa de Jalisco

Dinámica hidrológica

La laguna de Paramán-Xola es el sistema más hipersalino del litoral Pacífico Central de México, su dinámica hidrológica y el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos, están altamente sujetas al ciclo de precipitación anual y a la mezcla turbulenta generada por los vientos (Navarro Rodríguez, 2022; Yáñez-Arancibia A. e., 2009).

El periodo de lluvias ocurre en verano-otoño, entre los meses de junio a octubre, con un máximo en septiembre relacionado a tormentas tropicales. La disminución en los eventos de precipitación de noviembre a enero marca el inicio del periodo de secas (finales de otoño a primavera), siendo los meses de febrero a mayo los más conspicuos (CONAGUA, 2018). El marcado periodo de secas en cierto grado se debe a que la escasa vegetación en la planicie y los vientos marinos, favorecen la formación de nubes en zonas más altas o montañosas. Se estiman 720 mm precipitación pluvial anual, aporte que se ve superado por el régimen de evaporación anual promedio 1,715 mm (Navarro Rodríguez, 2022; Yáñez-Arancibia A. e., 2009; Yáñez-Arancibia A. D.-G.-L.-G.-G., 2014).

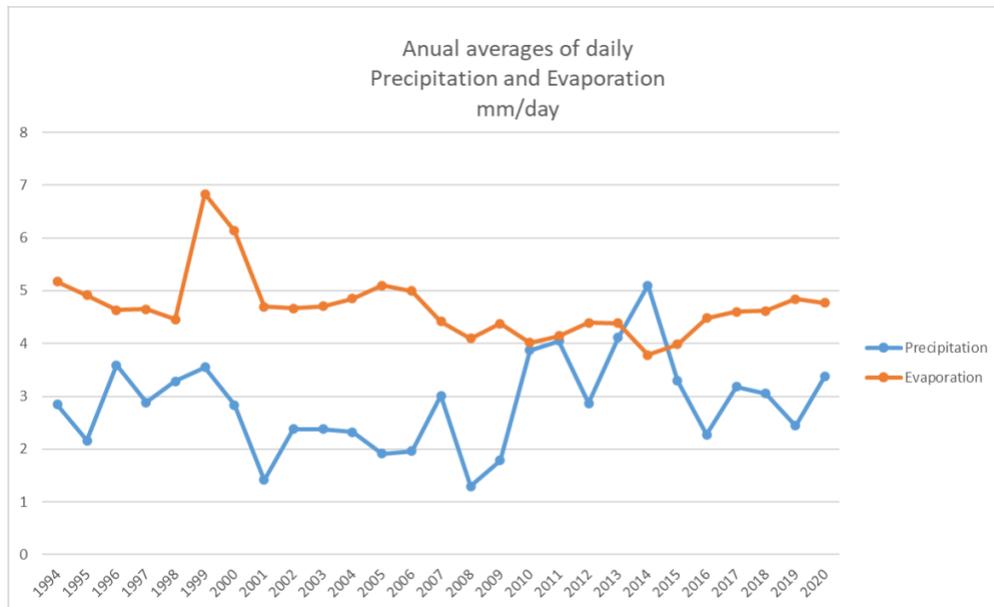


Figura 10. Patrón climático de LPX (1994-2020). Tomado de (Czitrom S. G.-F., PDP)

La barra arenosa que separa a LPX del mar está predominantemente cerrada y su apertura natural puede demorarse hasta 3 años, dado que los escurrimientos que alimentan el vaso lacustre de LPX son principalmente pequeñas escorrentías y arroyos tributarios, como el arroyo derivado del sistema Laguna Larga (Navarro Rodríguez, 2022). Comúnmente la apertura de la boca se relaciona a fenómenos meteorológicos extremos como tormentas o huracanes, que mantienen la boca estuarina abierta algunos días (Navarro Rodríguez, 2022; Czitrom S. G.-F., PDP).

Yáñez- Arancibia, A. y colaboradores realizaron un trabajo de caracterización ecológica del Sistema Laguna Paramán- Chacaltepec entre finales del 2008 y mediados de 2009. Establecieron un sistema conceptual para describir el ciclo anual de funcionamiento ambiental de ecosistemas restringidos de apertura efímera, caracterizando tres periodos condicionados por el clima, la aportación de agua dulce de ríos y escurrimientos menores, la fuerza del mar y morfometría de la cuenca (Yáñez-Arancibia A. e., 2009):

- Periodo 1. El sistema esta desconectado del mar y tiende a la hipersalinidad (periodo de secas)
- Periodo 2. El sistema continúa desconectado del mar, la salinidad baja (hiposalino) gracias al aporte de agua dulce de la lluvia y escorrentías (periodo de lluvias)
- Periodo 3. El sistema se conecta con el mar por el incremento del volumen de la laguna y el nivel de salinidad se vuelve intermedio (periodo frío con lluvias)

Estimaron el presupuesto de Agua del Sistema (tabla 3), cuyos datos confirman que la barra permanece cerrada y la ventilación del sistema está restringida durante el periodo de menor precipitación, ya que la precipitación es normalmente superada por la alta evaporación (figura 10) y no se presentan escorrentías locales. Existe entonces una mayor tendencia al azolvamiento y acumulación de contaminantes, así como incremento en la demanda bioquímica de oxígeno. Esta combinación de factores se relaciona a una simplificación de la estructura y composición de las comunidades biológicas, disminución de la productividad de la biomasa pesquera y por efecto acumulativo, a una tasa de recuperación ambiental de respuesta larga (Yáñez-Arancibia A. e., 2009; Yáñez-Arancibia A. D.-G.-L.-G.-G., 2014).

Tabla 3. Resumen Resumen del Presupuesto Estacional de Agua en LPX. Tomada de (Yáñez-Arancibia A. e., 2009)

PARÁMETROS	Agosto	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Marzo	Mayo-Junio
Volumen total agua-laguna (x10 ³ m ³)	9682	7882	6997	6702	5416	2005	380
Precipitación (mm/mes)	156	72.2	27	11	37	1.53	6.2
Evaporación (mm/mes)	159	142	118	105	107	155	184
Salinidad media agua-lagunar (ppm)	4.9	7	9.6	12.7	14.6	25.5	70.1
Salinidad media agua-barra (ppm)	20	22	25	27	29	39	51
Tirante de agua laguna-mar (m)	1.5	1.2	1	0.95	0.77	-0.2	-1
Profundidad media agua Zona 1 (m)	1.97	1.67	1.52	1.47	1.37	1.07	0.3
Saturación agua-barra (%)	46 (*)	39	35	34	32	25	7
Volumen agua embebido barro (m ³)	54013.4	45788.0	41675.3	40304.4	37562.6	29337.2	8225.4
Filtración de agua laguna-mar (m ³ /seg)	1.6	1.5	0.75	0.25	0.5	0	0
Balance pérdida agua (m ³ /seg)	-4.5	-67.9	-87.3	-89.6	-67	-145.9	-169

*Periodo óptimo para la apertura de la barra Agosto-septiembre

Relevancia ecológica

La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), reconoce a LPX y a la subcuenca asociada, como una región prioritaria para la conservación de flora y fauna, tanto marina como terrestre. LPX se encuentra dentro de la Región Marina Prioritaria RMP-25 “Mismaloya- Punta Soledad”, la Región Terrestre Prioritaria RTP-63 “Chamela-Cabo Corrientes” y Región Hidrológica Prioritaria RHP-24 “Cajón de Peñas-Chamela” (SEMADET, 2015; Navarro Rodríguez, 2022).

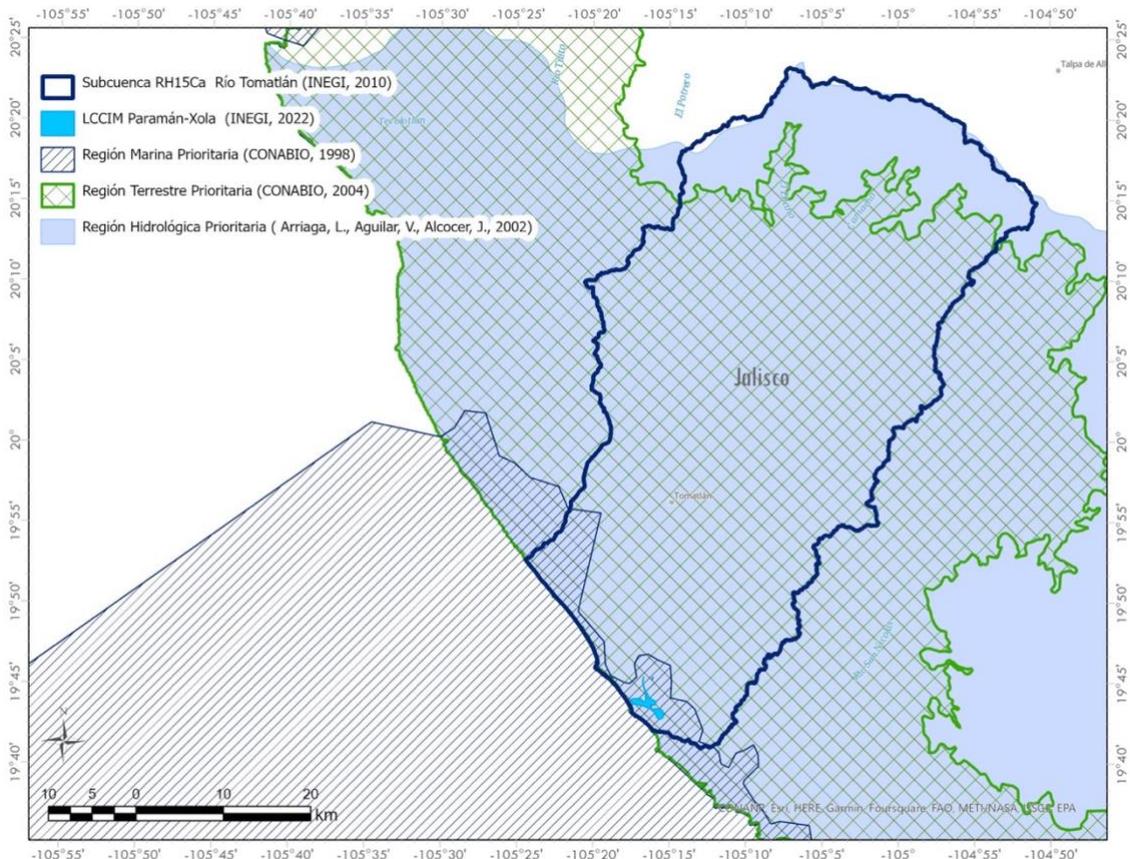


Figura 11. Regiones prioritarias asociadas a LPX

Predomina la selva baja caducifolia y matorral de acacias, que forman comunidades densas de árboles de entre 8 a 12 m en promedio, con algunos ejemplares de hasta 15 m en condiciones de baja perturbación. En zonas de pendiente ligera y mayor humedad, se presenta la selva media caducifolia, con estrato arbustivo más abierto. Las especies predominantes son: *Bursera spp.* (papelillo, copal), *Eysenhardtia polistachya* (vara dulce), *Acacia pennatula* (tepame), *Forestiera spp.* (acebuches), *Mimosa sp.* (uña de gato), *Opuntia spp.* (nopales), *Lysiloma spp.* (tepeguaje) y *Myrtillocactus geometrizans* (garambullo). Muchas de estas especies pierden sus hojas durante 5 a 8 meses, debido al marcado periodo de secas (Navarro Rodríguez, 2022; SEMADET, 2015)

Por su tamaño, ocupa el quinto lugar de los humedales del estado, con una superficie aproximada de 704 ha. En términos ecológicos, LPX es uno de los humedales más importantes en la costa de Jalisco, por ser un hábitat crítico para las aves y vegetación acuática (DOF, 2018; SEMADET, 2013). Recibió el decreto como sitio Ramsar, con el número de registro 1768 el 2 de febrero del 2008, principalmente por su relevancia como hábitat de aves acuáticas residentes, sitio de alimentación, descanso, y reproducción de aves migratorias. En LPX se identificado 69 especies, todas incluidas en la Lista Roja de la IUCN, que constituyen el 59 % de las especies de aves registradas para la costa de Jalisco. Dentro de estas especies de aves, 7 están sujetas a protección en la Norma Oficial 059: *Ardea herodias* (garza morena o ceniza, sujeta a protección especial), *Egretta rufescens* (garza o garceta rojiza, en peligro de extinción), *Mycteria americana* (cigüeña americana, sujeta a protección especial), *Larus heermanni* (gaviota plumiza, sujeta a protección especial), *Sterna elegans* (charrán elegante, sujeta a protección especial), *Sterna antillarum* (charrán chico, sujeta a protección especial) y *Cairina*

moschata (pato real, en peligro de extinción) (CONABIO, California Academy of Science & National Geographic, 2022; SEMADET, 2015; DOF, 2019).

Además de su importancia como hábitat crítico para las aves, LPX cuenta con una biodiversidad de 19 grupos de zooplancton, 45 especies de peces, tres especies de mangle y el pasto marino *Ruppia maritima* adaptado a la alta salinidad (Navarro Rodríguez, 2022). El programa de manejo reporta una superficie de 15.3 ha de manglar, las tres especies presentes están incluidas en la NOM-059-ECOL-2001 y se distribuyen en parches heterogéneos: mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), mangle negro (*Avicennia germinans*) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*). El manglar de LPX representa un importante sitio de alimentación, reproducción, crianza y refugio de las especies de peces que habitan en la laguna, 3 de las cuales se reproducen en ella, 18 la usan de refugio en etapas juveniles, así como camarones de las familias *Palaemonidae*, *Alphaidae*, *Hippolitidae*, *Proccesidae* y *Penaidae*. Se ha reportado una especie endémica de pez, el Topote de Purificación (*Poecilla chica*) (Yáñez-Arancibia A. e., 2009; CONABIO, 2023). En los alrededores de la laguna se pueden encontrar reptiles como iguanas y lagartijas (*Iguana iguana*, *Ctenosaura pectinata*, *Anolis nebulosus*, y *Sceloporus* spp.), monstruo de Gila (*Heloderma horridum*) o pequeños mamíferos como armadillo (*Dasyus novemcinctus*), coatí o tejón (*Nasua nasua*), mapache (*Procyon lotor*), tlacuache (*Didelphis marsupiales*) (SEMADET, 2015). LPX es colindante al Santuario de Tortugas Marinas “Playón de Mismaloya”, la cual protege a tortugas marinas en peligro de extinción: *Lepidochelys olivacea* (tortuga golfina), *Chelonia agassizi* (tortuga prieta), *Eretmochelys imbricata* (tortuga de carey) y *Dermodochelys coriacea* (tortuga laúd) (CONANP, 2018).

Servicios ambientales

Además de su relevancia ecológica, LPX es una fuente de sustento para la mayoría de los habitantes de la zona, ya sea directa o indirectamente (Navarro Rodríguez, 2022). En el marco de los servicios ambientales establecido por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio en el 2005, LPX brinda los siguientes beneficios a los pobladores y visitantes de la región:

- Provisión.

Los habitantes y visitantes obtienen alimento para autoconsumo o venta, a través de la extracción de especies que habitan la laguna y sus alrededores. Así como agua para el consumo humano y ganadero, limpieza y riego de cultivos. También se benefician de la extracción de leña y otros materiales para la construcción y producción de energía (Yáñez-Arancibia A. e., 2009; Navarro Rodríguez, 2022; Czitrom S. G.-F., PDP). Otra actividad relevante asociada a la laguna es la producción de sal, cuya producción alcanzó las 200 a 250 toneladas en el 2021 (Czitrom S. B., 2021)

- Regulación y apoyo

Como en cualquier LCCIM, el flujo e intercambio hidrológico es determinante para establecer la dinámica ambiental que mantiene la productividad biológica y por tanto la posibilidad de extraer alimento, otros insumos o hacer aprovechamiento de la belleza escénica (Yáñez-Arancibia A. e., 2009). LPX cumple funciones ecológicas como la regulación del balance hídrico, capacidad de almacenamiento de desechos, es un hábitat crítico para fauna acuática estuarina y proporciona protección de especies migratorias, permitiendo su alimentación y reproducción (SEMADET, 2015; Flores Verdugo F. A., 2007).

LPX se ubica en una zona con nivel alto de peligro por fenómenos atmosféricos, como ciclones e inundaciones (Czitrom S. B., 2021). Los humedales como es LPX, actúan como barrera de protección y amortiguamiento ante tormentas y huracanes, funcionan como vasos reguladores evitando inundaciones y el mangle evita la erosión del terreno sin desviar las corrientes litorales como ocurre con las barreras

artificiales (Czitrom S. B., 2021; Flores Verdugo F. A., 2007). Los manglares ayudan a mantener la calidad del agua actuando como biofiltros, eliminan el exceso de nutrientes generado por las descargas agrícolas y urbanas.

- Culturales

El turismo es una actividad relevante que se sostiene por el valor escénico, opciones de recreación al aire libre, potencial para realizar actividades didácticas y educativas, así como actividades deportivas (Navarro Rodríguez, 2022; Yáñez-Arancibia A. e., 2009; Czitrom S. B., 2021; Czitrom S. B., 2021; Czitrom S. B., 2021). Conectado al servicio de provisión, la actividad turística es un gran motor de desarrollo económico, en donde los pobladores ofrecen diferentes tipos de servicios comerciales (SEMADET, 2015)

Problemática ambiental

Pese a ser una zona importante por la alta diversidad albergada en sus ecosistemas, sufre una problemática ambiental significativa, derivada de las condiciones económicas, sociales, culturales e institucionales. Como desafortunadamente sucede en muchos ecosistemas costeros, no existe una regulación efectiva de las actividades humanas que ocurren en la subcuenca, por lo que los intereses de los diferentes sectores productivos (agropecuaria, turístico, pecuario y acuícola) entran en conflicto. (SEMADET, 2015; Czitrom S. G.-F., PDP; Yáñez-Arancibia A. e., 2009)

Se presenta un nivel relevante de deforestación tanto en sus selvas como manglares, perdiéndose hábitats críticos para la crianza y reproducción de especies. Esto no solo lleva a la pérdida de biodiversidad de la laguna, impacta a actividades productivas como la pesca o disminuye la productividad del suelo, debido a la modificación en la vegetación nativa. El cambio intensivo de uso de suelo en la subcuenca asociada se remonta a principios de 1970, principalmente incrementando la superficie agrícola, de 58 a 397 ha en el 2010. El cambio de uso de suelo también se dirige a establecer centros urbanos, a partir de los cuales se descargan aguas negras sin tratamiento, directamente a los acuíferos. A estos hechos responde el incremento de elementos potencialmente tóxicos en los sedimentos y agua de la laguna, debido a la contaminación por fertilizantes y drenajes urbanos. Específicamente se han identificado enriquecimiento de Cu y Zn, cuyos niveles en sedimento sugieren posibles efectos adversos en la biota bentónica. También se reporta aumento en enfermedades gastrointestinales debido a la ingesta accidental de agua o de organismos contaminados. (Ontiveros-Cuadras, 2021; SEMADET, 2015; Navarro Rodríguez, 2022).

El turismo es una actividad económica relevante en la zona, que incluye actividades como visitas a los campamentos tortugueros, estancia en la playa y el avistamiento de aves. Al igual que otras actividades, el turismo no siempre se realiza conforme a la normatividad, ejerce una alta presión y por lo tanto deterioro, que afecta especialmente a las poblaciones de tortugas (CONABIO, 2022; Ontiveros-Cuadras, 2021; SEMADET, 2015). Las diferentes propuestas para la rehabilitación de la laguna y sus alrededores resaltan la importancia de migrar a actividades ecoturísticas de bajo impacto dirigidas por las comunidades, a través de comités capacitados y avalados por las instancias gubernamentales correspondientes, como la Procuraduría Federal para la Protección al Ambiente (PROFEPA) (SEMADET, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo de Rendimiento Hídrico Estacional (Seasonal Water Yield nombre original en inglés) es parte del paquete de modelos semicuantitativos InVEST desarrollado en el marco del proyecto Capital Natural. Estos modelos evalúan espacialmente bienes y servicios ecosistémicos, enfocándose en encaminar la comprensión de la naturaleza hacia la toma de decisiones (Sharp, 2018; Stanford University, 2023).

InVEST: Rendimiento hídrico estacional

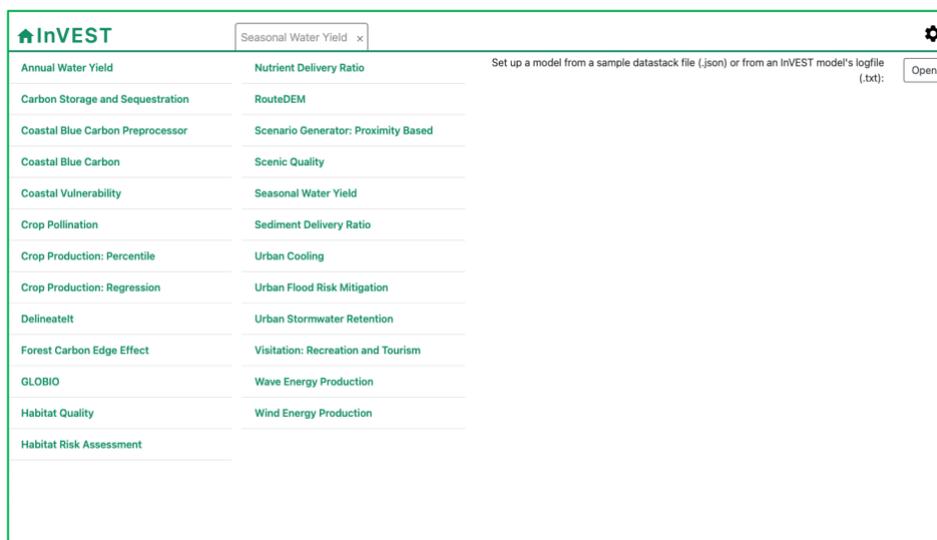


Figura 12. Apariencia del software *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*. Imagen tomada del software.

Se propone como una herramienta que permite evaluar el efecto que tiene la gestión del paisaje sobre el suministro de agua disponible para cubrir las demandas ambientales y humanas. Se basa en el modelo de Rendimiento Anual de agua que estima el total de agua disponible en una cuenca. Para ello requiere el entendimiento de la dinámica hidrológica de la cuenca. Se diferencia del modelo anual, porque permite estimar los flujos estacionales, para soportar estudios que requieren la comprensión de los procesos hidrológicos de la cuenca como región de estudio (Sharp, 2018; Natural Capital Project, 2022).

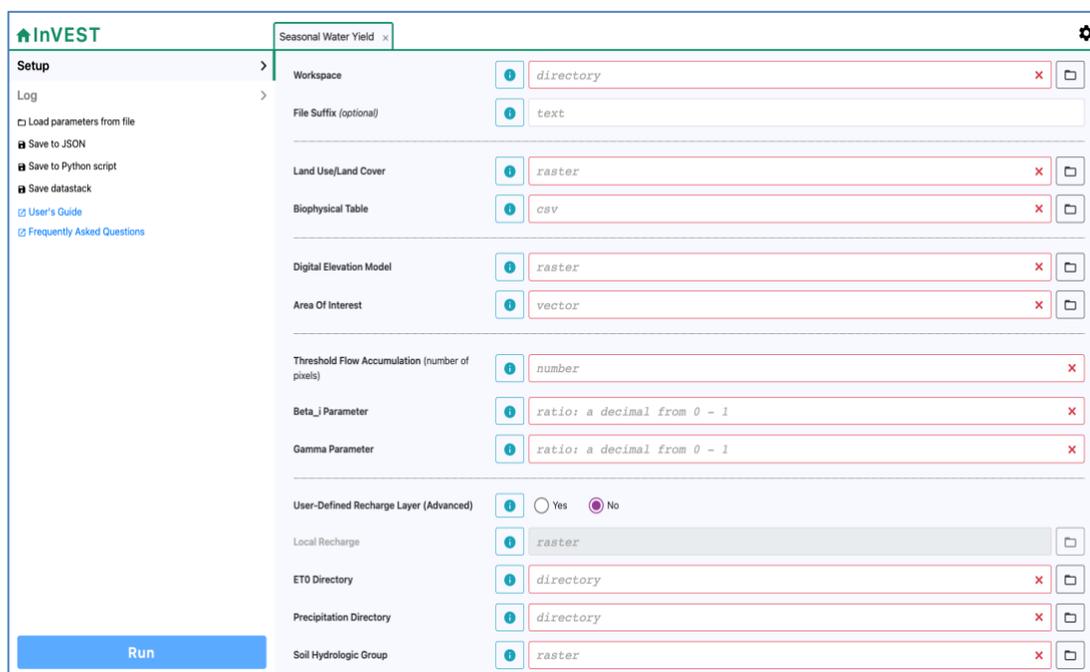


Figura 13. Apariencia del software *Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs: Modelo Rendimiento Hídrico Estacional (Seasonal Water Yield)*. Imagen tomada del software.

El modelo evalúa desde dos enfoques la contribución relativa del terreno al flujo de agua, incluyendo los factores clima, suelo, vegetación, pendiente y posición dentro de la trayectoria del flujo:

- Rendimiento neto por píxel. Evalúa la contribución que un píxel puede hacer a un flujo de agua, que no se pierde por evapotranspiración. Los factores relevantes son la cantidad de agua que entra al sistema por precipitación y la cobertura del suelo. Puede presentar valores negativos cuando la evapotranspiración es superior a la entrada de agua. Este enfoque no evalúa lo que sucede con el volumen de agua que cada píxel contribuye al flujo.
- Rendimiento por parcela (conjunto de píxeles). Este segundo enfoque realmente evalúa la generación de un flujo de corriente. En este caso el relieve cobra relevancia, pues la ubicación topográfica de cada píxel determinará que el agua generada en el mismo pueda o no generar un flujo pendiente abajo.

Considerando que hay diferentes procesos o factores por los cuales cierta cantidad de agua puede salir del sistema de corrientes, se calculan 3 índices espaciales para cuantificar la contribución relativa de cada píxel y conjunto de ellos (parcela):

Índice de flujo rápido (Quickflow, QF). Flujo de corriente con tiempos de residencia cortos en la cuenca (horas o días). Considera el Número de Curva (NC) para integrar las propiedades de infiltración y escorrentía del tipo de suelo y su cobertura. El NC es un método desarrollado por el Servicio de Conservación del Suelo (Soil Conservation Services, SCS) y el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (Natural Resources Conservation Services, NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés), que indica el potencial de escurrimiento, considerando el tipo de suelo, la cobertura vegetal, áreas impermeables y zonas de almacenamiento. El modelo de NC establece la relación empírica entre el escurrimiento directo (Q (mm) y la precipitación P (mm) (USDA, NRCS, 1986; Paz-Pellat, 2009)

El cálculo del índice de flujo rápido no considera la topografía, ya que se enfoca en el rendimiento neto de agua que potencialmente puede generarse en un píxel, es decir la cantidad de agua que potencialmente puede crear un flujo. Por tanto, este índice puede presentar valores negativos si la pérdida de agua por evaporación es mayor que la entrada al sistema.

Para calcular el flujo rápido usamos la profundidad media del evento, $P_{i,m}/n_{i,m}$ y asumimos una distribución exponencial de las profundidades diarias de precipitación en días con lluvia,

$$f(p) = \frac{1}{a_{i,m}} \exp\left(-\frac{p}{a_{i,m}}\right)$$

Donde:

$$a_{i,m} = \frac{P_{i,m}}{n_{i,m}} / 25.4$$

- $a_{i,m}$ es la profundidad media de lluvia en un día con lluvia en el píxel i en el mes m [in]
- $n_{i,m}$ es el número de eventos en el píxel i en el mes m [-]
- $P_{i,m}$ es la precipitación mensual para el píxel i en el mes m [mm]

El flujo rápido para píxeles localizados en corrientes se establece en la precipitación sobre ese píxel, lo que asume que no hay infiltración, solo escorrentía.

$$QF = P_{stream,m} stream,m$$

de otro modo, se puede mostrar a partir de la distribución exponencial que la escorrentía mensual $QF_{i,m}$ es

$$QF_{i,m} = n_m \times \left((a_{i,m} - S_i) \exp\left(-\frac{0.2S_i}{a_{i,m}}\right) + \frac{S_i^2}{a_{i,m}} \exp\left(\frac{0.8S_i}{a_{i,m}}\right) E_1\left(\frac{S_i}{a_{i,m}}\right) \right) \times \left(25.4 \left[\frac{mm}{in} \right] \right)$$

donde

$$S_i = \frac{1000}{CN_i} - 10 \text{ [in]}$$

- CN_i es el número de curva para el píxel i [in-1], tabulado como una función del uso de suelo y cobertura vegetal (lulc)
- local, y el tipo de suelo
- E_1 es la función integral exponencial

$$E_1(t) = \int_1^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt.$$

- 25.4 es un factor de conversión de pulgadas (in, usadas por la ecuación) a milímetros (usados por el modelo)

Así, el flujo rápido anual QF_i puede ser calculado de los valores mensuales $QF_{i,m}$

$$QF_i = \sum_{m=1}^{12} QF_{i,m}$$

Índice de recarga local (L). Se refiere al flujo base potencial por píxel, en una escala de tiempo anual considerando valores derivados de la disponibilidad de agua mensual. El agua de lluvia que no genera un flujo o no se evapotranspira, puede infiltrarse y convertirse en una recarga. El nivel de recarga local se define por el Coeficiente (único) del cultivo o Coeficiente de evapotranspiración de cultivo (K_c) creado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Para calcular la evapotranspiración de un determinado cultivo (ET_c) bajo condiciones estándar (desarrollo en campos extensos, buenas condiciones agronómicas y sin limitaciones de humedad en el suelo), se toma el valor de referencia de la evapotranspiración de una superficie de gramíneas extensamente estudiadas (ET_0) y se multiplica por K_c . El coeficiente K_c es un valor adimensional ($K_c = K_{cb} + K_e$) que incorpora las diferencias en la transpiración del cultivo de interés (coeficiente basal del cultivo, K_{cb}) y evapotranspiración del suelo (coeficiente de evapotranspiración del suelo, K_e), respecto a los valores del pasto de referencia (FAO, 2006). Por lo tanto, el cálculo de la evapotranspiración de un cultivo dependerá de los propósitos del cálculo, la exactitud requerida y la información disponible (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1996)

El índice de recarga local se calcula en una escala de tiempo anual, pero utiliza valores derivados de la disponibilidad de agua mensual. Para un píxel i , la recarga local que se deriva del presupuesto hídrico anual es (figura 14):

$$L = P - QF - ETA_i$$

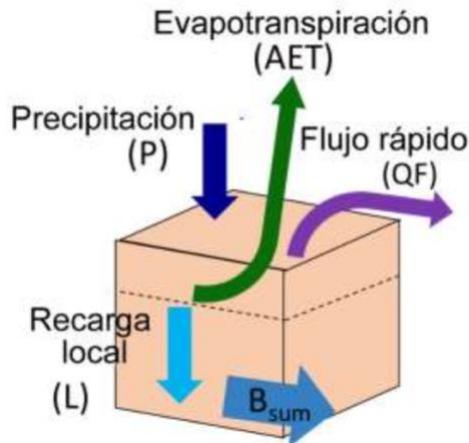


Figura 14. Modelo de balance hídrico por píxel para el cálculo de la recarga local tomado de (Sharp, 2018)

Donde la evapotranspiración real anual ETA es la suma de las ETA mensuales:

$$ETA_i = \sum_{\text{meses}} ETA_{i,m}$$

Para cada mes, $ETA_{i,m}$ está limitada ya sea por la demanda (evapotranspiración potencial ETP) o por el agua disponible:

$$AET_{i,m} = \min(PET_{i,m} ; P_{i,m} - QF_{i,m} + \alpha_m \beta_i L_{sum.avail,i})$$

Donde $PET_{i,m}$ es la evapotranspiración potencial mensual,

$$PET_{i,m} = K_{c,i,m} \times ET_{0,i,m}$$

$L_{sum.avail,i}$ se define recursivamente por (figura 15),

$$L_{sum.avail,i} = \sum_{j \in \{neighbor\ pixels\ draining\ to\ pixel\ i\}} p_{ij} \cdot (L_{avail,j} + L_{sum.avail,j})$$

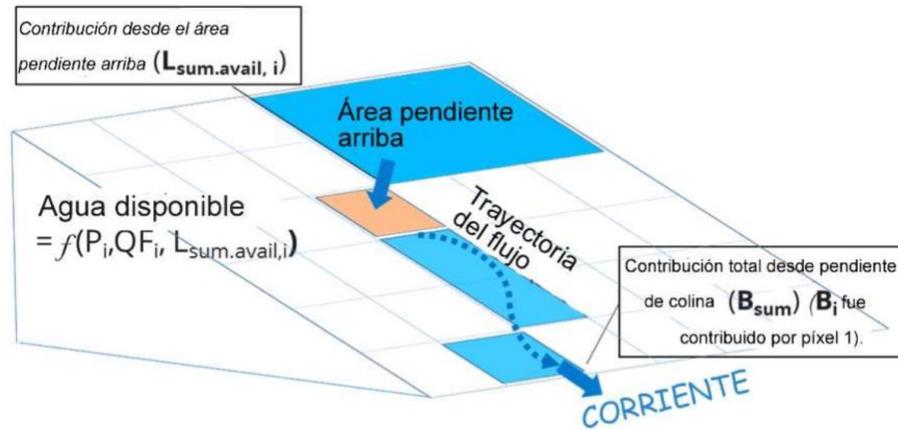


Figura 15. Modelo de la generación de flujo base o real y posible trayectoria, estimando el agua disponible considerando la precipitación (P), los flujos rápidos (QF) y la recarga local (L) tomado de (Sharp, 2018)

donde $p_{ij} \in [0,1]$ es la proporción del flujo de la celda i a j , y $L_{avail,i}$ es la recarga disponible a un píxel, el cual es L_i siempre que L_i es negativo, y una proporción γ de L_i siempre que es positivo (a continuación la definición de γ):

$$L_{avail,i} = \min(\gamma L_i, L_i)$$

En lo que está arriba:

- P_i y $P_{i,m}$ son respectivamente la precipitación anual y mensual [mm]
- QF_i y $QF_{i,m}$ son los índices de flujo rápido, definidos arriba [mm]
- $ET_{0,i,m}$ es la evapotranspiración de referencia para el mes m [mm]
- $K_{c,i,m}$ es el factor de cultivo mensual para los usos de suelo y cobertura vegetal (lulc) del píxel
- α_m es la fracción de la recarga anual media pendiente arriba que está disponible para el mes m (por defecto es 1/12)
- β_i es la fracción del subsidio pendiente arriba que está disponible para la evapotranspiración pendiente abajo (por defecto es 1)
- γ es la fracción de la recarga del píxel que está disponible para los píxeles pendiente abajo (por defecto es 1)

Atribución de recarga: El flujo base total, Q_b (en mm), es el promedio de las recargas contribuyentes locales (negativas o positivas) en la captación,

$$Q_b = \frac{\sum_{k \in \{\text{píxeles en la captación}\}} L_k}{n_{\text{píxeles en la captación}}}$$

El valor de atribución a un píxel es la contribución relativa de la recarga local L sobre ese píxel al flujo base Q_b :

$$V_{R,i} = \frac{L_i}{Q_b \times n_{\text{pixels in catchment}}}$$

Índice de flujo base (B). Corresponde a un flujo de agua con tiempos largos de residencia en la cuenca (meses a años), posterior a los eventos de precipitación o el agua que llega a los flujos durante la temporada seca. Estima la contribución real de un píxel al agua que llega a la corriente, estimando el agua disponible y la topografía. Los valores de este índice son mayores o igual a 0, el valor 0 indica que no se generó una contribución al flujo a partir de ese píxel. Si el píxel contribuyó a la recarga de agua subterránea, entonces B es una función de la cantidad de flujo que sale del píxel y de la contribución relativa a la recarga de este píxel.

Para un píxel que no está adyacente al canal de la corriente, el flujo base acumulativo, $B_{sum,i}$, es proporcional al flujo base acumulativo que sale de los píxeles adyacentes pendiente arriba, menos el flujo base acumulativo que se generó en ese mismo píxel pendiente abajo (figura 15):

$$B_{sum,i} = L_{sum,i} + \sum_{j \in \{\text{cells to which cell } i \text{ pours}\}} \left\{ \begin{array}{l} p_{ij} \left(1 - \frac{L_{avail,j}}{L_{sum,j}} \right) \frac{B_{sum,j}}{L_{sum,j} - L_j} \text{ if } j \text{ is a nonstream pixel} \\ p_{ij} \text{ if } j \text{ is a stream pixel} \end{array} \right\}$$

En la salida de la cuenca (o en cualquier píxel adyacente a la corriente), la suma de la generación de flujo base $B_{sum,i}$ sobre todos los píxeles pendiente arriba es igual a la suma de la generación local sobre los mismos píxeles (porque no hay más oportunidades para que el flujo lento se consuma antes de llegar a la corriente):

$$B_{sum,outlet} = L_{sum,outlet}$$

donde $L_{sum,i}$ es la recarga acumulativa corriente arriba definida por:

$$L_{sum,i} = L_i + \sum_{j, \text{ all pixels draining to pixel } i} L_{sum,j} \cdot p_{ji}$$

Y el flujo base, B_i puede derivarse directamente de la proporción del flujo base acumulativo que sale de la celda i , con respecto a la recarga disponible para la recarga acumulativa corriente arriba:

$$B_i = \max \left(B_{sum,i} \cdot \frac{L_i}{L_{sum,i}}, 0 \right)$$

No se cuenta con la información requerida para calcular valores de CN y K_c mensuales y/o por etapa fenológica, por lo que no hace parte de los objetivos de este estudio. Se usan valores generalizados para los diferentes usos y cobertura del suelo, que además ha sido previamente probados durante el desarrollo y mejoramiento de los modelos.

Limitaciones del modelo

Al igual que sucede con todos los modelos de la paquetería de InVEST, el modelo de rendimiento hídrico estacional utiliza un enfoque simplificado para las estimaciones de los flujos rápidos y base, excluyendo muchas de las complejidades que implica el movimiento del agua a través de una región. Por una parte, el cálculo del flujo rápido se basa en el NC sin tomar en cuenta la topografía. En el caso del cálculo del flujo base, se utilizan ecuaciones simplificadas respecto a la escala temporal como espacial, de ahí que la incertidumbre sobre los valores obtenidos aumente significativamente. Por ello la guía del usuario, reconoce que esto dificulta la validación de los resultados observados y recomienda explícitamente no tomar los valores como absolutos. A partir de los resultados de los índices puede identificarse la aportación relativa que determinado grupo de píxeles o parcelas, hacen a los flujos, permitiendo establecer zonas o puntos prioritarios para estudios más profundos (Sharp, 2018; Natural Capital Project, 2022).

Si bien el modelo se ha utilizado en evaluaciones que han llevado a toma de decisiones sobre la gestión de cuencas en lugares como China, Perú y Myanmar (Mandle L, 2017; Myanmar., 2018; Hamel, 2020), no han profundizado en el nivel de precisión del modelo. Hamel y colaboradores contrastaron la evaluación de dos cuencas de diferentes dimensiones utilizando el modelo de rendimiento hídrico estacional de InVEST y el modelo SWAT, concluyendo que el uso del modelo InVEST es apropiado para hacer evaluaciones rápidas en cuencas pequeñas o subcuencas (<10,000 Km²), sugiriendo comparar en la medida de lo posible los resultados del modelo InVEST con datos observados o contrastando con modelos alternativos (Hamel, 2020).

Insumos

A continuación se enlistan los insumos geoespaciales requeridos por el modelo (tabla 4); la obtención y procesamiento de los mismo se ha hecho conforme lo indican las guías de usuarios de los modelos InVEST (Sharp, 2018; Natural Capital Project, 2022) y [video tutorial](#) de introducción al modelo de rendimiento hídrico estacional (Natural Capital Project (NatCap), 2021).

Tabla 4. Fuentes de información geoespacial

Parámetro	Material	Temporalidad	Resolución espacial	Fuente
Precipitación mensual (1 raster por mes, formato TIFF)	Historical monthly weather data (TIFF)	2010-2018	2.5 min (21 km ²)	WorldClim (Harris, 2014)
Evapotranspiración (1 raster por mes, formato TIFF)	Global Reference Evapotranspiration (ETO) Database v3 (TIFF)	1970-2000	30 arc sec (~900 m, 1 km en el Ecuador)	CGIAR-Global Aridity and PET Database (Zomer, 2022)
Modelo Digital de elevación (formato TIFF)	Continuo de Elevaciones Mexicano – Jalisco (TIFF)	2013	15x15 m	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2013)
Cobertura y uso de suelo (formato TIFF)	Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, serie VII (shapefile)	2021	1:250 000	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021)
	Imágenes satelitales	2023	3 m	Planet
Grupo hidrológico del suelo (formato TIFF)	Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling (TIFF)	2018	250 m	Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center (ORNL DAAC NASA) (Ross, 2020)
Área de interés	Subcuenca RH15Ca – R. Tomatlán Edición 2.0	2010	1:50 000	INEGI (CONAGUA, 2010)

Procesamiento y Calibración

Para el procesamiento y preparación de la información espacial, se utilizó el software ArcGIS Pro3.0.3 de ESRI. Se ha establecido el sistema de proyección UTM N13 WGS84 para todas las capas y el mismo tamaño de celda que el modelo digital de elevación (15x15 m) para la información en formato ráster utilizando la herramienta de geoprocésamiento Proyectar Raster de ArcGIS Pro, que entre los parámetros permite establecer el tipo de técnica de remuestreo y el tamaño de celda de salida. La guía de usuario InVEST indica que al reproyectar cualquier capa en ArcGIS se debe utilizar la técnica de remuestreo de interpolación bilinear o convolución cúbica para evitar que se cree un patrón de cuadrícula incorrecto (Sharp, 2018; Natural Capital Project, 2022). Todas las capas utilizadas fueron acotadas a la superficies de la subcuenca. Respecto a la calibración del modelo, la guía de usuario recomienda validar los resultados obtenidos con datos observados o mediante el contraste con los resultados obtenidos de otros modelos, en la medida que cualquiera sea posible (Sharp, 2018). En este trabajo se toma la Red Hidrográfica Escala 1:50 000 Edición 2.0 (CONAGUA, 2010), como dato de referencia para contrastar y validar la creación de flujos consistentes en el ráster de salida denominado “stream.tif”.

Se utiliza la versión 3.13.0 del paquete de modelos InVEST disponible en el sitio de Natural Capital Project (Natural Capital Project, 2022). La información debe organizarse bajo una estructura de directorios, a fin de ser fácilmente consumida por el modelo. A continuación, se enumeran y describen los requerimientos del modelo:

a) *Directorio de trabajo*

Debe establecerse una carpeta específica como espacio de trabajo, en la cual se escriban las salidas del modelo.

b) *Sufijo de identificación (opcional)*

Considerando usar un solo espacio de trabajo, se sugiere establecer un sufijo para cada ejecución a fin de diferenciar los resultados obtenidos, de lo contrario se sobrescribirán.

c) *Directorio Precipitación*

Debe designarse una carpeta específica para almacenar únicamente los 12 archivos .tif correspondientes a la precipitación mensual. El nombre de cada archivo de terminar con el número del mes.

d) *Directorio Evapotranspiración (ETo)*

Debe designarse una carpeta específica para almacenar únicamente los 12 archivos .tif correspondientes a la evapotranspiración mensual. El nombre de cada archivo de terminar con el número del mes.

e) *Modelo Digital de Elevación (MDE)*

Es importante contar con el modelo digital de elevación de mayor resolución disponible y asegurarse de rellenar los posibles “sumideros” y que no falten datos. Se recomienda utilizar la herramienta de Análisis Espacial de ArcGIS Rellenar (Sharp, 2018). Esta herramienta conjunta las capacidades de las herramientas de Flujo focal, Dirección de flujo, Sumidero, Cuenca hidrográfica y Relleno zonal para ubicar y rellenar sumideros o eliminar celdas espurias (picos de mayor elevación de lo esperado) (figura 16), dada la tendencia de la superficie circundante (ESRI, 2023).

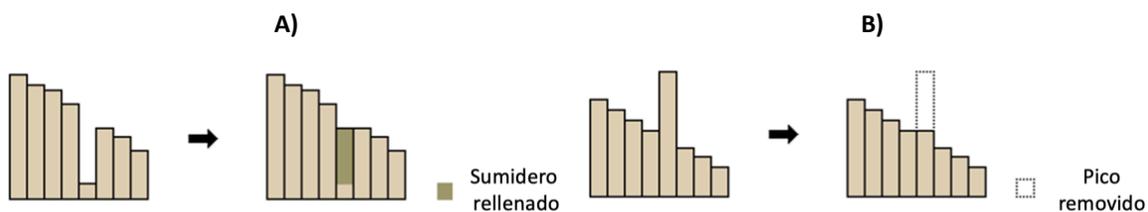


Figura 16. Perfil Perfil de un sumidero A) y perfil de un pico B), antes y después de ejecutar la herramienta Rellenar (ESRI, 2023).

f) *Cobertura y uso de suelo*

Se construyó la capa ráster a partir del Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, serie VII 2018 del INEGI (INEGI, 2021)(figura 17). El sistema conceptual de clasificación se construyó simplificando el sistema de INEGI (tabla 5), tomando como referencia el listado de clases propuesto en la documentación del modelo InVEST. Esto permite relacionar las clases presentes dentro del área de interés con el valor de

coeficiente de evapotranspiración del cultivo (K_c) y número de Curva (NC) publicados por las fuentes validadas y por tanto recomendadas por el proyecto Capital Natural. Cada valor en el ráster se relaciona a un registro en la tabla de referencias biofísicas (tabla 6).

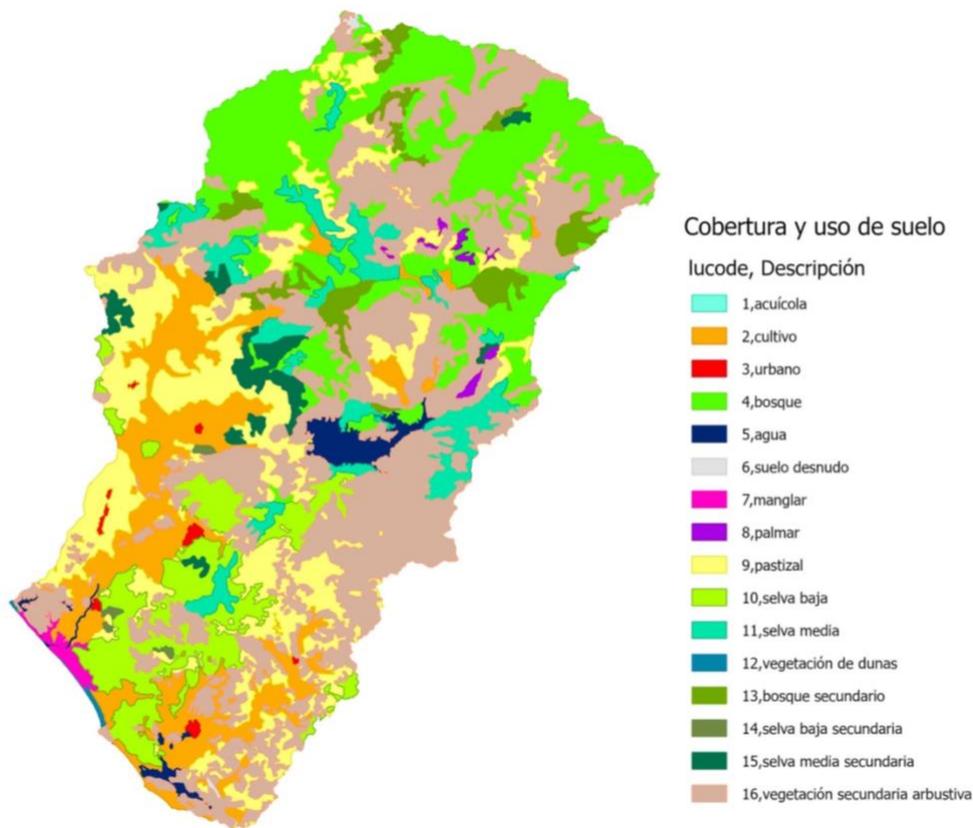


Figura 17. Cobertura y uso de suelo presentes en la subcuenca, la clasificación fue simplificada a partir del Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, serie VII 2018 del INEGI 2021.

g) Tabla de referencias biofísica

Como se menciona en el punto anterior, esta tabla debe contener un registro correspondiente a cada valor numérico establecido en el ráster de cobertura y uso de suelo. A continuación, se describe la estructura de campos que debe presentar esta tabla en formato CVS separado por comas:

- lucode. Valor numérico (entero único) para cada clase del ráster de cobertura y uso de suelo
- CN_A, CN_B, CN_C, CN_D. Valores de número de curva entero (NC) para cada combinación de tipo de suelo y clase de lucode. El valor debe ser diferente de 0.
- K_{c_1} , K_{c_2} ... K_{c_11} , K_{c_12} . Coeficiente del cultivo/vegetación (K_c), se expresa como valor de punto flotante para cada lucode. El valor del coeficiente describe un comportamiento anual o por temporada de desarrollo completo, pero es posible calcular el coeficiente específico por mes, si se conocen la fenología de la de la vegetación regional y variaciones climáticas. El dato de mes se indica por el número en el nombre de la columna.

Los valores de K_c se obtuvieron de la tablas elaboradas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Allen G., 1998; NRCS, ARS, 2004) y son los usados como información base para el desarrollo de los modelos InVEST. No se conocen los valores de K_c mensuales por lo que se usa el valor de desarrollo completo establecido por la USDA (NRCS, ARS, 2004).

Tabla 5. Simplificación del sistema conceptual del Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, serie VII 2018 del INEGI 2021, para la conformación de 16 clases simplificadas asociadas a un código de uso de suelo (lucode por su referencia en inglés)

lucode	Descripción (simplificada)	Clase Serie VIII 2018
1	acuícola	ACUÍCOLA
2	cultivo	AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL
		AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE
		AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE
		AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE
		AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE
		AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL
		AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE
		AGRICULTURA DE TEMPORAL PERMANENTE
3	urbano	ASENTAMIENTOS HUMANOS
4	bosque	BOSQUE DE ENCINO
		BOSQUE DE ENCINO-PINO
		BOSQUE DE GALERÍA
		BOSQUE DE PINO
		BOSQUE DE PINO-ENCINO
		BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA
5	agua	CUERPO DE AGUA
6	suelo desnudo	DESPROVISTO DE VEGETACIÓN
7	manglar	MANGLAR
8	palmar	PALMAR NATURAL
9	pastizal	PASTIZAL CULTIVADO
		PASTIZAL INDUCIDO

10	selva baja	SELVA BAJA CADUCIFOLIA
		SELVA BAJA SUBCADUCIFOLIA
11	selva media	SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA
12	vegetación de dunas	VEGETACIÓN DE DUNAS COSTERAS
13	bosque secundario	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
14	selva baja secundaria	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
15	selva media secundaria	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA
16	vegetación secundaria arbustiva	VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA
		VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA

Tabla 6. Tabla de referencia biofísica construida para el estudio

lucode	description	Kc_1	Kc_2	Kc_3	Kc_4	Kc_5	Kc_6	Kc_7	Kc_8	Kc_9	Kc_10	Kc_11	Kc_12	CN_A	CN_B	CN_C	CN_D
1	wetland	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1	1	1	1
2	crop	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	43	65	76	82
3	urban	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	77	85	90	92
4	forest	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	30	55	70	77
5	water	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1	1	1	1
6	barren	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	77	86	91	94
7	mangrove	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	98	98	98	98
8	palm	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	30	51.5	67.5	75
9	grassland	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	49	69	79	84
10	low jungle	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	30	55	70	77
11	mid jungle	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	30	55	70	77
12	coastal dunes	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	49	69	79	84
13	secondary forest	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	30	55	70	77
14	secondary low jungle	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	30	55	70	77
15	secondary mid jungle	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	30	55	70	77
16	shrubby secondary vegetation	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	30	51.5	67.5	75

h) Grupo hidrológico del suelo

El modelo opera considerando los 4 grupos hidrológicos definidos por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (USDA, NRCS, 1986), por lo que la guía de uso advierte que al utilizar la capa HYSOGs250m como insumo, las letras que definen los grupos de suelo, deben traducirse a valores numéricos, A=1, B=2, C=3 y D=4 al preparar el raster. Mismo proceso debe aplicarse a los pixeles con valores duales. Dentro de la subcuenca se presentan los suelos con valores C, D, C/D y D/D, reasignando el valor del pixel como se indica en la tabla 7.

Tabla 7. Tabla de valores correspondientes a los grupos hidrológicos de suelo (Ross, 2020)

Valor asignado al píxel	Grupo hidrológico	Descripción
1	A	Bajo potencial de escurrimiento (>90% arena y <10% de arcilla)
2	B	Potencial moderadamente bajo de escurrimiento (50 - 90 % de arena y 10-20 % de arcilla)
3	C	Potencial moderadamente alto de escurrimiento (<50 % de arena y 20 – 24% de arcilla)
4	D	Alto potencial de escurrimiento (<50 % de arena y >40% de arcilla)
1	A / D	Alto potencial de escurrimiento, a menos que sea drenado (>90 % de arena y <10% de arcilla)
2	B / D	Alto potencial de escurrimiento, a menos que sea drenado (50 - 90 % de arena y 10 - 20 % de arcilla)
3	C / D	Alto potencial de escurrimiento, a menos que sea drenado (<50% de arena y 20 - 40 % de arcilla)
4	D / D	Alto potencial de escurrimiento, a menos que sea drenado (<50% de arena y >40 % de arcilla)

i) *Tabla de evento de lluvia*

Esta tabla en formato CVS separado por comas, presenta el número promedio de eventos de lluvia ocurridos durante el año cada mes. Un evento de lluvia se identifica a partir de >0.1 mm. El mes debe ser indicado en un valor numérico entero, mientras que el número de eventos de lluvia debe ser indicado en valores enteros o usar coma para separar los decimales.

Generalmente los servicios de meteorológicos registran los datos de precipitación como información acumulada por mes/año y generan promedios indicativos para los mismos periodos, pero no ofrecen información sobre el número de eventos de lluvia. Los datos utilizados en este estudio (tabla 8) fueron obtenidos del portal de la compañía meteoblue (meteoblue, 2015), para la localidad de Campo Acosta, ubicada a 4 km del borde de LPX, dentro de la subcuenca (figura 18). Corresponden a datos obtenidos mediante el modelo NEMS30 de escala global (resolución 3km, 168horas), basado en los modelos NMM (Nonhydrostatic System) desarrollado por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés). El modelo se alimenta de datos observados de estaciones meteorológicas locales, datos históricos desde 1985 y observaciones satelitales del dataset CHIRPS2 (Climate Hazard group Infrared Precipitations with Stations) desarrollado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID por sus siglas en inglés) y Famine Early Warning Systems Network (Funk, 2015).

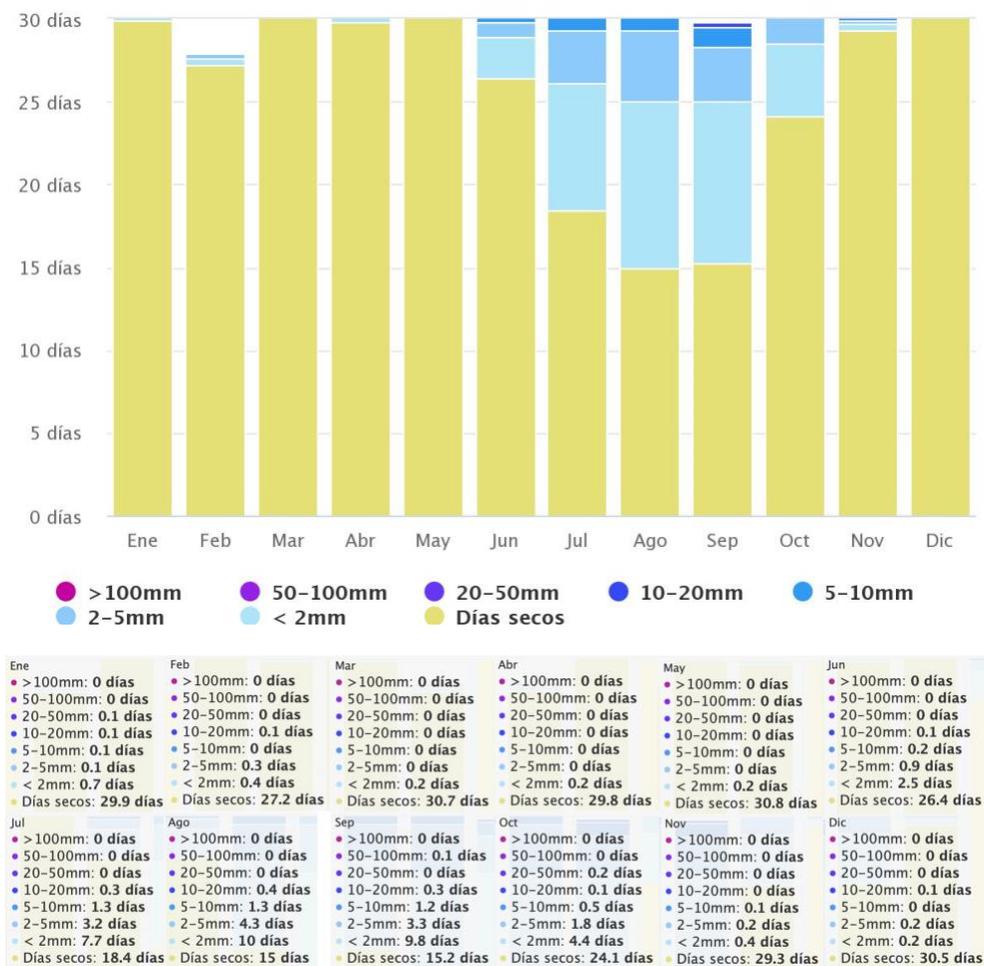


Figura 18. Diagrama de precipitación para Campo Acosta muestra cuántos días al mes, se alcanzan ciertas cantidades de precipitación (meteoblue, 2023).

Tabla 8. Tabla de eventos de lluvia para la localidad Campo Acosta, construida a partir de (meteoblue, 2023)

Mes	eventos
1	1.1
2	0.8
3	0
4	0.2
5	0.2
6	3.7
7	12.5
8	16
9	14.7
10	7
11	0.7
12	0

j) Valor de umbral de acumulación de flujo (VUA)

Este es un valor entero que hace referencia al número de celdas en sentido descendiente que deben fluir en un píxel para lograr generar una secuencia o flujo. No hay valor definido o correcto, este debe ser determinado específicamente para el terreno de la zona de interés. Valores altos de VUA crearan una red de flujos con menos tributarios, mientras que valores más bajos modelaron una red extensa de tributarios. La documentación indica iniciar un valor de 1000 para comenzar la calibración y contrastar el ráster stream, un elemento intermedio de salida del modelo, con un mapa de corrientes oficial. Se utilizó la Red hidrográfica de la subcuenca, escala 1:50 000 (CONAGUA, 2010), la cual se representa correctamente utilizando un valor de 1000, determinando un valor de 4500 como el de mejor representación de los flujos verdaderos o principales.

Los siguientes son parámetros del modelo que utilizan valores predefinidos, dado que son utilizados con fines de investigación y calibración.

k) Parámetro Alpha_m

Indica la proporción de recarga local anual de la parte alta de la cuenca, disponible cada mes. Valor definido por defecto: 1/12

l) Parámetro Beta_i

Proporción del subsidio corriente arriba que está disponible para la evapotranspiración corriente abajo. Valor definido por defecto: 1

m) Parámetro Gamma

Proporción de recarga local por píxel que está disponible para los píxeles corriente abajo. Valor definido por defecto: 1

RESULTADOS

En la figuras 19 y 20 se muestran los insumos espaciales procesados para alimentar la herramienta InVEST. Todas las capas utilizadas fueron acotadas a la superficies de la subcuenca RH15Ca, subcuenca a la que esta asociada LPX.

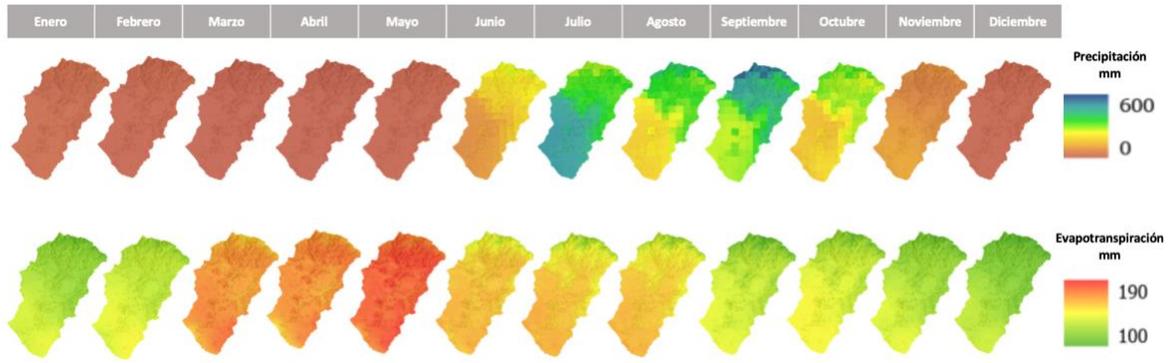


Figura 19. Insumos tipo ráster: Precipitación promedio mensual WorldClim (Harris, 2014). Evapotranspiración potencial por mes CGIAR-Global Aridity and PET Database (Zomer, 2022)

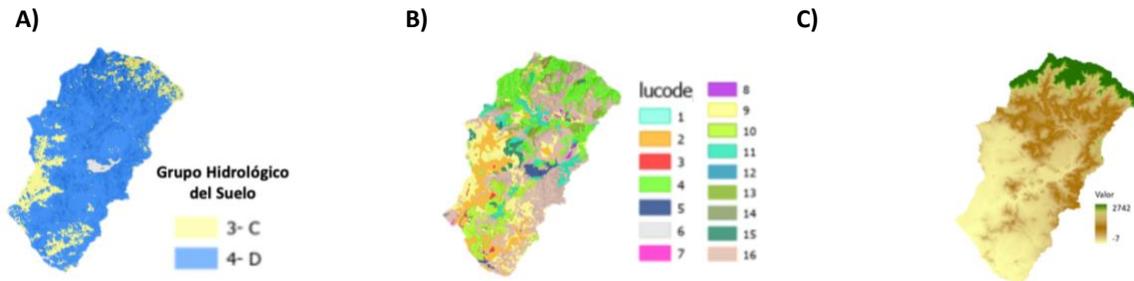
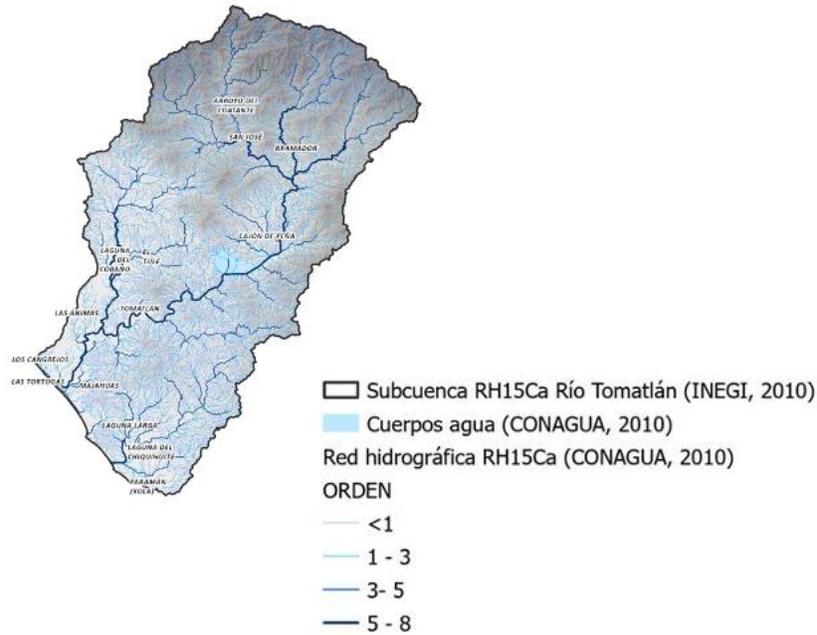


Figura 20. Insumos tipo ráster: A) Grupo hidrológico del suelo (ORNL DAAC NASA) (Ross, 2020), B) Cobertura y uso de suelo (INEGI, 2021), C) Modelo Digital de Elevación (INEGI, 2013)

El valor de umbral de acumulación de flujo se ajustó iniciando con un valor de 1000 como indica la guía del modelo e incrementando dicho valor, evaluando visualmente en cada incremento, la creación de flujos consistentes con la Red hidrográfica de la subcuenca, escala 1:50 000 (CONAGUA, 2010), en el ráster de salida denominado “stream.tif”.

A)



B)

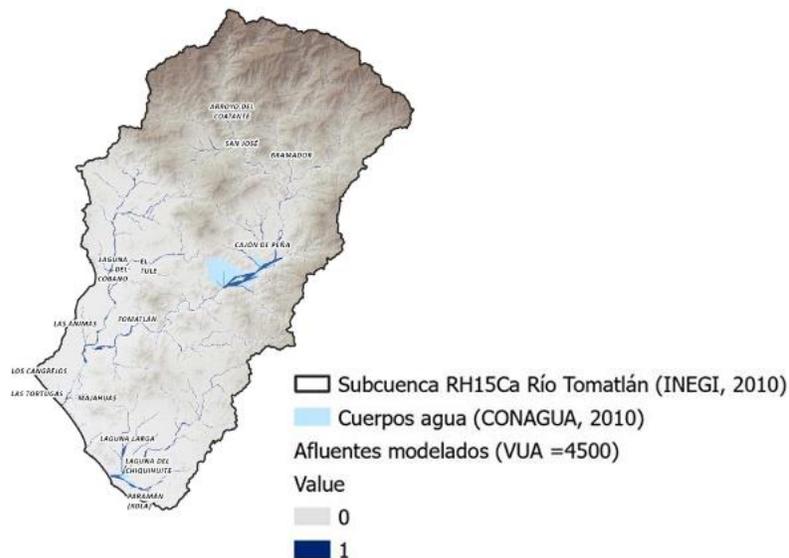


Figura 21. Comparación de la Red Hidrográfica Escala 1:50 000 Edición 2.0 (CONAGUA, 2010) y los flujos modelados “stream.tif”, usando el valor VUA = 4500

A continuación, se presentan los mapas relacionados a los 3 índices espaciales:



Figura 22. Representación gráfica del índice de Flujos rápidos (QF)

El mapa de Índice de flujo rápido (Quickflow, QF) presenta un escenario general anual. Los valores más altos de QF dibujan los flujos de agua integrados en el modelo y destacan una zona en el área superior izquierda (límite noroeste de la cuenca), que corresponde a una mina fuera de funcionamiento y se identifica como suelo desnudo. Los valores intermedios se distribuyen desde el límite superior de la subcuenca hacia la parte intermedia, mostrándose en general descendientes conforme se baja por la subcuenca, las zonas de mayor valor corresponden a vegetación de bosque y selva baja, ya sea cobertura original o secundaria. Los valores más bajos destacan desde la parte media de la subcuenca, relacionándose con uso agrícola y cobertura de pastizal principalmente. Incluso en esa parte de la subcuenca, se observan zonas de valor medio correspondientes a cobertura de selva baja ubicadas en una serie de pequeñas elevaciones que dividen transversalmente la región adyacente a la costa.

Es importante recordar que este índice no considera la topografía, solo la capacidad de generar un flujo en tiempos cortos posteriores a la precipitación. En este caso la vegetación de bosque e incluso de selva secundaria presentan mayor capacidad de generar flujos que los pastizales o las zonas agrícolas, principalmente porque se tienen periodos de lluvia más mayores y de mayor magnitud. Las zonas altas de la cuenca con temperaturas más frías y expuestas a mayor humedad, presentan los valores más altos, especialmente las zonas más conservadas de bosque de pino-encino. Al observar las capas de precipitación y evapotranspiración (figura 19) observamos los valores de precipitación que inician en Junio y se incrementan hacia Octubre, además la evapotranspiración en esa región es más baja que en el resto de la subcuenca.

El valor de mayor peso en este índice es el número de curva (NC), este valor permite de forma muy rápida, considerar las propiedades de infiltración y escurrimiento, valores altos permitirán mayor escurrimiento y menor infiltración, valores bajos lo opuesto. Otro parámetro importante en la valoración de este índice es el nivel de evapotranspiración de la zona, dado que los flujos calculados consideran el agua disponible que no se pierde por la evapotranspiración (Sharp, 2018). Los valores de NC y coeficiente del cultivo (K_c), han sido construidos principalmente para la gestión de los riegos agrícolas, por lo cual los valores disponibles para otros tipos de cobertura vegetal que no sean cultivos son generalizados a pastos, vegetación arbustiva o bosques. Establecer valores de NC y K_c muy específicos o detallados para los tipos de cobertura por mes, no es parte de los objetivos de este estudio y no se cuenta con la información requerida para dicho cálculo. Si bien se generalizó la estructura conceptual original del INEGI para poder utilizar los valores disponibles, se mantuvo la diferenciación de comunidades vegetales conservadas u originales, a fin de diferenciar su papel de aquellas coberturas modificadas. Se observa que las diferencias de resolución afectan algunas regiones más que otras, especialmente la baja resolución del insumo de precipitación, generando límites en las parcelas resultantes no asociados con atributos naturales.

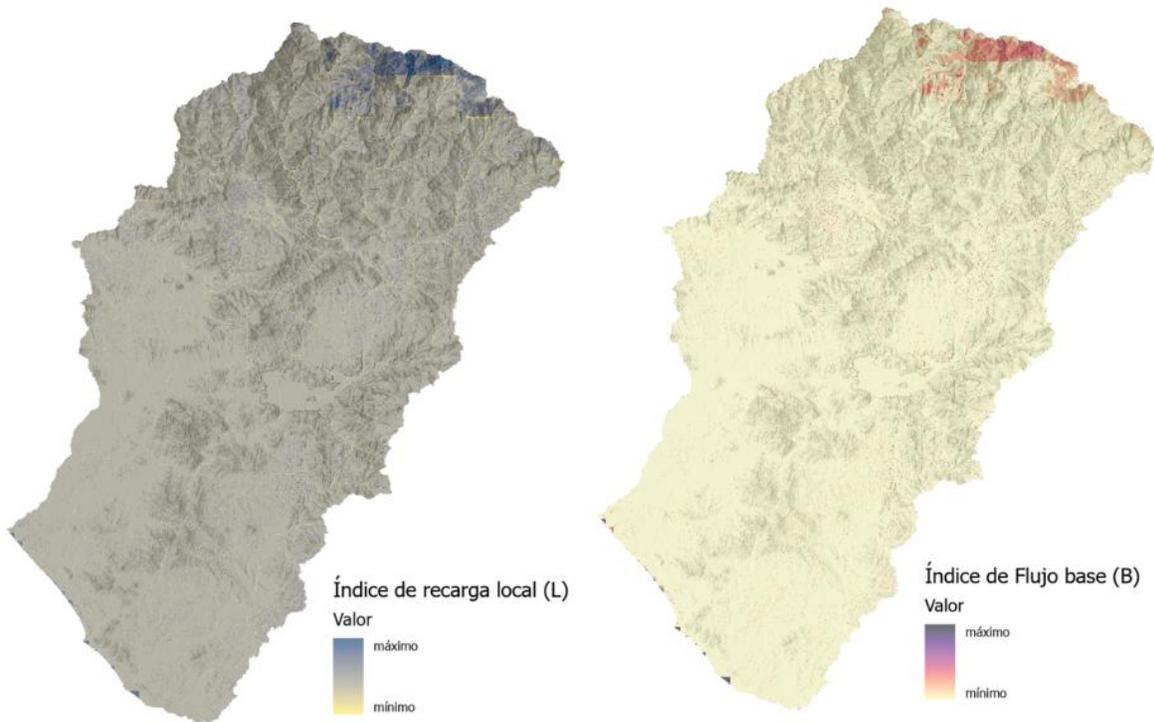


Figura 23. Representaciones gráficas de los índices de Recarga local (L) y Flujo base (B)

Los índices de recarga local (L) y de flujo base (B), los valores más altos definen una región o parcela en la zona alta de la cuenca, donde se presenta una zona de bosque de pino-encino más conservado y en recuperación (según la clasificación original de INEGI). Esta cobertura coincide con un tipo de suelo del grupo C, con potencial moderadamente alto de escurrimiento, lo que quiere decir que el agua puede moverse a través de él con un poco de restricción, debido a presentar un porcentaje ligeramente mayor de arena que de arcilla. El suelo del grupo hidrológico D es el predominante en la cuenca, con un alto potencial de escurrimiento, gracias a su mayor contenido de arcilla (ver figura 20 para apreciar la distribución de los grupos hidrológicos de suelo). Una mayor cantidad de arcilla hace que una vez saturado el suelo, ya no se permita más infiltración (Ross,

2020). En estas capas nuevamente se observa que la baja resolución del insumo de precipitación afecta la delimitación de la parcela de mayor contribución, al crearse límites no asociados con atributos naturales.

En términos generales, la relación entre la precipitación regional y la alta evapotranspiración es el mayor limitante para la hidrología de la subcuenca y por tanto para la alimentación del vaso lacustre de LPX. La laguna se encuentra en una región de alta evapotranspiración, con un promedio de 720 mm anuales de precipitación contra 1, 715.2 mm promedio de evaporación anual (Navarro Rodríguez, 2022; SEMADET, 2015). Se ha perdido gran parte de la cobertura vegetal de la selva baja caducifolia, que en conjunto con tipos de suelo de alta escorrentía, lo que en conjunto no permiten que existan zonas de recarga hídrica, más allá de aquella identificada en la zona más alta.

Observando los flujos modelados así como aquellos publicados por CONAGUA, se identifica que la red hidrológica de la subcuenca (Río Tomatlán), que se conecta con las zonas altas de recarga, no alimenta a LPX (figura 24). Los afluentes que llegan a LPX no son flujos de alto nivel, cuya aportación no es suficiente para regular la apertura de la boca. Esta observación confirma lo reportado por Navarro y colaboradores, quienes destacan que la principal característica de esta laguna hipersalina es que no cuenta con un aporte permanente de agua dulce, siendo el arroyo derivado del sistema Laguna Larga el más significativo. Sin embargo ambos sistemas dependen de los ciclos pluviales. Navarro y colaboradores, reportan dos aperturas de la boca entre los años 2009 y 2017, ambos relacionados a la presencia de huracanes: huracán Jova en octubre de 2011 y huracán Patricia en marzo de 2015 (Navarro Rodríguez, 2022).

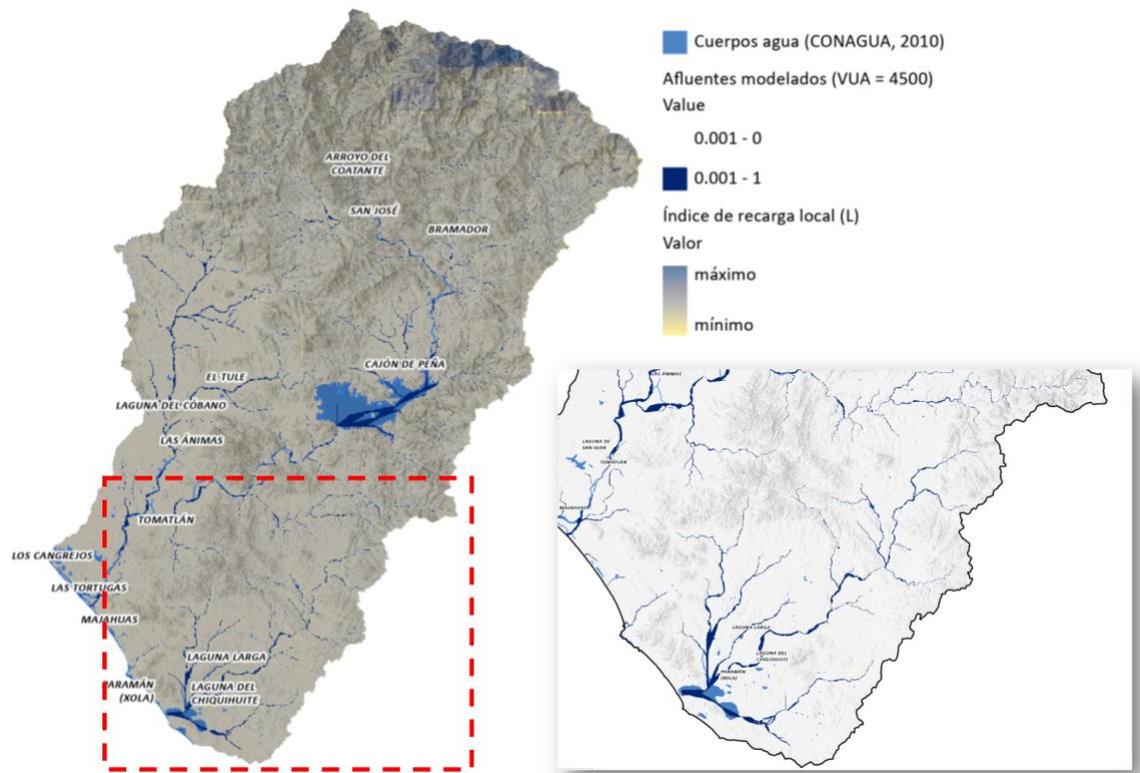


Figura 24. Identificación de los flujos hidrológicos en la subcuenca RH15Ca

La figura 25 muestra los flujos rápidos por mes, indicando el valor del índice expresado en milímetros (mm). En los resultados obtenidos se observa que la magnitud de los flujos y su estacionalidad, concuerdan con el régimen de lluvias en verano (junio a septiembre).

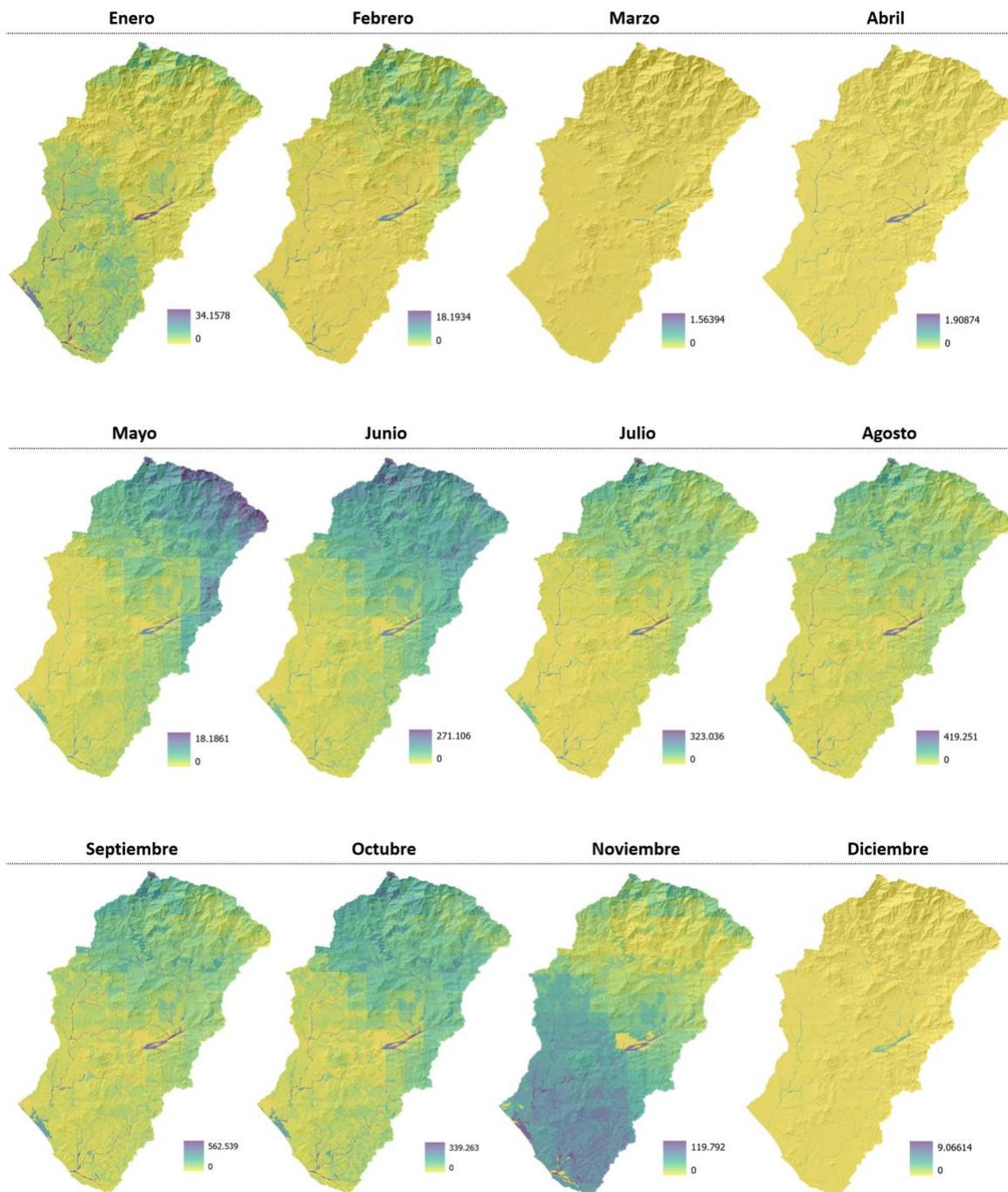


Figura 25. Flujos rápidos (QF) mensuales. Los valores están expresados en milímetros (mm)

DISCUSIÓN

Se conformó el conjunto de datos necesario para utilizar el modelo, logrando obtener datos de salida espacialmente consistentes con los datos de referencia. Los resultados obtenidos son un modelo de los flujos rápidos, flujos de recarga y flujos base, que cuantifican la contribución relativa de cada parcela a la generación de corrientes de agua y su distribución en el espacio. Se presenta un escenario general que refleja los efectos que ha tenido el cambio histórico de uso y cobertura de suelo de la subcuenca Río Tomatlán A de la Cuenca RH15-C Tomatlán-Tecuán, sobre la dinámica hidrológica y por tanto en el suministro de agua disponible durante el año, para cubrir las demandas ambientales y humanas (rendimiento hídrico estacional). Esta información es útil para comparar los dos escenarios de manejo planteados por los autores consultados en este trabajo y contribuir a la rehabilitación de la LCCIM Paramán-Xola (LPX).

Considerando que este modelo está basado en el análisis espacial, alimentándose y generando salidas tipo mapa, la documentación alerta que los valores obtenidos no deben interpretarse como valores absolutos de forma general. A partir de los resultados de los índices puede identificarse la aportación relativa que determinado grupo de píxeles o parcelas, hacen a los flujos, permitiendo establecer zonas o puntos prioritarios para estudios más profundos (Sharp, 2018; Natural Capital Project, 2022).

El diferencial de resoluciones de los diferentes insumos generaliza los resultados a nivel de subcuenca y genera límites artificiales en algunas zonas los mapas obtenidos. Como un siguiente paso, se requiere obtener o construir insumos de mayor resolución, como una clasificación de usos de suelo y cobertura vegetal de la subcuenca, a partir de imágenes satelitales de alta resolución. De esta forma se lograrían tener un análisis más cuantitativo que cualitativo de los resultados y construir escenarios de gestión más específicos.

La dinámica hidrológica subcuenca en conjunto es importante para el correcto funcionamiento ecológico de los ecosistemas costeros, el escenario general muestra que en este caso no se presentan aportaciones de relevancia a LPX para permitir la apertura regular de la boca y con una evapotranspiración constantemente superior a la precipitación. Testimonios locales describen a la laguna como “muerta” debido a que la barra ha permanecido cerrada consistentemente. Solo eventos extraordinarios, como los huracanes, han logrado reabrir la barra derivado del incremento significativo en la precipitación que estos conllevan, incluso provocando la inundación de algunas zonas habitadas (Czitrom S. G.-F., PDP). Navarro y colaboradores hicieron el registro de dos eventos de apertura de la boca entre los años 2009 y 2017, la primera se relaciona al huracán Jova en octubre del 2011 (precipitación de 440 mm) y la segunda generada por una precipitación extraordinaria de 299 mm en marzo del 2015. Ese año la boca permaneció abierta durante ocho meses, debido a los efectos del huracán Patricia, ocurrido en octubre de 2015 (Navarro Rodríguez, 2022)

ESCENARIO DE GESTION DE USOS DE SUELO Y COBERTURA VEGETAL

Los programas de manejo comunmente toman al agua como el centro de acción para incrementar servicios ambientales, incluyen conservación o restauración de algunos tipos de usos de suelo o cobertura vegetal, dada su ubicación y/o enfoque de gestión, esto acompañado de la adopción de prácticas de manejo acordes al resultado buscado (Brauman, 2015).

El plan de Conservación y Manejo (PCyM) de LPX como humedal de importancia internacional, resalta la necesidad de mantener los ecosistemas para favorecer la retención de humedad, recarga del acuífero y prevención de la erosión. Señala al asolvamiento como el principal generador de problemas ambientales en la laguna, dado el incremento en el aporte de sedimentos. Esto como consecuencia de la deforestación y cambio de uso de suelo en la subcuenca generados por la mala planeación y auge del desarrollo de la región (SEMADET, 2015).

El PCyM establece la necesidad de reforestación de la selva media y baja de la parte media y alta de la subcuenca, para crear zonas de recarga donde nacen los afluentes que llegan a LPX. Cualquier trabajo de reforestación enfocado a restauración de humedales, debe estar planeado con fines de rehabilitar en la medida de lo posible las condiciones hidrológicas, considerando las alteraciones que las actividades humanas generan sobre la estructura y composición de la vegetación, así como del funcionamiento hidrológico (Flores Verdugo F. M., 2007). Por lo tanto, otro componente de este escenario deber ser la gestión de la zona agrícola actual, ya que los flujos asociados a LPX son utilizados mayormente para riego agrícola, consumo urbano y vertimiento de desechos. Si bien el uso de suelo agrícola, pecuario y/o turístico no se presentan específicamente dentro del polígono del humedal, tampoco existe un área de amortiguamiento que evite afectaciones como, por ejemplo, el escurrimiento de agroquímicos (SEMADET, 2015).

La figura 26 se enfoca mayormente a la región de los afluentes que se conectan con la laguna a fin de visualizar con mayor detalle los resultados del índice de flujos rápidos con respecto a los usos de suelo, considerando que se observó que las corrientes más relevantes de la subcuenca no alimentan a LPX.

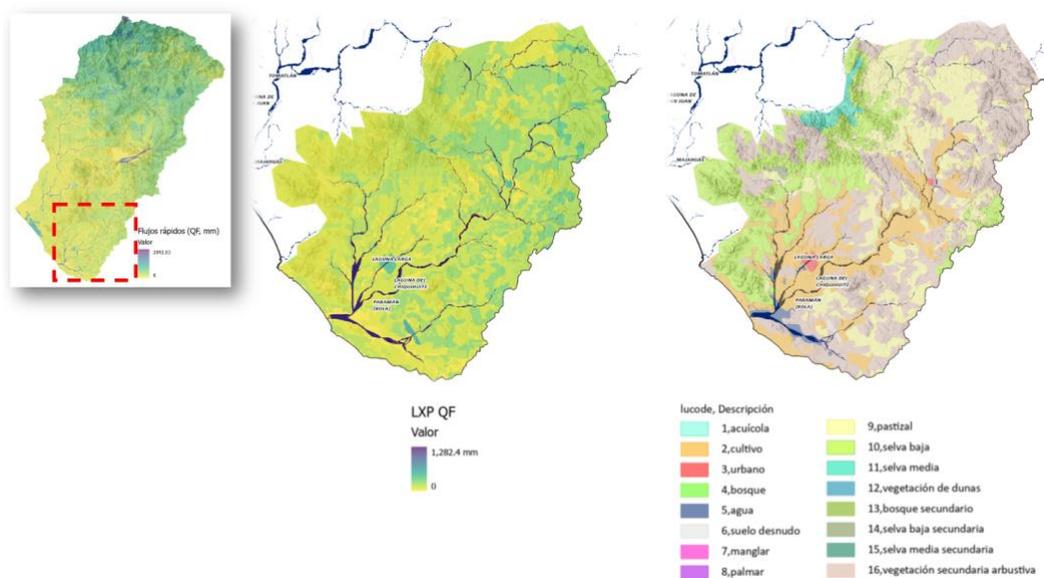


Figura 26. Contexto del escenario para la gestión de la cobertura y uso de suelo de la zona de escurrimientos pluviales provenientes de la zona media de la subcuenca.

Establecer un manejo de cuenca enfocado en la gestión del uso de suelo, requeriría la implementación de sistemas agronómicos optimizados para promover la capacidad del agroecosistema de proveer servicios de apoyo y regulación además de provisionamiento. Prácticas propias de la agricultura de conservación y orgánica, son alternativas ambientalmente más amigables que pueden incorporarse al manejo convencional. Prácticas como mínima labranza, rotación de cultivos y uso de productos de protección no sintéticos, pueden contribuir a un mejor manejo del agua, reducir cargas químicas y promover la diversidad de la biota del suelo (Wittwer, 2021). Adicionalmente, la implementación de tecnología para monitorear el uso de agua y/o la evapotranspiración en los cultivos, ayudaría a hacer mejor gestión del agua para riego. El uso de índices satelitales para monitorear la evapotranspiración, considerando la cantidad de agua disponible (QF mensual) durante el año, podría permitir establecer mejores prácticas, desde fechas de siembra más adecuadas, hasta la reducción de número de riegos. En un nivel de mayor inversión, se propondría la implementación de sistemas de riego y sensores de monitoreo, instalados en las parcelas o formando una red local (Liberata Ullo, 2020; Weiss, 2020).

Lo que da poca viabilidad a este enfoque, es el conflicto con los intereses sociales, que ha sido documentado por Czitrom y colaboradores (Czitrom S. G.-F., PDP). Al plantear la intervención del manejo de los usos de suelo actuales, se debe considerar a todos los actores involucrados a lo largo de la cuenca, ya que, si bien la intervención puede tener intenciones positivas sobre la recuperación o mantenimiento de servicios ambientales, dichos servicios pueden solo beneficiar a algunos de los habitantes. En el caso de servicios hidrológicos, el beneficio puede ser más tangible para aquellos habitantes de las partes bajas de la cuenca pero no así para aquellos que habitan las zonas altas. A estos habitantes además de informar sobre las consecuencias que tienen los manejos de la parte alta sobre la hidrología y procesos en la parte baja de la cuenca, debe otorgarse alguna compensación o incentivo, comúnmente económico, como son los pagos por servicios ambientales o los fondos de agua para garantizar su participación en la estrategia (Brauman, 2015). En el caso de LPX, además del uso agrícola, se proyecta un desarrollo importante de infraestructura, como es un aeropuerto y vialidades, para el turismo atraído al desarrollo Xala en Chalacatepec (Milenio, 2022).

ESCENARIO DE REHABILITACIÓN DE FLUJOS y/o APERTURA ARTIFICIAL DE LA BARRA

Yáñez-Arancibia y colaboradores (Yáñez-Arancibia A. D.-G.-L.-G.-G., 2014) propusieron implementar un flujo de agua dulce desde la laguna de Chalacatepec. Sin embargo, el modelo no muestra flujos que indiquen una conexión viable entre estas dos lagunas. Se requeriría ampliar el modelo a la subcuenca RH15B, a fin de poder identificar un área de conexión, aunque es poco probable, observando la topografía y la Red hidrográfica de la subcuenca, escala 1:50 000 (CONAGUA, 2010).

Otra acción planteada en el plan de manejo es el dragado de zonas críticas del vaso de la laguna y canales de marea, indicando que el beneficio sería mayor que la afectación a los organismos bentónicos, dado el grado de deterioro que ya presenta LPX (SEMADET, 2015). La descripción que Yáñez-Arancibia y colaboradores realizaron en el 2009, indica que la alta salinidad en la zona de mayor evapotranspiración en la laguna ha permitido la instalación de granjas de sal (figura 27). Proponer la entrada de agua desde la zona éste de la laguna, se opone frontalmente a la operación de la producción de sal, sumando al conflicto que existe entre pescadores y la cooperativa de la planta salinera (Czitrom S. G.-F., PDP)

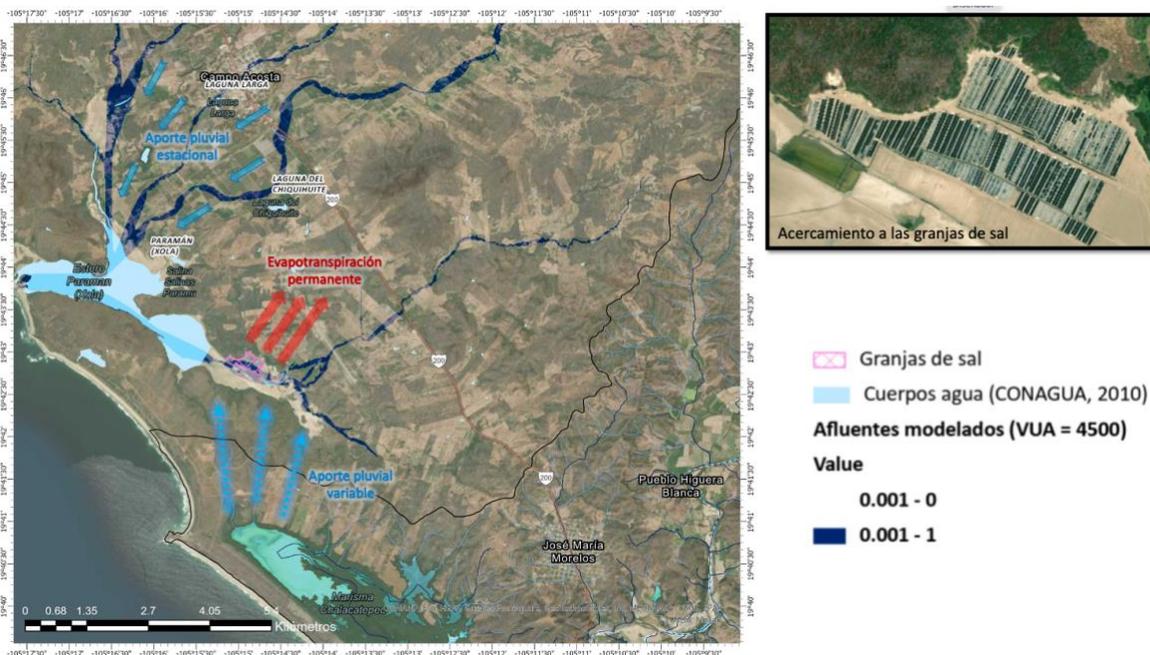


Figura 27. Contexto del escenario para la gestión de la cobertura y uso de suelo del área intermedia con la laguna de Chalacatepec. La zonificación de las variables de evapotranspiración y aportes fluviales fue tomada de (Yáñez-Arancibia A. e., 2009)

Tanto el aporte de agua dulce y como el intercambio con el mar son procesos fundamentales para recuperar y mantener la productividad de las LCCIM como es LPX. Si bien la gestión de los usos de suelo y cobertura vegetal, es la aproximación más alineada con los requerimientos ecológicos, la dinámica hidrológica no es favorable y existen diferentes puntos de contraposición con temas sociales. No todos generan un conflicto como tal, pero sí hacen más compleja la implementación, que de por sí es un escenario con resultados esperados a mediano- largo plazo.

Por tanto, la implementación de un mecanismo de apertura de la boca que no dependa de la hidrología de la subcuenca sería la manera más inmediata de regresar la dinámica a la laguna. El drenado de canales es una práctica común y resulta una solución de corta duración que no necesariamente logra su propósito, genera costos recurrentes y puede llevar a efectos adversos sobre la salinidad del sistema y por tanto en la vegetación (Serrano, 2002; McSweeney, 2023). Lograr una apertura artificial exitosa depende en gran medida de la dinámica del oleaje y mareas, ya que son determinantes en los procesos de erosión y depósito costeros (McSweeney, 2023).

Czitrom y colaboradores (pendiente de publicación), proponen la implementación del Sistema de Bombeo por energía de oleaje (SIBEO) para reestablecer la dinámica en la laguna, como una opción sustentable al funcionar con energía renovable y de bajo mantenimiento. Al tiempo que se escribe este documento, está en proceso de publicación el estudio que presenta la modelación matemática de la relación entre el volumen y la salinidad de LPX, bajo el funcionamiento del SIBEO y la relación con las variables de precipitación y evaporación. Se establece que bombeo de agua de mar hacia LPX mediante el SIBEO, permite restablecer el volumen perdido por la alta evaporación, limita las variaciones de salinidad y promueve un comportamiento típico de una LCCIM. Así mismo, permitiría establecer una solución equilibrada en términos ecológicos y socioculturales (Czitrom S. G.-F., PDP).

SOBRE EL MODELO

Todo modelo tiene limitaciones intrínsecas, además que los resultados serán tan buenos como los datos de entrada. En términos generales los modelos InVEST utilizan un enfoque simplificado de los procesos en el ecosistema, en este caso en particular los cálculos de cada índice no incluyen algunos aspectos del paso del agua a través de una región y se basan en principios hidrológicos básicos (Hamel, 2020). Por ejemplo, el cálculo de los flujos rápidos esta principalmente basado en el número de curva, pero no toma en cuenta la topografía (Sharp, 2018). Debido a ello y considerando las diferencias en la resolución de los datos de entrada, la interpretación de los resultados se enfoca en identificar la aportación relativa que determinado grupo de pixeles o parcelas, hacen a los flujos, permitiendo establecer zonas o puntos prioritarios para estudios más profundos.

Los modelos InVEST no son los únicos existentes, pero han ido tomando popularidad, implementándose en diferentes partes del mundo (figura 28). Probablemente esto se debe a que tiene el soporte de instituciones académicas muy respetadas y a que son fáciles de usar mediante una plataforma de software libre con requerimiento simples de alimentación, enfocados a situaciones donde se requiere tomar decisiones con escasa información disponible (Hamel, 2020; Halder, 2022; Brauman, 2015). Además, una vez establecidas las bases de alimentación del modelo, las múltiples iteraciones para afinar o mejorar la información de entrada, resultan más fáciles y rápidas.



Figura 28. Implementación de modelos INVEST en el mundo. Modificado de (Stanford University, 2023)

CONCLUSIONES

En el proceso de gestión ambiental la cantidad de información involucrada es muy grande, en comparación con los tiempos de respuesta considerablemente cortos, sin mencionar la carga de trabajo distribuida entre poco personal. Esta combinación lleva a que se analice solo una fracción de la información, sin entrar a detalle y que no necesariamente se verifique con trabajo en campo o no de manera exhaustiva. Por lo tanto, cuando se habla de usar la mejor información científica disponible, se hace referencia a sacar el mayor provecho de la información que se tiene a la mano. Hablamos de información científica, publicada por instituciones gubernamentales o académicas, que incluso estando disponible solo a escalas globales o regionales, ayuda a establecer escenarios generales. Esto permite identificar zonas y actividades prioritarias para realizar estudios detallados, que permitan llegar a mejores decisiones para la gestión definitiva del recurso en cuestión.

Realizar la evaluación de un sistema ambiental desde el marco conceptual de los servicios ecosistémicos, si bien reconoce la importancia de conservar o rehabilitar los ecosistemas, no deja de estar altamente enfocado en garantizar el bienestar humano. Es una realidad en los procesos de gestión ambiental, cuando las necesidades ecológicas llegan a contraponerse a los intereses humanos, estos últimos tendrán más peso para la toma de decisiones. Por ello es imperante encontrar herramientas que faciliten a los tomadores de decisiones, usar la mejor información científica disponible, para lograr un punto óptimo que permita cuidar los recursos naturales y a su vez resolver los conflictos o necesidades sociales.

Mantener los servicios ambientales asociados a un humedal, invariablemente implica mantener los flujos de agua del sistema hidrográfico, es decir la cuenca o subcuenca asociada. Es un gran reto para los tomadores de decisiones, hacer una gestión de territorio sin afectar los flujos, identificar las zonas de recarga a partir de las cuales se genera el flujo base y entender cuáles podrían ser los cambios ante usos alternativos del suelo. Los modelos especialmente explícitos pueden ser una opción viable para enfrentar estos retos. La evaluación de los servicios hidrológicos permite construir un escenario para la valoración por parte de los tomadores de decisiones, pero no necesariamente funciona como una guía para establecer acciones de gestión. La implementación del modelo de rendimiento estacional de agua de InVEST en este estudio, ha permitido construir un marco de referencia de la magnitud de los flujos hidrológicos y su distribución espacial en la subcuenca Río Tomatlán A de la Cuenca RH15-C Tomatlán-Tecuán, a la cual está asociada la LCCIM Paramán-Xola, en un tiempo muy corto. Se puede ubicar en el espacio la generalidad de la dinámica hidrológica y los intereses humanos.

Los resultados obtenidos permiten contrastar dos escenarios propuestos para fomentar la recuperación de la dinámica de la laguna, requerida para mantener los servicios ambientales. El escenario de gestión de los usos y cobertura del suelo es viable y se alinea más a los requerimientos ecológicos, su implementación es más compleja por cuestiones socioculturales y los efectos se esperarían de medio a largo plazo. El escenario de implementación de un mecanismo de apertura artificial de la boca que no dependa de la hidrología de la cuenca, se posiciona como la solución más viable en tiempo de respuesta, costo y facilitadora en los conflictos socioculturales. La instalación del sistema de Bombeo SIBEO es la opción identificada en la literatura más económica así como sostenible a largo plazo, además de por su costo, por permitir reactivar la pesca sin interponerse con la producción de sal. La reactivación de la dinámica de la laguna coadyuvará a otras acciones de restauración ecológica como la reforestación de mangle y en consecuencia favorecer la estancia y proliferación de fauna como las aves.

Se concluye que pese a la incertidumbre que conlleva el modelo del rendimiento hídrico estacional de InVEST, los resultados de este estudio suman a la búsqueda de la mejor opción que permita la rehabilitación de la LCCIM Paramán-Xola, la recuperación y mantenimiento de los servicios ecosistémicos, que a su vez permita encontrar un punto de equilibrio entre las necesidades del ecosistema y los intereses humanos. Es este el punto de partida para generar escenarios más específicos, con información más detallada que permitan tener un análisis más cuantitativo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcamo J., N. J. (2003). *Ecosistemas y bienestar humano: marco para la evaluación*. Obtenido de <http://www.millenniumassessment.org>
- Aldeco, J. S. (1994). Física. En G. C. De la Lanza (Ed.), *Lagunas costeras y el litoral mexicano*. . México: Universidad Autónoma de Baja California.
- Allen G., R. P. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* (Irrigation and drainage paper 56 ed.). Roma: FAO.
- Altieri, M. &. (2002). *Sistema agroecológico rápido de evaluación de calidad de suelo y salud de cultivos en el agroecosistema de café*. Berkeley: Universidad de California,.
- Álvarez Arellano, A. D. (1994). Lagunas costeras y el litoral mexicano: geología. En G. C. De la Lanza (Ed.), *Lagunas costeras y el litoral mexicano*. Universidad Autónoma de Baja California. México.
- Anglés Hernández, M. O. (2021). Manual de derecho ambiental mexicano. México: Universidad Nacional Autónoma de Méxioco. Instituto de Investigaciones Jurídicas.
- Arriaga Cabrera, L. e. (2009). Regiones prioritarioas y planeación de la biodiversidad. En *Capital Natural de México, Vol. II: Estado y tendencias de cambio* (págs. 433-457). México: CONABIO.
- Bales, R. (2015). Hydrology, floods and droughts. En J. P. Gerald R. North (Ed.), *Encyclopedia of Atmospheric Science* (págs. 180-184). Academic Press.
- Balvanera, P. C. (2009). Estaod y tendencia de los servicios ecosistémicos. En *Capital natural de México, Vol. II* (págs. 185-245). Ciudad de México: CONABIO.
- Berlanga-Robles, C. A.-C.-B.-L. (2010). Patrones de cambio de cobertura y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2000). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*, 72, 7-22.
- Berlanga-Robles, C. A.-L. (2008). Esquema de clasificación de los humedales de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*(66), 25-46.
- Berlanga-Robles, C. A.-L.-L.-G. (2011). Patrones de escurrimiento en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, Sinaloa, asociados a cambios de uso del suelo: Una aproximación con el modelo del número de curva. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 39-52.

- Bhaduri, B. H. (2000). Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land use change using a GIS-NPS model. *Environmental Management*, 26, 643-658.
- Bhaduri, B. M. (2001). Long-term hydrologic impact of land use change: a tale of two models. *Journal of Water Resources Planning and Management*(127), 13-19.
- Brauman, K. (2015). Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. . *Wiley Interdiscip. Rev. Water*, 2(345–358.).
- Canu, D. (2018). Assessing, quantifying an valuing the ecosystem services of coastal lagoons. *Journal for Nature Conservation*, 44(2018), 50-65.
- Capital Coalitions. (2023). *The capital approach*. Recuperado el 29 de Enero de 2023, de <https://capitalscoalition.org>
- Carter, R. W. (2002). *Coastal environments*. Londres: Academic Press.
- Casco Montoya, R. (2004). Definición de la zona costera. En *El manejo costero en México* (págs. 1-4). Campeche: Centro de Ecología, Pesquería y Oceanografía del Golfo de México.
- Comisión Estatal del Agua Jalisco. (2023). *Cuencas de Jalisco*. Recuperado el 6 de Febrero de 2023, de https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/cuencas_jalisco/
- Comisión Estatal del Agua Jalisco. (2023). *Cuencas Hidrológicas en Jalisco*. Recuperado el Febrero de 2023, de https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/cuencas_jalisco/
- CONABIO. (2022). *Biodiversidad Mexicana: Regiones marinas proritarias de México*. Recuperado el 12 de Febrero de 2023, de <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/regiones-marinas-prioritarias-de-mexico>
- CONABIO. (2023). *Enciclovida*. Recuperado el Abril de 2023, de <https://enciclovida.mx/especies/30079>
- CONABIO, California Academy of Science & National Geographic. (2022). *Naturalista*. Recuperado el 12 de Febrero de 2023, de <https://www.naturalista.mx>
- CONAGUA. (2010). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Recuperado el Febrero de 2023, de <https://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=10>
- CONAGUA. (2018). *Atlas del Agua en México* (2018 ed.). México.
- CONANP. (2018). *Estudio previo justificativo para la modificación de la declaratoria de Santuarios de playas tortugueras*. México.

- Contreras, E. F. (2004). La biodiversidad de las lagunas costeras. *Ciencias*, 76, 46-56.
- Contreras-Espinoza, F. (1993). *Ecosistemas Costeros Mexicanos*. México: CONABIO, UAM-I.
- Cotler Ávalos, H., Galindo Alcantar, A., González Mora, I. D., & Pineda López, R. F. (2013). Cuencas Hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión. Ciudad de México: SEMARNAT.
- Czitrom, S. B. (2021). Proyecto Ejecutivo- SIBEO. Restauración de las lagunas Paramán-Xola y Miniestero, municipio de Tomatlán, Estado de Jalisco, México. Jalisco, México: International Marine Cosntructors S.A. de C.V.
- Czitrom, S. B. (2021). Proyecto ejecutivo -SIBEO. Restauración de las lagunas Parmán-Xola y miniestero, Municipio de Tomatlán, Estado de Jalisco, México. México: International Marine Constructors S.A. de C.V.
- Czitrom, S. G.-F. (PDP). On the stabilizing effect of seawater pumping on coastal ICOLL ecosystems.
- Czitrom, S. P. (2010). Management proposal for an intermittently closed coastal lagoon using a wave-driven seawater pump a volume-salinity box model: coastal lagoon management using a wave-driven seawater pump. *Journal of Coastal Research*, 26(5), 947-956.
- da Silva Anjinho, P. B. (2022). Evaluation of InVEST's Water Ecosystem Service Models in a Brazilian Subtropical Basin. *Water*, 14(1559).
- de Groot, R. A. (2010). Challengues in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecol. Complex*, 7, 260-272.
- De la Lanza-Espino, G. (2004). Gran escenario de la zona costera y oceánica de México. *Ciencias*, 76, 4-13.
- DOF. (2018). ACUERDO por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas Río Ipala, Río Tomatlán A, Río Tomatlán B, Río San Nicolás A, Río San Nicolás B, Río Cuitzmala, Río Purificación y Mar. México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2019). MODIFICACIÓN del Anexo Normativo III, Lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, ex. México: Diario Oficial de la Federación.
- Downing, A. (1997). Marine nitrogen: Phosphorus stoichiometry and the global N:P cycle. *Biogeochemistry*, 37, 237-252.

- Dyer, K. R. (1997). *Estuaries: a physical introduction* (2nd ed. ed.). Londres: John Wiley.
- Escobar, E. M. (2008). Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas. En *Capital natural de México, vol. I : Conocimiento actual de la biodiversidad* (págs. 161-189). Ciudad de México: CONABIO.
- Espejel Carbajal, I. &. (2008). Regionalización ecosistémica con base en indicadores ambientales de tres áreas marinas en el sur de México. *Red Interamericana de Información sobre Biodiversidad*.
- ESRI. (2023). *Cómo funciona Rellenar*. (ESRI) Recuperado el 10 de Junio de 2023, de Ayuda de ArcGIS Pro: https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm#ESRI_SECTION1_0ABED11B8FAB4FCFBB4E1E86C6975B67
- Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. (2005). *Panorama General*. Recuperado el Julio de 2023, de Evaluación de los Ecosistemas del Milenio: <https://www.millenniumassessment.org/es/About.html#4>
- FAO. (2006). (*Estudios Fao: Riego Y Drenaje*) del cultivo. *Guías para la determinación de los requerimientos del agua de los cultivos* (Vol. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Flores Verdugo, F. A. (2007). Ecosistemas acuáticos costeros: importancia, ratos y prioritarios para su conservación. En O. H.-H. Sanchez (Ed.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México* (págs. 147-166). México: SEMARNAT, INE U.S. Fish & Wildlife Service, Unidos para la Conservación, A.C., Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
- Flores Verdugo, F. M. (2007). La topografía y el hidroperiodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros . *Boletín de la Sociedad Botánica de México, Sup(80)*, 33-47.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1996). *Planificación y ordenación de cuencas hidrográficas con ayuda de computadora. Tecnologías para la planificación nacional. Guía de conservación* 28/1. Roma: FAO. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/006/V9927S/V9927S00.HTM>
- Funk, C. P. (2015). he climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Science Data*, 2(150050).
- Gao, J. L. (2017). The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 163, 5148-5155.
- Gaviño, N. &. (2000). El uso de indicadores ambientales y de intervención en la gestión ambiental. *Indicadores ambientales 2000. H.Doc Serie Gestión Ambiental(3)*, 4-34.

- Getzner, M. &. (2020). Ecosystem Services of Mangrove Forest: Results of a Meta-Analysis of Economic Values. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17, 580.
- Gobierno de México. (2022). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2022*. Recuperado el Julio de 2023, de Agenda 2030: <https://agenda2030.mx/index.html?lang=es#/home>
- Goonetilleke, A. T. (2005). Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. *Journal of Environmental Management*, 74(1), 31-42.
- Haines, P. E. (2006). Morphometric assessment of intermittently open/closed coastal lagoons in New South Wales. *Australia Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 67(1-2), 321-332.
- Halder, S. D. (2022). Estimation of seasonal water yield using InVEST model: a case study from West Bengal, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1293).
- Hamel, P. V. (2020). Modeling seasonal water yield for landscape management: Applications in Peru and Myanmar. *Journal of Environmental Management*, 270(110792).
- Harris, I. J. (2014). *Historical monthly weather data*. Recuperado el Febrero de 2023, de <https://worldclim.org/data/monthlywth.html>
- Howarth, R. (1988). Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 19, 89–110.
- INEGI. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano*. Recuperado el Febrero de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI. (2021). *Uso de suelo y vegetación*. Recuperado el Febrero de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- INEGI. (s.f.). *Mapa Digital de México*.
- Jackson, C. R. (2010). Ecological benefit of reduced hydrologic connectivity in intensively developed landscapes. *BioScience*, 60(1), 37-46.
- Kjerfve, B. (1990). *Manual for Investigation of Hydrological Processes in Man- grove Ecosystems*. Columbia, South Carolina: Unesco/UNDP Regional Project.
- Kjerfve, B. (1994). *Coastal Lagoon Processes* (Series ed.). Amsterdam: Elsevier Oceanography.
- Kjerfve, B. (1994). Coastal Lagoons. En *Coastal Lagoon Processes* (págs. 1-8). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

- Kovacs, K. P. (2013). Evaluating the return in Ecosystem Services from Investment in public land acquisitions. *PLOS one*, 8(6).
- Lara-Lara, J. R.-E. (2008b). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En *Capital natural de México, vol. I : Conocimiento actual de la biodiversidad* (págs. 109-134). México: CONABIO.
- Lara-Lara, J. R.-H. (2008a). Los ecosistemas marinos. En *Capital natural de México* (págs. 135-157). México: CONABIO.
- León, C. (2004). Piezas de un rompecabezas: dimensión socioeconómica de las costas de México. En E. V. Rivera Arriaga (Ed.), *El manejo costero en México* (pág. 654). Quintana Roo: Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Lewis, A. R. (2021). Using Multiple Ecological Models to Inform Environmental Decision-Making. *Front. Mar. Sci.*, 8.
- Liberata Ullo, S. &. (2020). Advances in Smart Environment Monitoring System Using IoT and Sensor. *Sensors*, 20, 18.
- Lovera Pons, V. R. (2018). Evaluación del servicio ecosistémicos de rendimiento hídrico entre los años de 1994 y 2016 en el municipio de Valle de Bravo, Estado de México. *Papeles de Geografía*, 64, 93-113.
- Mahapatro, D. P. (2013). Coastal Lagoon: Present Status and Future Challenges. *International Journal of Marine Science*, 3(23), 178-186.
- Mandle L, W. S. (2017). Assessing ecosystem service provision under climate change to support conservation and development planning in Myanmar. 12(9).
- McSweeney, L. &. (2023). Hydraulic gradient and wave height control the success of estuary artificial entrance openings,. *Journal of Hydrology*, 619(128902).
- meteoblue. (2015). *meteo*. Recuperado el Abril de 2023, de <https://content.meteoblue.com/en>
- meteoblue. (2023). *Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Campo Acosta*. Recuperado el Abril de 2023, de https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/campo-acosta_méxico_4015974
- Milenio. (26 de 04 de 2022). Xala promueve con éxito a la Costa Alegre de Jalisco. *Milenio*.

- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and Human Well-being : Wetlands and Water Synthesis*. Recuperado el 12 de 12 de 2022, de <http://www.maweb.org/documents/document.358.aspx.pdf>
- Muñoz Sevilla, P. &.U. (2004). Análisis de caso: Sinaloa. En E. V. RiveraArriega (Ed.), *El Manejo Costero en México* (pág. 654). Quintana Roo: Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo.
- Myanmar., A. e. (2018). Influence of land use change on the ecosystem service trade-offs in the ecological restoration area: dynamics and scenarios in the Yanhe watershed, China. (644).
- Natural Capital Project (NatCap). (10 de Marzo de 2021). *Introduction to the InVEST Seasonal Water Yield*. (Stanford University) Recuperado el Enero-Marzo de 2023, de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=TfFrUBYMz6U>
- Natural Capital Project. (2022). *InVEST*. Recuperado el Febrero de 202, de <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>
- Natural Capital Project. (2022). *InVEST 3.13.0.post12+ug.g335212a User's Guide*. Recuperado el Junio de 2023, de Invest User Guide: https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/seasonal_water_yield.html
- Navarro Rodríguez, M. d. (2022). Xola-Paramán: Caracterización de una laguna costera Ramsar en Jalisco. *Acta Pesquera*, 8(15), 24-34.
- NRCS, ARS. (2004). Chapter 9 Hidrologic Soil-Cover Complexes. En USDA (Ed.), *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*.
- Ontiveros-Cuadras, J. R.-F.-B.-V.-C. (2021). Historical reconstruction of trace elements concentration and fluxes in a tropical coastal lagoon (Mexican Pacific) derived from 201PB radiochronology. . *Continental Shelf Research*, 213(2021), 2-10.
- Paerl, W. H. (2009). Controlling Eutrophication along the Freshwater–MarineContinuum: Dual Nutrient (N and P) Reductions are Essential. *Estuaries and Coast*, 32, 593-601.
- Paz-Pellat, F. (2009). Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia*, 43(5), 521-528.

- Pernil, A. M.-C.-P. (2011). Economic valuation of coastal lagoon environmental restoration: Mar Menor (SE Spain). *37*(2).
- Piroddi, C. H. (2021). Editorial: Using Ecological Models to Support and Shape Environmental Policy Decisions. *Front. Mar. Sci.*, *8*.
- Pringle, C. (2003). What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, *17*, 2685-2689.
- Pringle, C. E. (2001). Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective. *Ecological Applications*, *11*, 981-998.
- Pritchard, D. W. (1952). Estuarine Hydrography. En H. (. Landsberg, *Advances in Geophysics* (págs. 243-280). New York: Academic Press.
- Ramsar Convention Secretariat. (2014). *Historia de la Convención sobre los humedales*. Recuperado el 2023, de Historia de la Convención sobre los humedales.
- RAMSAR, SEMARNAT, CONANP, SEMADES, GMT & UdeG. (2008). *Programa de Conservación y Manejo (PCyM) de La Laguna Xola-Paramán Humedal de Importancia Internacional*. México.
- Ray, G. C. (1991). Coastal-Zone Biodiversity Patterns. *Marine Biological Diversity*, *41*(7), 490-498.
- Rodrigues-Filho, J. M. (2023). From ecological functions to ecosystem services: linking coastal lagoons biodiversity with human well-being. *Hydrobiologia*.
- Rodríguez-Ortega, C. &. (2008). El Sistema Nacional de Indicadores Ambientales. En UNAM (Ed.), *Desarrollo de indicadores ambientales y de Sustentabilidad en México. Geografía para el siglo XXI. Serie: Libros de Investigación*. (págs. 15-26). México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Ross, C. P. (11 de Mayo de 2020). *Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling*. Recuperado el Febrero de 2023, de https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1566
- Ruiz-Luna, A., & Berlanga-Robles, C. A. (2003). Land use, land cover changes and coastal lagoon surface reduction associated with urban growth in northwest Mexico. *Landscape Ecology*, *18*, 159-171.
- Sarukhán, J. e. (2009). *Capital Natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. México: CONABIO.

- SEMADET. (2013). *Comité Estatal de humedales: 1768 Laguna de Xola-Paramán*. Recuperado el 12 de Febrero de 2023, de <https://semadet.jalisco.gob.mx/medio-ambiente/biodiversidad/comite-estatal-humedales/149>
- SEMADET. (2015). *Programa de Conservación y Manejo (PCyM) de la Laguna Xola-Paráman Humedal de Inportancia Internacional*. Recuperado el Febrero de 2023, de https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/programa_de_conservacion_y_manejo_1.pdf
- SEMARNAT. (2010). *Atlas Digital Geográfico - Agua*. Recuperado el Junio de 2023, de <http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua.html>
- SEMARNAT. (14 de Febrero de 2023). *Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales*. Recuperado el 2023, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-informacion-ambiental-y-de-recursos-naturales>
- Serrano, D. F.-V.-F. (2002). Modeling tidal hydrodynamic changes induced by the opening of an artificial inlet within a subtropical mangrove dominated estuary. *Wetlands Ecol. Manage*, 28, 103-118.
- Sharp, R. T.-K. (2018). *InVEST 3.7.0 User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Silva, R. M.-C.-P.-M.-I.-P.-H.-T. (2017). *Aspectos generales de la zona costera*. Ciudad de México: UNAM, INECOL.
- Soberón, J. L. (2008). Reflexiones sobre el conocimiento de la biodiversidad en México: retos y perspectivas. En *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pág. 620.). México: CONABIO.
- Spurgeon, J. (1998). The Socio-Economic Cost and Benefits of Coastal Habitat Rehabilitation and Creation. 37.
- Stanford Online. (2023). *Introducción al Enfoque del Proyecto Capital Natural*. Recuperado el 29 de Enero de 2023, de <https://learning.edx.org/course/course-v1:StanfordOnline+SOEES-XNCP101-SPANISH2+2T2020/home>
- Stanford Online. (2023). *Publications Natural Capital Project*. Recuperado el Mayo de 2023, de <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/publications>
- Stanford University. (2023). *InVEST*. Recuperado el Enero de 2023, de <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

- Strahler, A. (1963). *The earth science*. New York: Harper & Row.
- Tague, C. &. (2004). RHESSyS: Regional Hydro-Ecologic Simultion System - An Object - Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling. *8*(19).
- Texas A&M University & USDA. (2023). *SWAT Soil & Water Assessment Tool*. Recuperado el julio de 2023, de SWAT: <https://swat.tamu.edu>
- The Nature Conservancy. (s.f.). *Water Fund ToolBox*. Recuperado el 29 de Enero de 2023, de <https://waterfundstoolbox.org/getting-started/what-is-a-water-fund>
- Toledo, A. (2003). *Ríos, costas, mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México*. México: SEMARNAT, INE y El Colegio de Michoacán.
- Tong, S. &. (2002). Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Enviromental Management*, *66*, 377-393.
- USDA, NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55*. Washington DC.: USDASCS.
- Weiss, M. J. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote sensing of Environment*(236), 19.
- Wittwer, A. R. (2021). Organic and conservation agriculture promote ecosystem multifunctionality. *Science Advances*, *7*, 12.
- Yáñez-Arancibia, A. D.-G.-L.-G.-G. (2014). Ecosystem functioning: The basis for restoration and management of a tropical coastal lagoon, Pacific coast of Mexico. *Ecological Engineering*, *65*(2012), 88-100.
- Yáñez-Arancibia, A. e. (2009). *Caracterización Ecológica del Sistema Lagunar Paramán-Chalacatepec: Estructura y Funcionamiento Natural del Sistema Ecológico basado en su dinámica Estacional y Fundamento para su Rehabilitación* (Informe Tercera Fase y Final, Periodo Global Julio 2008 – Septiembre 2009 ed.). Tomatlán, Jalisco: CEMA Consultores en Ecosistemas y Medio Ambiente.
- Zavala, M. R.-S. (2006). Modelos espacialmente explícitos. *15*(3).
- Zomer, R. T. (14 de Abril de 2022). *Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET0) Climate Database* v3. Obtenido de https://figshare.com/articles/dataset/Global_Aridity_Index_and_Potential_Evapotranspiration_ET0_Climate_Database_v2/7504448/4