



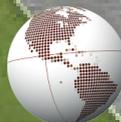
Monitoreo de procesos territoriales con imágenes de satélite en escala regional

- Cambios estacionales de cuerpos de agua superficial en la cuenca del Grijalva
- Expansión periurbana en el Corredor del Bajío



CONACYT

FORDECyT



CentroGeo

**Monitoreo de procesos territoriales
con imágenes de satélite en escala regional.**

México, 2021

Monitoreo de procesos territoriales con imágenes de satélite en escala regional

**Cambios estacionales de cuerpos de agua
superficial en la cuenca del Grijalva**

Expansión periurbana en el Corredor del Bajío

Índice

I. Introducción

Elvia Martínez Viveros

II. Una revisión para la caracterización de superficies de cuerpos de agua con datos de radar de apertura sintética

Alejandra Aurelia López-Caloca

III. Indicadores de Conservación de Cuerpos de Agua en la Cuenca Grijalva

Felipe Omar Tapia Silva

IV. Mapeo de la Mancha Urbana en el Tiempo: Caso de Estudio Corredor Metropolitano del Bajío

José Luis Silván Cárdenas, Juan Carlos Valdiviezo Navarro, Adán Salazar Garibay

V. Análisis de la evolución espacial periurbana en el Corredor del Bajío

Elvia Martínez Viveros, Yezmín Calvillo Saldaña, José Luis López Gonzaga y Diego Quintino Silva

VI. El uso de la analítica geovisual en el desarrollo de plataformas y estudios de caso para problemas sociales

Rodrigo Tapia McClung y Tania Gómez Fernández

VII. Servicios de información en web de procesamiento de imágenes satelitales sobre cuerpos de agua y huella urbana

Amílcar Morales Gamas y Mario Ledesma Arreola

VIII. Autores

Introducción

Este libro tiene como propósito divulgar los resultados de un proyecto de investigación, realizado por el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo) y financiado por el Fondo Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT), del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Este proyecto se llevó a cabo en dos etapas, en los años 2019 y 2020, y formalmente quedó nombrado como “Análisis y Monitoreo del Crecimiento del Medio Urbano y del Comportamiento de Cuerpos de Agua desde un Enfoque de Sustentabilidad. Casos de Estudio: Corredor Metropolitano Centro País y Cuenca del Grijalva (FORDECYT 2018-10)”.

El proyecto es pionero, en el sentido que planteó la generación y el análisis de información satelital en el espacio-tiempo, con periodicidades significativas para establecer bases de datos relevantes, como semilla para emprender estudios de largo alcance y aportar al conocimiento de la evolución de procesos territoriales, clave para la sustentabilidad del desarrollo del medio ambiente y de los grupos sociales, así como para informar procesos de política pública y planificación territorial. Este planteamiento se motivó, por la posibilidad de acceder a las bases de datos, integradas con las imágenes de radar de las misiones de los satélites Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea; institución que, alrededor de 2016, inició un proceso de apertura de sus datos geoespaciales, al reconocer que los problemas complejos que enfrenta el mundo requieren de investigaciones en colaboración.

Abrir datos de series en el tiempo de imágenes de radar, otrora escasos, caros o de acceso limitado, otorgó al mundo la oportunidad de acceder, redistribuir y usarlos en procesos de investigación o de generación de evidencia útil, para basar políticas públicas en temas relacionados con dinámicas de los territorios. Hace apenas un lustro, la investigación basada en los resultados del procesamiento de imágenes satelitales de radar seguía un modelo relativamente estático: se centraba en la información sobre una región en un momento dado o, a lo más, en el análisis comparativo de unas cuantas imágenes en distintos periodos de tiempo. La información generada por los satélites Sentinel 1 permitía el acceso a imágenes que cubren una misma escena de la superficie terrestre, en un ciclo periódico de seis días y con una resolución media de 20 metros.

Los datos de sensores ópticos para esta investigación se obtuvieron de imágenes de la serie Landsat-8, satélite que entró en órbita en 2013. Sus imágenes son el producto global disponible más reciente y completo, sobre los asentamientos urbanos. Las imágenes se captan con un ciclo de repetición de 16 días, una resolución espacial de 30 metros y una captura de 725 escenas por día. La precisión de estos datos permite una caracterización del estado de la superficie terrestre, mejor que la obtenida por satélites Landsat de generaciones anteriores. La frecuencia de captura de las imágenes de Landsat-8 incrementa la probabilidad de obtener imágenes sin nubes, a las cuales se puede acceder libremente desde tres plataformas desarrolladas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos.

La disponibilidad de estos datos, motivó el diseño de un proyecto de investigación que abordara, desde una perspectiva empírica, las dinámicas del territorio. Se abría el espacio de oportunidad para dar cuenta de diversos procesos observables en el territorio del país; por ejemplo, el hundimiento (subsistencia) de la Ciudad de México, los cambios en la línea de costa en el sureste del país o el seguimiento de derrames de petróleo en el Golfo de México. En el espacio de alternativas viables se optó por dos temas. El primero atiende a la necesidad de gestionar

los recursos hídricos para su conservación, protección, manejo y restauración; gestión que requiere de datos confiables para monitorear su dinámica en el tiempo y el espacio. Este proceso se decidió estudiar en la cuenca del Río Grijalva y con información básica de imágenes de radar. El segundo, a la problemática de expansión incontrolada de las urbes en nuestro país, cuya evolución y forma de extensión periurbana se vuelve un tema relevante a posicionar en la agenda de gobernanza territorial. Este proceso se decidió abordar en el Corredor del Bajío, con información de imágenes ópticas. Este corredor es una región donde el desplazamiento de la actividad industrial y de la población al espacio periurbano se extiende principalmente a lo largo de ejes carreteros, que conectan diversos poblados en una expansión que traspasa las fronteras formales de las zonas metropolitanas y se expresa en la expansión física de un medio construido que, aunque en algunos tramos exhibe un proceso de densificación, se caracteriza principalmente por ser discontinuo y de baja densidad.

La investigación en CentroGeo se ha posicionado en el nicho de abordar problemáticas del territorio con un enfoque transversal. La información geoespacial y sus tecnologías, además de ser objeto de investigación especializada, han sido parte relevante de la caja de herramientas en la generación de conocimiento territorial. En este marco se han consolidado líneas de investigación con grupos de investigadores creativos, activos y comprometidos en integrar su conocimiento en grupos inter y trans disciplinarios, para investigar procesos territoriales. También, se detonó el proyecto de investigación que se reseña en este libro, en cuyo desarrollo participaron investigadores con enfoques de percepción remota, ciencias de información geoespacial y analítica geovisual, así como tecnólogos especialistas en geoprocetamiento. La perspectiva teórico-metodológica para la investigación de los estudios de caso, para la cuenca del Grijalva, se aportó desde marcos de conocimiento de la hidrología y para la expansión periurbana desde de la planeación espacial.

El proyecto se planteó bajo un esquema que abarcaba, desde la adquisición y el procesamiento digital de los datos satelitales, su expresión en formatos vectoriales (mapas digitales), su uso y modelaje en la construcción de los casos de estudio, su presentación en plataformas abiertas para apoyar otros procesos de investigación, hasta la construcción de políticas públicas o procesos de planeación territorial o regional. El manejo de series de imágenes satelitales, en escala regional, conlleva el procesamiento de grandes volúmenes de información. Es el escenario del bigdata que requiere de capacidades robustas de software y hardware para su geoprosesamiento. Para que los resultados obtenidos y la información base fuera accesible a diversos especialistas, analistas no expertos en procesamiento digital de imágenes o a diversos agentes interesados, se integraron repositorios de datos geoespaciales, se desarrollaron plataformas interactivas de analítica geovisual y se instrumentaron servicios web de información de imágenes pre-procesadas.

En consecuencia, equipo de investigación que se integró para realizar este proyecto, incluyó una participación plural en términos de la especialidad de sus participantes, de sus líneas de investigación, de sus habilidades tecnológicas y de las tareas que se llevaron a cabo.

El grupo que participó en el procesamiento de las imágenes de radar, que sirvieron de base para la caracterización de los cuerpos de agua del Grijalva, estuvo a cargo de la doctora Alejandra López Caloca, y sus resultados sirvieron de base para las mediciones de inundación y conectividad, y para el modelo hidrológico que trabajó el equipo comandado por el doctor Omar Tapia Silva. En el caso de la expansión urbana, el procesamiento de series de imágenes ópticas Landsat 8 se llevó a cabo por el doctor José Luis Silván Cárdenas; ellas sirvieron como insumo central en el estudio de la expansión periurbana en escala regional, encabezado por la doctora Elvia Martínez Viveros. La información espacio temporal, generada para los estudios de caso, se integró en plataformas de analítica geovisual, desarrolladas bajo la conducción del doctor Rodrigo Tapia McClung. Final-

mente, los equipos de tecnólogos del maestro Amílcar Morales Gamas y del maestro Jesús Trujillo Almeida se dieron a la tarea de automatizar los procesos de adquisición y pre-procesamiento, para la entrega de servicios web de información geoespacial, derivadas de los datos de radar y ópticos, así como de integrar los repositorios de datos del proyecto.

Investigaciones de esta naturaleza se traducen en un número considerable de entregables: reportes metodológicos y técnicos; bases de datos geoespaciales; plataformas de visualización; tesis; publicaciones en revistas académicas, etcétera. Entre toda esta información es con frecuencia difícil mantener una visión sucinta e integral del proyecto; a pesar de que exista un resumen ejecutivo, queda en los anales y el lenguaje propios de una entrega académica. Este libro no pretende ser un resumen de estos entregables ni incluirlos en su totalidad; su objetivo es guardar, en términos cualitativos, la memoria del proyecto, su enfoque y sus resultados. Su contenido queda a cargo de miembros del grupo de investigación, que hicieron posible llevar a puerto esta experiencia. En este sentido, es un libro de divulgación, tarea que consideramos de suma relevancia para contribuir al propósito largamente acariciado por muchos investigadores: contribuir a la construcción de políticas territoriales y procesos de planeación espacial, basados en evidencia.

El libro se divide naturalmente en tres apartados principales: los dos primeros corresponden con el tema de cada uno de los procesos territoriales involucrados en el proyecto, la dinámica de los cuerpos de agua y la expansión periurbana en escala regional. El primer capítulo aborda la construcción del insumo primordial para el estudio de la dinámica de los cuerpos de agua en la cuenca del Grijalva: la extracción de la máscara agua-no agua en el territorio de esta cuenca; a partir de este insumo, en el segundo capítulo se presentan las mediciones necesarias para comprender las épocas del año en que se manifiestan cambios en los flujos de estos ríos, en la forma de zonas temporalmente inundadas o en la pérdida de conectividad y las implicaciones que esto tiene, en términos del balance hidrológico.

Los siguientes dos capítulos siguen una lógica similar a la de los anteriores. En el capítulo 3 se abordan los temas relativos a la adquisición y construcción de la serie de datos ópticos que se usaron en el análisis de la expansión periurbana del Corredor del Bajío en el capítulo 4. En este estudio de caso, explora la evolución en el espacio red y en el físico del fenómeno urbano, en escala regional. El análisis de los datos satelitales permite reportar las tendencias principales de la expansión del medio construido en el periurbano de esta región, en el marco de un proceso de urbanización difusa, que en ciertos tramos convive con la ubicación de la actividad económica en este espacio-red

El tercer apartado del libro se enfoca en el uso de la tecnología para la difusión y el análisis de los resultados de ambos casos de estudio. En el capítulo 5 se introduce al lector en el tema novedoso de la analítica geovisual, disciplina emergente que promete contribuir de manera activa a la comprensión de grandes volúmenes de datos espacio-temporales, vinculados con métodos computacionales en interfaces interactivas, basadas en visualizaciones de mapas y gráficos. El capítulo ilustra esto con dos plataformas que para estos fines se construyeron en el seno del proyecto y con las cuales el lector puede interactuar en las direcciones de internet que se incluyen. De igual forma, en el capítulo 6 se hace una breve reseña de los servicios de información web, derivados de este proyecto y abiertos al público, y sobre su forma de acceso. Finalmente, los datos vectoriales del proyecto se organizaron en un repositorio digital de libre acceso, en

<https://idegeo.centrogeo.org.mx/geocontext/documents/5>

<https://idegeo.centrogeo.org.mx/geocontext/viewer/4>

CentroGeo y el grupo de investigación y desarrollo involucrado en esta aventura académica, agradece a las autoridades del CONACYT y a los comités de FORDECYT, por el apoyo que se brindó al proyecto.

Es deseo de la coordinadora general del proyecto, agradecer la participación de todos los investigadores y desarrolladores de CentroGeo que se

involucraron en esta investigación, con creatividad, talento y compromiso, así como del doctor Omar Tapia, por sus aportes robustos y relevantes al proyecto, desde su estancia sabática en CentroGeo ,en la primera etapa y desde la Universidad Autónoma Metropolitana- Unidad Iztapalapa, en la segunda, y reconocer el apoyo incondicional de la dirección general del CentroGeo, a lo largo del proceso.

Elvia Martínez Viveros

Primavera 2021

Una revisión para la caracterización de superficies de cuerpos de agua, con datos de radar de apertura sintética

Alejandra A. López- Caloca

RESUMEN

El agua es un recurso insustituible en nuestro planeta. Su disponibilidad en las reservas y su variabilidad natural, son un tema de interés para contribuir al manejo del uso de este recurso natural y fomentar su conservación. En este capítulo se hace una revisión de varios estudios, para la identificación de cuerpos de agua, al utilizar datos de radar de apertura sintética. Asimismo, se describen los métodos de pre-procesamiento y los enfoques de clasificación, con datos de imágenes del programa Copernicus, específicamente su constelación Sentinel-1; también se exponen algunos resultados obtenidos en la cuenca del río Grijalva. Finalmente, se describen las contribuciones y posibles investigaciones futuras.

INTRODUCCIÓN

La identificación de agua superficial es de suma importancia, por ser un elemento de alto valor para la evaluación de los ecosistemas, los servicios para las personas y los ambientales. Las imágenes captadas por sensores de observación de la tierra desde el espacio, han demostrado su utilidad en la cartografía de la superficie de los cuerpos de agua, tanto a escala global como regional.

Actualmente se cuenta con varios productos con información georeferenciada de la cobertura de cuerpos de agua estáticos en el tiempo, a nivel global, obtenidos a través de los sensores ópticos (Caroll *et al.*, 2009; Verpoeter *et al.*, 2014; Feng *et al.*, 2016). El comportamiento de los cuerpos de agua es muy dinámico y su variabilidad temporal puede tener consecuencias sobre las actividades ambientales y humanas, en aspectos como la agricultura, la seguridad alimentaria y en el buen funcionamiento de los ecosistemas (Pirlea *et al.*, 2020). Este hecho impulsa la necesidad de estudios de tipo multitemporal. A partir de series de tiempo de la superficie de cuerpos de agua, se han desarrollado productos con los datos históricos de la familia de satélites Landsat, que proporcionan datos de resolución espacial media (Yamazaki *et al.*, 2015; Pekel *et al.*, 2016). Estos productos tienen información muy valiosa sobre la caracterización del comportamiento dinámico de los cuerpos de agua a nivel global. Sin embargo, una limitación importante de los sensores ópticos es que sus productos se ven afectados por el grado de nubosidad del territorio de estudio y por la época de lluvia. Generalmente, los estudios basados en este tipo de datos toman en cuenta las observaciones sin nubes por pixel, al utilizar compuestos en donde se determina cada valor óptimo por pixel, el cual es representativo del periodo temporal establecido (por ejemplo, mensual, bimestral e incluso anual).

La observación de la tierra, a partir de los sensores de Radar de Apertura Sintética (SAR, por sus siglas en inglés), tiene la virtud de registrar infor-

mación sin influencia atmosférica, lo que lo hace idóneo para zonas de alta pluviosidad. Estudios con datos del sensor Advance Synthetic Aperture Radar (ASAR), a bordo de la plataforma ENVISAT, pertenecientes a la Agencia Espacial Europea, han obtenido una serie de productos de cobertura de la superficie de agua con una visión global (Lamarche *et al.*, 2017). El rápido desarrollo de nuevos proyectos de observación de tierra con datos SAR (Sentinel-1, TerrasAR-Un valor bajo de retrodispersión se refleja en la imagen, RADARSAT-2 y ALOS PALSAR) han aumentado la diversidad de modos de adquisición de datos, las capacidades de frecuencia temporal y, con una resolución espacial adecuada, la confiabilidad de los estudios multitemporales. Hasta el momento existen pocos estudios de tipo multitemporales (Xing *et al.*, 2018; Jiang *et al.*, 2021), que además comprendan una visión nacional o territorial a nivel de cuenca alta y de cuenca baja (Li y Wang, 2020; López-Caloca *et. al.*, 2020a).

Por su importancia, una línea de investigación de procesamiento de imágenes satelitales SAR en CentroGeo se ha enfoca al análisis de la extensión de superficie de agua. El propósito de utilizar series de tiempo en la investigación es el aporte que representa la estacionalidad de la cobertura de cuerpos de agua, con lo que aumenta la posibilidad de conocer cambios de la superficie de los cuerpos de agua a nivel cuenca.

Este capítulo es una revisión de estudios, donde se utilizan datos de radar de apertura sintética, principalmente los datos de Sentinel-1A y 1B, en el mapeo de la superficie de agua. Primero se describe la interacción de la señal radar con los cuerpos de agua; se presentan los procedimientos del preprocesamiento y extracción de cuerpos de agua, y se ilustran los resultados obtenidos como un análisis de frecuencia. Por último, el capítulo concluye con una discusión del uso de SAR, para la identificación de cuerpos de agua.

Los mecanismos de interacción de la señal de radar con los cuerpos de agua, que permiten su identificación

Para el desarrollo de metodologías de detección e identificación de cuerpos de agua, conviene entender los aspectos relacionados a los mecanismos de interacción de la señal SAR con su superficie.

Sentinel-1 tiene un radar de apertura sintética que forma imágenes. Este tipo de sistemas captura datos con una visión lateral y trabaja en la región de las microondas del espectro electromagnético. La señal de SAR funciona en condiciones del día o noche; al penetrar a través de las nubes durante el proceso de adquisición, obtiene registros de los datos, sin pérdidas de información digital, a pesar de la presencia de nubosidad.

La señal mide una relación entre la energía transmitida por el sensor a superficie de la tierra y la señal de regreso, con la información sobre la superficie contactada. La señal que regresa al sensor se le nombra retrodispersada. La retrodispersión de una superficie terrestre depende de varios factores, como la topografía física del terreno, el ángulo de incidencia de la señal de radar y las propiedades dieléctricas de la superficie del terreno. Un valor bajo de retrodispersión se refleja en la imagen con niveles de grises cercanos al negro, mientras que valor alto un se muestra con niveles de grises cercanos al blanco.

La señal de radar es sensible a la estructura de los objetos en la superficie. Existen varios mecanismos de dispersión principales: de espejo, de doble rebote y de volumen. En superficies de terrenos lisos, como los cuerpos de agua en reposo, predomina la dispersión espejo o reflector especular de la superficie. Por el contrario, en terrenos heterogéneos o superficie áspera, como por ejemplo las zonas de vegetación densa, predomina la retrodispersión de volumen. La homogeneidad y heterogeneidad de la estructura de los objetos en la superficie se manifiestan en la imagen con superficie lisa o áspera, por ello las áreas aparecen brillantes u oscuras en la imagen.

Cuando un lago se encuentra en calma, al comportamiento en relación con la señal de radar, se le llama reflector especular; es decir, la señal de radar que incide en el lago se refleja en la dirección opuesta al satélite, lejos del sensor. Por esta razón, cuando la antena no percibe una señal fuerte de retorno, los cuerpos de agua aparecen en tonos oscuros en la imagen de radar. El contraste de tono oscuro hace posible una separación ideal entre la cobertura de agua y tierra.

Cuando las superficies de un lago o río presentan vegetación emergente, el movimiento de la vegetación por la presencia del viento o lluvia tiene como consecuencia que las capas superficiales del cuerpo de agua presenten una rugosidad superficial, que dificulta el contraste de los tonos en la imagen de agua-tierra. En términos de los valores del coeficiente de retrodispersión de radar, significa que la rugosidad de la superficie del agua da como resultado una señal de retorno alta y dificulta la separación de las coberturas tierra-agua. La vegetación sobre o por encima de la superficie del agua aumenta la rugosidad, lo que puede provocar una dispersión de volumen, que es la dispersión del radar dentro de un volumen, y consiste en múltiples rebotes dentro de un medio como es vegetación, que da una disminución del contraste entre la tierra y el agua, a causa de una dispersión superficial rugosa. El efecto de doble rebote aparece cuando la vegetación está inundada. En la figura 1A, 1B y 1C se muestran los diferentes tipos de dispersión.

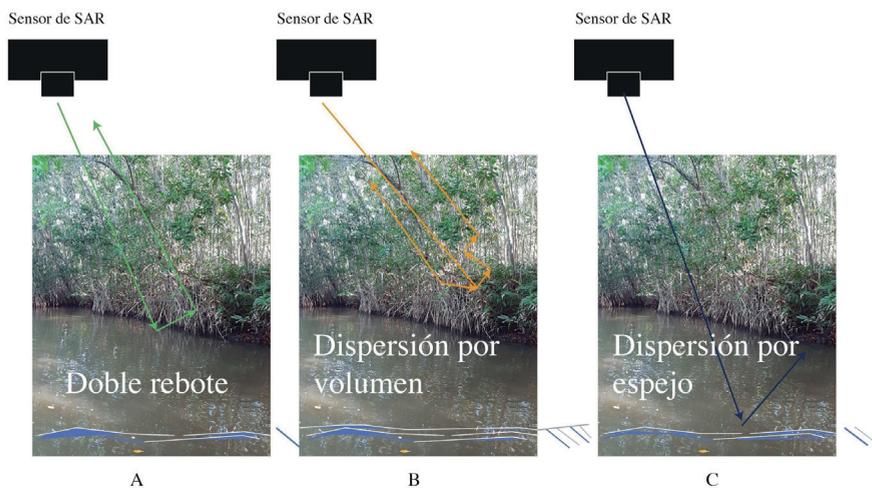


Figura 1. Diferentes tipos de respuesta de SAR con la superficie terrestre.

El ángulo de la onda incidente también juega un papel importante, ya que con ángulos de incidencia elevados se favorece la interacción de la señal con la vegetación. Con ángulos menores, la radiación penetra más fácilmente en las cubiertas vegetales. Los efectos geométricos resultan del relieve del terreno. Cuando el ángulo es grande, se tienden a formar efectos tipo sombra; en caso contrario, con pequeños, se favorece un efecto de desplazamiento de relieve (inversión por relieve). Para disminuir los efectos de áreas sombreadas, se recomienda tomar registros de imágenes en diferentes ángulos de visión (Chunxi *et al.*, 2008). La corrección del efecto del ángulo de incidencia y la identificación de sombras depende de las direcciones de trayectoria de órbita (ascendente o descendente). Otro uso de datos SAR con diferentes ángulos de adquisición, es propuesto por O'Grady *et al.* (2014), donde se pretende mitigar los problemas de efectos inducidos por el viento, al comparar la respuesta de SAR entre el ángulo de incidencia de la señal de radar y la retrodispersión sobre la interfaz tierra y agua.

De acuerdo con los estudios de Brisco (2015), es adecuado trabajar en longitud de onda corta, como son las bandas X y C, para monitorear la firma

polarimétrica de cuerpos de agua. La polarización HH (transmitida y recibida horizontalmente) se recomienda para la clasificación de agua, ya que maximiza el contraste entre el agua y sus alrededores (Brisco *et al.*, 2009); además, tiene una menor retrodispersión sobre el agua con cierto grado de oleaje (presencia de rugosidad inducida por el viento), que VV (transmitida y recibida verticalmente). Twele *et al.*, (2016) analizó el comportamiento de la polarización con datos de Sentinel-1. En términos de precisión temática, la polarización VV separa mejor la información de la superficie de un cuerpo de agua que la polarización VH (transmitida verticalmente y recibida horizontalmente) en condiciones de agua en calma. La polarización VH muestra alta sensibilidad a la variabilidad de las coberturas terrestres y mejor detección a un cuerpo de agua con oleaje.

La medición de la superficie de cuerpos de agua

Sentinel-1 opera con banda C, la cual captura datos regularmente. El Sentinel-1A produce, desde finales de 2014, imágenes que cubren una misma escena de la superficie terrestre en un ciclo periódico de 12 días, con una resolución media de 20m (rango x azimuth 20.4x22.5) y puede representarse a un tamaño de pixel de 10X10m.

Los productos de tipo Ground Range Detected (GRD) de Sentinel-1, en modo Interferometric Wide Swath (IW), son los más utilizados para la detección de cuerpos de agua y están disponibles en dos combinaciones de polarizaciones: VV + VH. En particular, la polarización VV ofrece para México imágenes con polarización simple, desde el 2014 a la fecha. Las polarizaciones cruzadas VH se ofrecen a partir de 2017 y se les denomina polarización selectiva o dual. Actualmente, la periodicidad de datos de una escena se ha reducido de tres a seis días con el Sentinel-1B, que se encuentra en órbita desde finales del 2016.

Para usar las imágenes de Sentinel-1 hay varias correcciones que deben

realizarse. La cadena de preprocesamiento se hace de forma automática y se implementada en la herramienta de procesamiento de imágenes Sentinel Application Platform (SNAP, por sus siglas en inglés).

Subsecuentemente, se identifica el área de estudio y se descargan las imágenes de satélite, a través del servicio de acceso abierto de la Agencia Espacial Europea en su portal (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Las imágenes SAR son monocromáticas y las correcciones estándar de preprocesamiento se describen a continuación. El objetivo del proceso de aplicar la actualización de los datos de órbita se hace, debido a que el archivo del metadato se genera, por primera vez, como un archivo que incluye los parámetros de adquisición en forma general. Este paso permite asegurar que el archivo esté actualizado y se tenga con precisión la información de una órbita. El archivo llamado Precise Orbit Ephemerides (POD) se genera en el proceso y se localiza en el portal Payload Data ground Segment (PDGS). La eliminación de ruido térmico tiene el propósito de remover este factor antes de realizarse la calibración; este paso es necesario para eliminar aquellos valores seriamente afectados por este tipo de ruido. La calibración radiométrica tiene como objetivo transformar cada valor del píxel, a un valor de coeficiente de retrodispersión, lo cual ayuda a realizar análisis cuantitativos y comparar las imágenes adquiridas durante el periodo de estudio.

El proceso de multi-vistas se refiere a las divisiones del rayo del radar en varios subhaces. Cada subhaz da un *look* independiente en la escena iluminada; cada uno de ellos estarán sujeto al ruido conocido como *speckle*, pero por suma y promedio de la resolución de la celda forman una imagen de salida final con una cantidad reducida de ruido.

En general, todas las imágenes de radar presentan un grado de ruido que se manifiesta como gránulos o píxeles de tono blanco y negro. De hecho, el *speckle* es una forma de ruido que degrada la calidad de una imagen y puede hacer la interpretación visual más difícil. El filtro ideal para reducirlo es el que no pierde la mínima información. Por ejemplo, en las

áreas homogéneas, el filtro debe preservar la información radiométrica, así como conservar los bordes en las zonas con textura entre distintas áreas.

La última etapa del preprocesamiento es la corrección geométrica, y tiene dos objetivos:

1) Mejorar la calidad del producto de SAR, al disminuir las principales distorsiones geométricas que son debidas al efecto de inversión por relieve, al de sombra y al de desplazamiento de estructuras.

2) Se procede a orientar la imagen a una orientación real del terreno, el cual se conoce como corrección de terreno, con modelo digital de terreno. Ver figura 2.

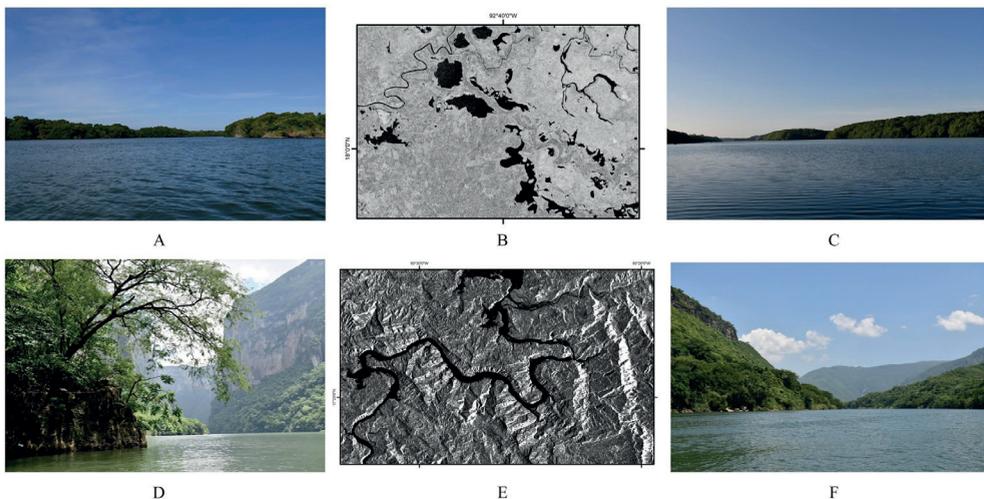


Figura 2. A y C. Fotos de zonas de baja topografía; B imagen SAR en un área de baja topografía. D y F fotos de zonas en sitios de alta topografía; E imagen SAR en un área de alta topografía. GLA/Banco de fotos de CentroGeo.

Para la corrección geométrica de las imágenes de SAR, la aproximación considera una superficie de terreno en 3-D (específicamente un modelo digital de terreno), como parte de la corrección. El algoritmo utiliza un modelo

digital de elevación (MDE). Entre las opciones disponibles están MDE Global del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 3Sec; Continuo de Elevación Mexicano (CEM 3.0); y MDE de LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) del Inegi. En el monitoreo de aguas continentales es útil transformar los datos de formato lineal a decibelios.

Resultados de los estudios revisados para identificación de zonas agua-no agua

Para esta investigación se realizaron una revisión y una amplia consulta bibliográfica de las técnicas y algoritmos de extracción de cuerpos de agua. A la fecha, se han desarrollado algoritmos automatizados para el reconocimiento de patrones, así como para la detección, delineación y segmentación de cuerpos de agua. El procesamiento de datos SAR implica considerar y solucionar los problemas que derivan de los efectos de sombras (proyectadas por áreas montañosas) o del viento (que incrementa la rugosidad de la superficie), así como la presencia de vegetación acuática (que modifica la señal de retorno del radar y provoca variaciones en los tonos en la imagen), o de los objetos en la superficie terrestre con la firma espectral que el agua, y de los gradientes de humedad en las orillas de los lagos (que se deriva en problemas de sobre-segmentación de la imagen).

Existen numerosos estudios realizados a partir de imágenes satelitales de SAR, como medio para detectar agua en superficie. El método más ampliamente reportado en la literatura es el de umbral de intensidad, aplicado en la imagen SAR. Este método separa el agua de la tierra en imágenes de intensidad, pero la exactitud de los resultados se basa en la capacidad de diferenciar los píxeles tierra contra agua. La revisión de los artículos de Andreoli *et al.* (2007), Kuenzer *et al.* (2013), Li y Wang (2015), Sabel *et al.* (2015) y de Yesou *et al.* (2016), establecen diferentes técnicas de optimización de segmentación de imágenes. Por ejemplo, Twele *et al.* (2016) utiliza una clasificación con base en la lógica difusa.

Los métodos basados en la utilización de la textura para mejorar la extracción de cuerpos de agua han sido desarrollados por algunos investigadores. Wentao-LV *et al.* (2010) efectuaron el mapeo de cuerpos de agua al utilizar algunos parámetros de la matriz de co-ocurrencia de nivel gris (GLCM, por sus siglas en inglés). Bolanos *et al.* (2016) lo realizan a partir de combinar la información de textura con la aplicación de técnicas de umbralización. Valdiviezo *et al.* (2019) presentan una metodología basada en el índice de Morán, en combinación con operadores morfológicos para el mapeo de cuerpos de agua en diferentes tipos de relieve. López-Caloca *et al.* (2020a) presentaron un estudio a nivel cuenca y construyeron mosaicos que representaba, por lo menos, una observación por mes. En este estudio se evalúan los parámetros de textura GLCM. Específicamente, se propone el uso de GLCM-mean, el cual tiene una alta contribución en el estudio de delineación de cuerpos de agua con disminución de ruido. La cuenca presentada en este trabajo representa varias subcuencas como Alto Grijalva, Medio Grijalva y Bajo Grijalva, y por subcuencas por presas, como Baja, Peñitas, Malpaso, Chicoasén y Angostura. En este trabajo se obtuvieron 36 mapas binarios agua-no agua, obtenidos de datos SAR por un proceso semiautomático, con la ubicación y la dinámica temporal mensual de agua superficial.

Los resultados de estos procesos se plasman en una máscara binaria que muestra únicamente las áreas de cuerpos de agua (ríos, lagos, lagunas) y se puede visualizar por su interoperabilidad con cartografía o a través de imágenes ópticas. En la figura 3A se muestra un ejemplo de la máscara binaria sobrepuesta, con su misma imagen de Sentinel-1. Se observa que la máscara de agua tiene la extensión de la superficie de los cuerpos de agua, con bastante delineación de la mayoría.

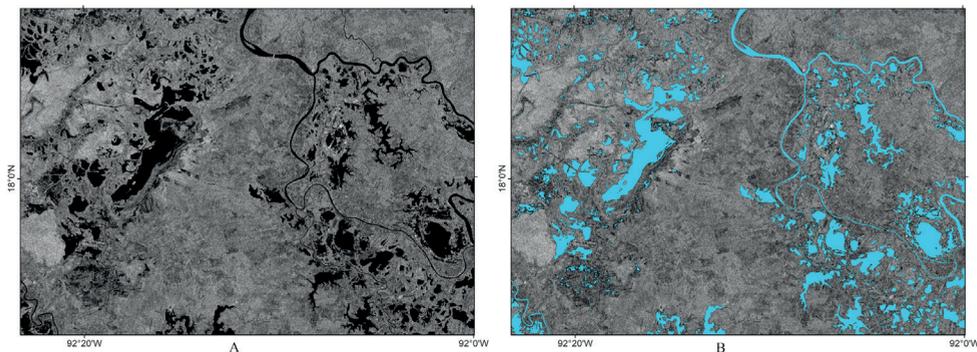


Figura 3. A) Imagen de Sentinel-1 pre-procesada; B) cobertura de agua en color azul sobrepuesta con la imagen de Sentinel-1. Elaboración propia.

Discusión y conclusiones

A pesar de que la superficie de un cuerpo de agua es muy detectable en las imágenes de radar, metodológicamente su identificación no es fácil y es necesario conocer la respuesta de la señal SAR en las diferentes topografías y coberturas del terreno en estudio. Se debe tener en cuenta que en las zonas altas se presentan varios tipos de distorsiones geométricas y su desventaja es que introduce una gran sobre-segmentación en la clasificación de la imagen SAR. Para corregir este efecto, la corrección del ángulo de incidencia en zonas donde hay topografía alta ayuda a la disminución de la sobre-segmentación por efecto de sombra. Esta corrección es muy útil, ya que las sombras se identifican como cuerpos de agua.

Debido a las características de la imagen SAR, antes de realizar la clasificación de datos para delinear cuerpos de agua, es necesario tener en cuenta un pre-procesamiento que implique solucionar los problemas que derivan de los efectos de sombras (proyectadas por áreas montañosas), con base en la corrección de la variabilidad del ángulo de incidencia o del viento (que incrementa la rugosidad de la superficie). Como alternativa se puede complementar al considerar la disponibilidad de información pola-

rimétrica, así como la presencia de vegetación acuática (que modifica la señal de retorno del radar y provoca tonos inusuales sobre la superficie de agua en la imagen), de gradientes de humedad en las orillas de los lagos (que ocasionan problemas de clasificación) o de sedimentos (que se deriva también en problemas de sobre-segmentación).

Los productos de mapas globales y regionales de resolución baja-media pueden presentar diversas limitaciones en la detección de la huella de agua. Uno de ellos es que no detectan pequeños cuerpos de agua. Otro inconveniente es que la conectividad de los cuerpos de agua se pierde cuando la superficie de agua tiene vegetación o disminuyen su extensión y no son detectables. Por estas razones, al pasar de escala global a regional-local, se requiere determinar el nivel de detalle de los cuerpos de agua. En el estudio López-Caloca *et al.* (2020b) se determinó que en un sistema de 23 lagunas pequeñas es posible determinar adecuadamente cuerpos de agua con datos de Sentinel-1 de un tamaño de 8- 300 ha. En este trabajo también se presenta el análisis de diferentes filtros para eliminar el ruido *speckle*, al encontrar que la transformada de Hermite retiene detalles en la imagen.

Al contar con series de mapas de la cobertura superficial, con un periodo aproximado mensual, es posible evaluar la condición de agua presente. En la figura 4 se ilustra un análisis de frecuencia de agua presente para 2016, 2017 y 2018. El análisis de frecuencia indica para cada pixel el grado de frecuencia en el número de meses observados, en los cuales el agua se encuentra presente. Es decir, el producto de cada año proporciona la información del comportamiento mensual de la superficie de agua. A partir de este análisis es posible categorizar el porcentaje de agua superficial en cuerpos de agua de tipo permanentes, definidos como a los pixeles que presentaron agua todo el año y las no permanentes como zonas inundables o de alto grado de humedad de suelo.

La gestión del agua es de suma importancia. Cotler-Ávalos y Pineda-López (2008) indican que los principales impactos del cambio climático

se reflejan en el aporte de agua, su manejo y la pertinencia del análisis de cuencas hidrológicas es una estrategia. En México, tenemos cuencas con diferentes características de vegetación, suelo y geomorfología, así como de condiciones ambientales. Por ello, se sugiere que los esfuerzos deben dirigirse hacia la actualización de cartografía a nivel cuenca. El contenido de superficie de cuerpos de agua es diferente para cada cuenca hidrológica, en términos de la identificación de la superficie de cuerpos de agua. Muchos estudios que han aplicado datos SAR están enfocados en cuencas con una gran cobertura de agua con una representatividad mensual. Sería interesante probar y mejorar estas metodologías, en el caso de cuencas más áridas y con menos agua presente durante el año, para determinar un criterio de observación mensual, bimestral o trimestral

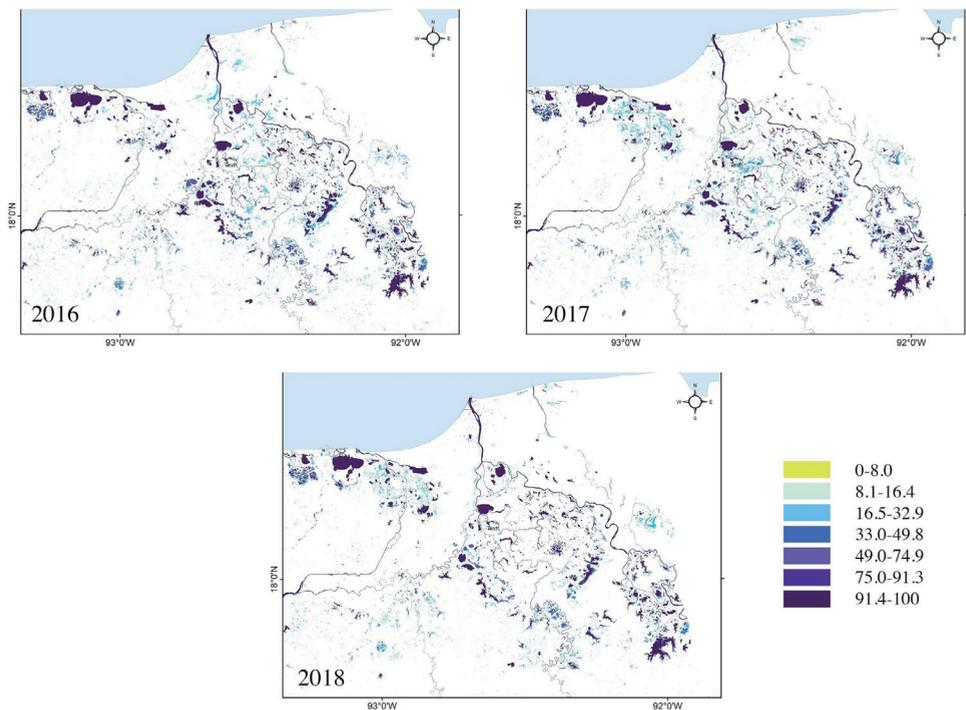


Figura 4. Porcentaje de agua presente por año en la cuenca baja del río Grijalva-Usumacinta. Elaboración propia.

El proyecto Copernicus con SNAPPY y la plataforma Google Earth Engine (GEE) tienen herramientas de procesamiento, con las cuales es posible realizar nuevas formas de procesamiento de imágenes para realizar procesos en cadena, que automatizan los flujos de trabajo en la extracción de información desarrollados en código abierto, para la automatización de cuerpos de agua. Como trabajo futuro se deben implementar procesos de automatización.

Los datos de Sentinel-1 tienen el potencial para obtener información de cuerpos de agua en todo el territorio mexicano en periodos de tiempo mensual. Sin embargo, consideramos necesario conocer los principales patrones espacio-temporales a nivel cuenca, que permitan una visión espacial comprensiva del comportamiento de los cuerpos de agua.

Los métodos expuestos en este capítulo son representativos en la identificación de cuerpos de agua con datos SAR y pueden utilizarse como base para estudios sobre el tema.

Agradecimientos

Este estudio se llevó a cabo en el ámbito del proyecto FORDECYT 2018-10, con número 297259; las fotos e imágenes presentadas en este capítulo son materiales desarrollados en este proyecto. El autor agradece a Gabriela López por el diseño de las figuras. Fotografías: Banco de imágenes de CentroGeo.

Referencias

- Andreoli et al. (2007). “Poyang Hu (Jiangxi Province, P. R. of China) Area Variations between January 2004 and June 2006 Using ENVISAT Low and Medium Resolution Time Series”, en *Geographic Information Sciences*, núm. 13, pp. 1-2.
- Bolanos et al. (2016). “Operational Surface Water Detection and Monitoring Using Radarsat 2”, en *Remote Sensing*, núm. 8 (4), pp. 285.
- Brisco et al. (2009). “A semi-automated tool for surface water mapping with RADARSAT-1”, en *Canadian Journal of Remote Sensing*, núm. 35, pp. 336–344.
- Brisco (2015). Mapping and Monitoring Surface Water and Wetlands with Synthetic Aperture Radar, *Remote Sensing of Wetlands*.
- Carroll et al. (2009). “A new global raster water mask at 250 m resolution”, en *International Journal of Digital Earth*, núm. 2(4), pp. 291-308.
- Chunxi et al. (2008). “Water body information extraction from high resolution airborne synthetic aperture radar image with technique of imaging in different directions and object-oriented”, en *Proceeding of the ISPRS Congress Silk Road for Information from Imagery, Beijing*, pp. 165-168. Disponible en <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/7_pdf/2_WG-VII-2/18.pdf>.
- Cotler-Ávalos y Pineda-López (2008). “Manejo integral de cuencas en México ¿Hacia dónde vamos?”; en *Boletín del archivo histórico del agua*, núm. 13(39), pp. 16-21.
- Feng et al. (2016). “A Global, High-Resolution (30-M) Inland Water Body Dataset for 2000: First Results of a Topographic-Spec-

tral Classification Algorithm”, en *International Journal of Digital Earth*, núm. 9(2), pp. 113-133.

Jiang et al. (2021). “Surface Water Extraction and Dynamic Analysis of Baiyangdian Lake Based on the Google Earth Engine Platform Using Sentinel-1 for Reporting SDG 6.6.1 Indicators”, en *Water*, núm.13.

Kuenzer et al. (2013). “Flood mapping and flood dynamics of the Mekong delta: ENVISAT-ASAR-WSM based time series analyses”, en *Remote Sens*, núm 5(2), pp. 687-715.

Lamarche et al. (2017). “Compilation and Validation of SAR and Optical Data Products for a Complete and Global Map of Inland/Ocean Water Tailored to the Climate Modeling Community”, en *Remote Sens*, núm. 9(36).

Li y Wang (2015). “An automatic method for mapping inland surface waterbodies with Radarsat-2 imagery”, en *International Journal of Remote Sensing*, núm. 36(5), pp.1367-1384.

López-Caloca et al. (2020a). “Analyzing short term spatial and temporal dynamics of water presence at a basin-scale in Mexico using SAR data”, en *GIScience & Remote Sensing*, núm. 57(7), pp. 985-1004.

López-Caloca et al. (2020b). “Mapping Small and Medium-sized Water Reservoirs Using Sentinel-1A: A Case Study in Chiapas, Mexico”, en *Journal of Applied Remote Sensing*, núm. 14.

O’Grady et al. (2014). “The use of radar satellite data from multiple incidence angles improves surface water mapping”, en *Remote Sensing of Environment*, núm. 140, pp. 652-664.

Pekel et al. (2016). “High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes”, en *Nature*, núm. 540(7633), pp. 418-422.

Pirlea et al. (2020). *Atlas of the Sustainable Development Goals 2020:*

From World Development Indicators. Washington, DC: World Bank. Disponible en <<https://datatopics.worldbank.org/sd-gatlas/>>.

- Sabel et al. (2015). "Investigating Radar Time Series for Hydrological Characterisation in the Lower Mekong Basin", en *Remote Sensing Time Series*, núm. 22, pp. 357-381.
- Twele et al. (2016). "Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain", en *International Journal of Remote Sensing*, núm. 37(13), pp. 2990-3004.
- Valdiviezo-Navarro et al. (2019). "Inland water body extraction in complex reliefs from Sentinel-1 satellite data", en *Journal of Applied Remote Sensing*, núm. 13(1).
- Verpoeter et al. (2014). "A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery", en *Geophysical Research Letters*, núm. 41, pp. 6396-6402.
- Wentao-Lv et al. (2010). "Water extraction in SAR images using GLCM and Support Vector Machine", en *IEEE 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SIGNAL PROCESSING PROCEEDINGS*, Beijing, pp. 740-743.
- Xing et al. (2018). "Monitoring monthly surface water dynamics of Dongting Lake using Sentinel-1 data at 10 m", en *PeerJ*.
- Yamazaki et al. (2015). "Development of a global~ 90 m water body map using multi-temporal Landsat images", en *Remote Sensing of Environment*, núm. 171(15), pp.337-351.
- Yesou et al. (2016). "Exploiting Sentinel 1 time series to monitor the largest fresh water bodies in PR China, the Poyang Lake", en *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS*, pp. 3882-3885.
- Zhang et al. (2020). "Automatic Surface Water Mapping Using Polari-

metric SAR Data for Long-Term Change Detection”, en *Water*,
núm. 12(3), pp. 872.

Indicadores de conservación de cuerpos de agua en la cuenca Grijalva

Dr. Felipe Omar Tapia Silva

El objetivo de este artículo es comunicar los resultados más importantes del proceso de generación de indicadores del estado de conservación de cuerpos de agua de la cuenca Grijalva. Estos son definidos como áreas cubiertas con agua, con o sin vegetación, dentro de las mismas y que se presentan en forma permanente, temporal o como suelos saturados con agua. Los indicadores fueron obtenidos mediante el procesamiento de imágenes satelitales de un tipo particular denominado radar. Este tipo de imágenes registra energía emitida por el satélite en la llamada zona de microondas. Estas son una forma de luz (energía electromagnética) que presentan longitudes de onda de menos de un centímetro a un metro. La energía es reflejada por la superficie terrestre y registrada en una imagen digital, de acuerdo con los tipos particulares de cobertura terrestre. Los valores de energía registrados en la imagen permiten diferenciar entre zonas cubiertas con agua y otras zonas. Una característica muy favorable de los satélites de tipo radar es que pueden generar imágenes, incluso cuando se presenta nubosidad sobre las zonas de interés.

Los indicadores fueron definidos en referencia a un mapa base, que define el estado esperable en términos de las últimas tres décadas de los cuerpos de agua.

El documento se divide en los apartados: importancia ecológica del monitoreo de cuerpos de agua; resumen de métodos y técnicas aplicadas; análisis de casos; concentrado de descubrimientos primordiales y conclusiones.

Importancia ecológica del monitoreo de cuerpos de agua

Los humedales y cuerpos de agua en zonas tropicales han recibido mucha menor atención científica que otros ecosistemas como bosques tropicales u otros en zonas no inundables (Ellison, 2004). Además, se cuenta con poca información básica sobre su extensión, flora y fauna, y la existente no es muy accesible a investigadores, administradores y diseñadores de políticas públicas (Ellison, 2004).

Entre los pocos reportes disponibles para los cuerpos de agua de la cuenca del Grijalva, está el de Zamora-Zaud *et al.* (2018), quienes indican que las planicies de inundación son ricas en nutrimentos, debido a que en la época de estiaje dejan depósitos que forman suelo rico en nutrientes. Sánchez *et al.* (2015) reportan que los caudales excedentes de agua de los humedales fluviales (ríos, lagunas y zonas de anegación) provocan condiciones ambientales contrastantes y mantienen su funcionamiento ecológico y, asimismo, fomentan la prestación de servicios ambientales, como aumento en la productividad acuática (abundancia de langostinos, cangrejos y pejelagartos, entre otros), aporte de nutrientes en suelo y agua, y mantenimiento de alta diversidad de invertebrados y vertebrados acuáticos, representativa de los humedales tropicales de Mesoamérica. Las fluctuaciones naturales del ciclo del agua regulan, en diversas escalas espaciales y temporales, los ciclos biogeoquímicos (intercambio de sustancias químicas entre organismos vivos e inertes), la dinámica trófica (de consumo y provisión de energía entre organismos) y la distribución y diversidad de la vegetación en los humedales, así como las actividades productivas primarias y asentamientos en depresiones y planicies de los humedales fluviales (Sánchez *et al.*, 2015).

Resumen de métodos y técnicas aplicadas

Para obtener los indicadores de conservación se ocuparon imágenes de radar, que permitieron generar mapas mensuales de 2016 a 2018, que definen las áreas en las que se detectó la presencia de agua. Posteriormente, se aplicó un método de validación científica de estos resultados, lo que permitió establecer que el mapa tiene un nivel de exactitud del 90 por ciento. Después, mediante un procedimiento de análisis de coincidencia espacial, fue posible obtener el área para cada cuerpo de agua para cada mes y las inundaciones extraordinarias. Este análisis permitió definir si las zonas identificadas con agua, para cada mes, se ubican en la superficie de cada uno de los tipos de agua del mapa base. En tal caso, estas zonas fueron registradas como pertenecientes a ese cuerpo de agua para el mes particular de análisis. En caso de que no, se les registró como zonas con inundaciones extraordinarias, al no estar ubicadas en donde se espera que haya cuerpos de agua, de acuerdo con lo establecido en el mapa base.

El área de cada cuerpo de agua fue evaluada como porcentaje, respecto a su valor en el mapa base, que funcionó como referencia de largo plazo (de los noventa a la actualidad) del estado esperable de los cuerpos de agua observados durante el periodo de estudio (2016 a 2018). El mapa base define los tipos de cuerpos de agua como permanentes, temporales y suelos húmedos y vegetación acuática. Con ese enfoque, fue posible detectar la superficie cubierta con agua de cada cuerpo para cada uno de los meses del periodo de estudio, al definir el tipo de cuerpo de agua y las inundaciones extraordinarias.

Posteriormente, se realizó el proceso de análisis de indicadores, mediante la visualización y el análisis estadístico de resultados en los sistemas de información geográfica, que son programas de cómputo que permiten visualizar y analizar datos con referencia espacial (coordenadas), como los obtenidos en este proyecto. Como se trata de un conjunto de datos de gran tamaño, los indicadores fueron sintetizados y presentados mediante mapas y gráficas.

Análisis de casos

Se presenta un análisis de casos considerados interesantes o representativos de los observados en la investigación. El primero de ellos es la Laguna Maluco, un cuerpo de agua definido como permanente en el mapa base, que durante el transcurso de los meses del periodo sufrió fuertes cambios e incluso durante algunos desapareció. Como caso contrastante, se presenta el análisis de otro cuerpo de agua permanente, la Laguna el Corcho, que se mantuvo prácticamente sin cambio durante el periodo analizado. Los cambios, en cuanto a extensión de estos cuerpos de agua, pueden visualizarse para las cuatro estaciones de los tres años del periodo de análisis en la figura 1. En los mapas de esa figura se incluyen cuerpos de agua detectados para una zona de acercamiento en la cuenca para las temporadas lluvias de invierno (diciembre a febrero), estiaje (marzo y abril), lluvias tropicales (mayo a agosto) y lluvias de tropicales-invernales (septiembre a noviembre) de los tres años. Los cuerpos de agua se distinguen mediante colores: permanentes (en azul), temporales (rosa) y suelos húmedos y vegetación acuática (naranja). Con fines de comparación, se presenta a manera de huella, el área que cada cuerpo de agua debe ocupar, de acuerdo con su definición en el mapa base, en los colores mencionados previamente para cada tipo de cuerpos de agua, pero con un patrón de líneas diagonales en el color correspondiente.

Como puede observarse en la figura 1, la Laguna Maluco es un caso de cuerpo de agua permanente, que en el periodo de estudio nunca cubrió la superficie establecida en el mapa base. Durante 2016, el cuerpo de agua inició con un cubrimiento no tan reducido, pero para la última temporada del año (lluvias de influencia tropical e invernal) prácticamente desapareció. Posteriormente, inició un aumento de su superficie que se mantuvo hasta estiaje de 2017, pero en lluvias tropicales de ese año desapareció por completo. Durante lluvias tropicales e invernales de ese año se recuperó en buena medida, pero durante todas las temporadas de 2018 su cubri-

miento fue mínimo y para la última temporada de ese año quedó fragmentado en pequeños cuerpos de agua de tamaño mínimo. Este caso contrasta con el de la Laguna El Corcho, que durante todas las temporadas de los tres años de estudio mostró cubrimientos de 100 por ciento, respecto a su superficie en el mapa base o muy cercanos a este valor.

Otro caso interesante de analizar se muestra mediante la figura 2, en donde se incluye la extensión de los cuerpos de agua cercanos a la refinería Dos Bocas, así como las zonas de inundaciones extraordinarias, para las temporadas del periodo de estudio.

Los tipos de cuerpos de agua aledaños (cuerpos permanentes principalmente) prácticamente no sufren cambios durante el periodo analizado. Los cuerpos de agua detectados cubren su área definida en el mapa base y por eso sus polígonos mostrados mediante líneas diagonales no se distinguen a esta escala de visualización. La observación más importante respecto a este análisis tiene que ver con que en todas y cada una de las temporadas se observan zonas con inundaciones extraordinarias (en rojo intenso). Este descubrimiento puede considerarse un indicio de que en esas áreas se puede presentar un proceso de formación de cuerpos de agua particularmente de tipo permanente, lo que será motivo de investigación futura.

Concentrado de descubrimientos primordiales

A continuación, se presentan descubrimientos relativos a los indicadores de conservación, considerados como los más relevantes entre los efectuados durante la investigación:

A nivel de la cuenca parece haber poca afectación de cuerpos de agua. Esto corresponde a un efecto de escala relacionado con el nivel geográfico de visualización y análisis. A esta escala, los cuerpos de agua de mayor tamaño, como las presas, son las que dominan la visualización y presentan

pocos cambios; es decir, se mantienen siempre con valores de área de 80 por ciento o más de lo establecido en el mapa base. Esto se observa en la figura 3.

La ubicación de los cuerpos de agua con mayores afectaciones, en cuanto a reducción de área, corresponde con los que están cercanos a asentamientos humanos y carreteras y en el borde del área protegida (reserva de la Biósfera) Pantanos de Centla. Por su parte, los cuerpos de agua que mejor se conservan (indicados en azul y en verde) se ubican dentro del área protegida. Esto se observa en la figura 4.

De la misma manera que a escala de toda la cuenca, a la correspondiente a la zona de mayor concentración de cuerpos de agua, los cuerpos permanentes se mantienen con áreas cercanas a su definición en el mapa base. Esto se puede observar en la figura 5.

A esta misma escala, puede observarse que los cuerpos temporales se encuentran normalmente fuera o al borde del área protegida Pantanos de Centla y son los que más han reducido su área respecto al mapa base. Incluso, muchos (marcados en color rojo) se pueden considerar prácticamente desaparecidos, como puede observarse en la figura 6.

La suma de área en promedio para los 36 meses de estudio para cuerpos permanentes es de 1279 km² para el total del área de estudio y en el mapa base este valor es de 1820 km², lo que significa una reducción del 30 por ciento. En el caso de cuerpos temporales, este valor es de 45.3 km², lo que comparado con su valor en el mapa base (336 km²) indica una reducción de 86.5 por ciento. En cuanto a tendencias, se observa que para cuerpos permanentes la suma de área tiende a disminuir ligeramente durante el periodo analizado. Para cuerpos temporales, suelos húmedos y vegetación acuática este valor tiende a mantenerse estable durante el periodo analizado. Lo anterior puede ser observado en la figura 7.

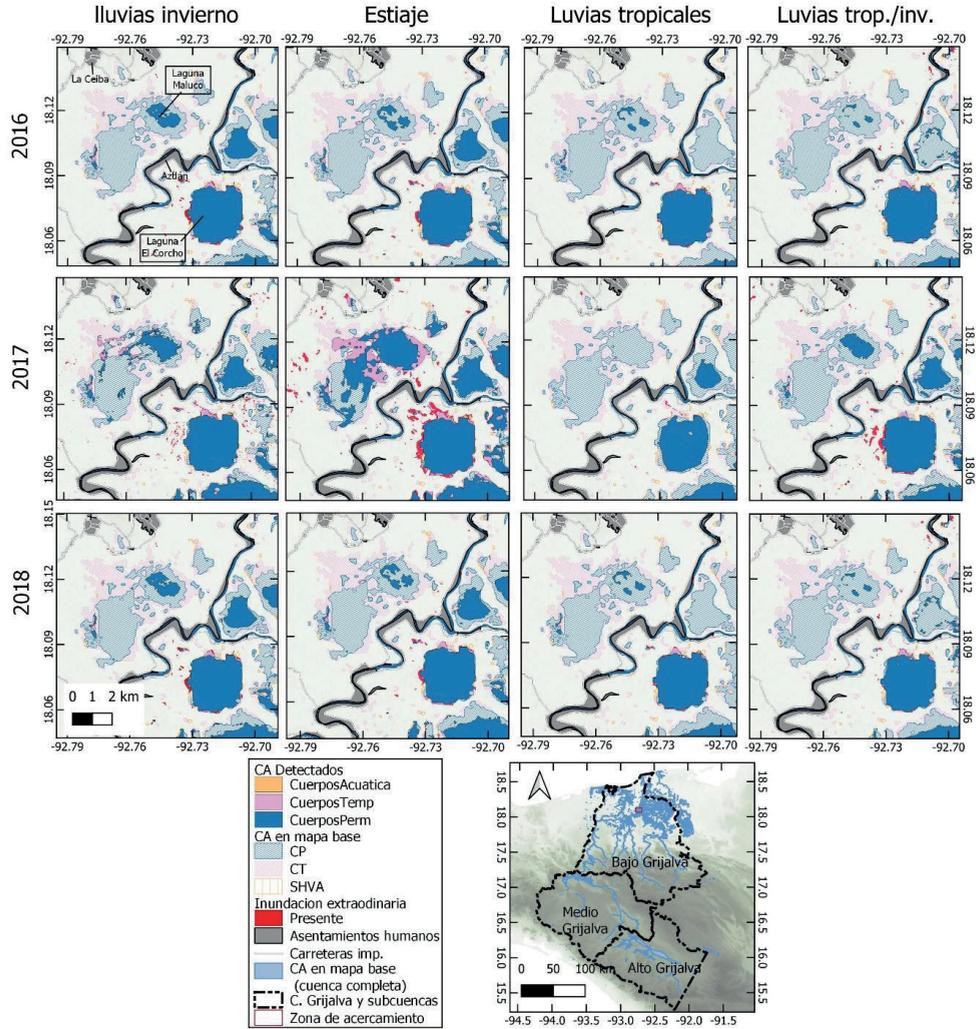


Fig. 1. Seguimiento por temporada de 2016 a 2018 de los cambios en extensión de dos cuerpos de agua, ubicados en la zona de mayor concentración en la cuenca baja. Uno de los cuerpos de agua (Maluco) muestra muchas variaciones y el otro (El Corcho) muestra estabilidad. CP: cuerpos permanentes, CT: cuerpos temporales y SHVA: suelos húmedos y vegetación acuática.

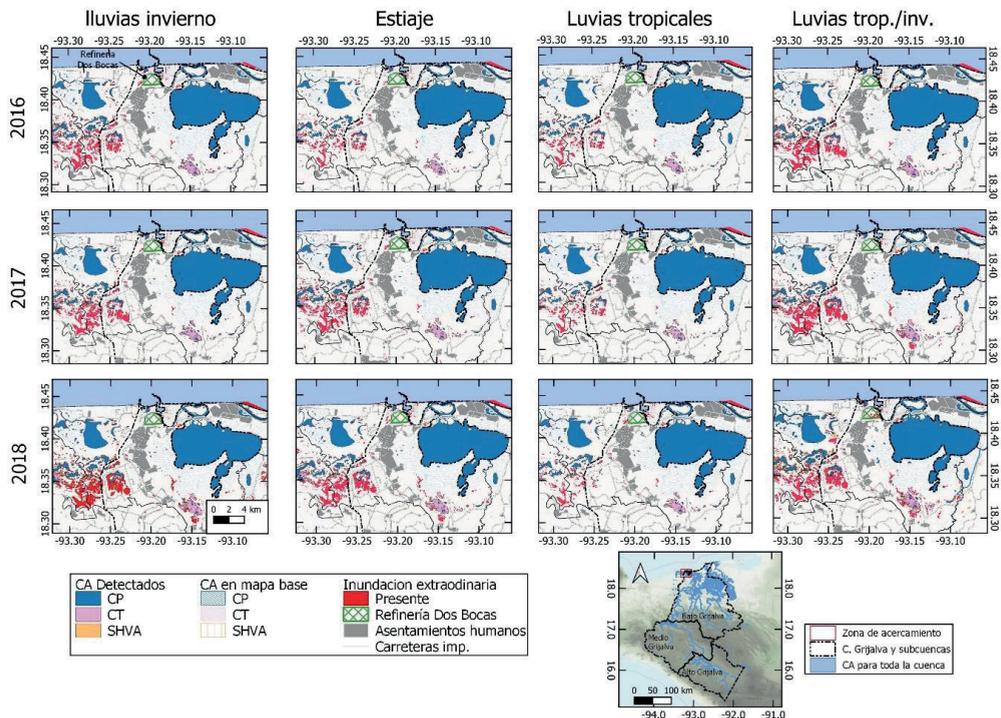


Fig. 2. Seguimiento por temporada de 2016 a 2018 de los cambios en extensión de cuerpos de agua (CA) y de las inundaciones extraordinarias (IE) cercanos a la refinería Dos Bocas. CP: cuerpos permanentes, CT: cuerpos temporales y SHVA: suelos húmedos y vegetación acuática.

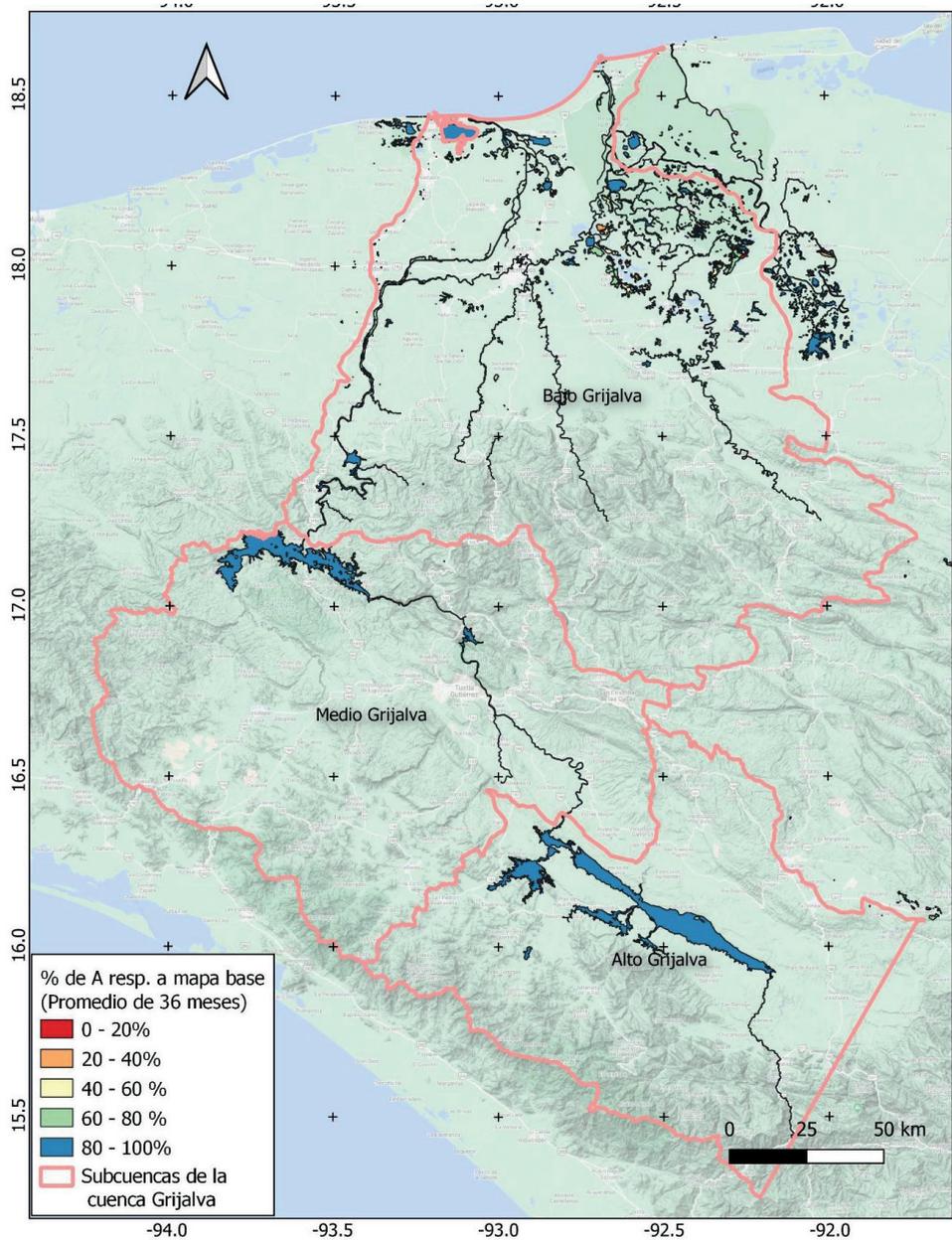


Fig. 3. Valor promedio de área (A) en % de cada cuerpo de agua respecto a su valor en el mapa base (CB) para los 36 meses del periodo de estudio visualizado a escala de la cuenca baja del Grijalva

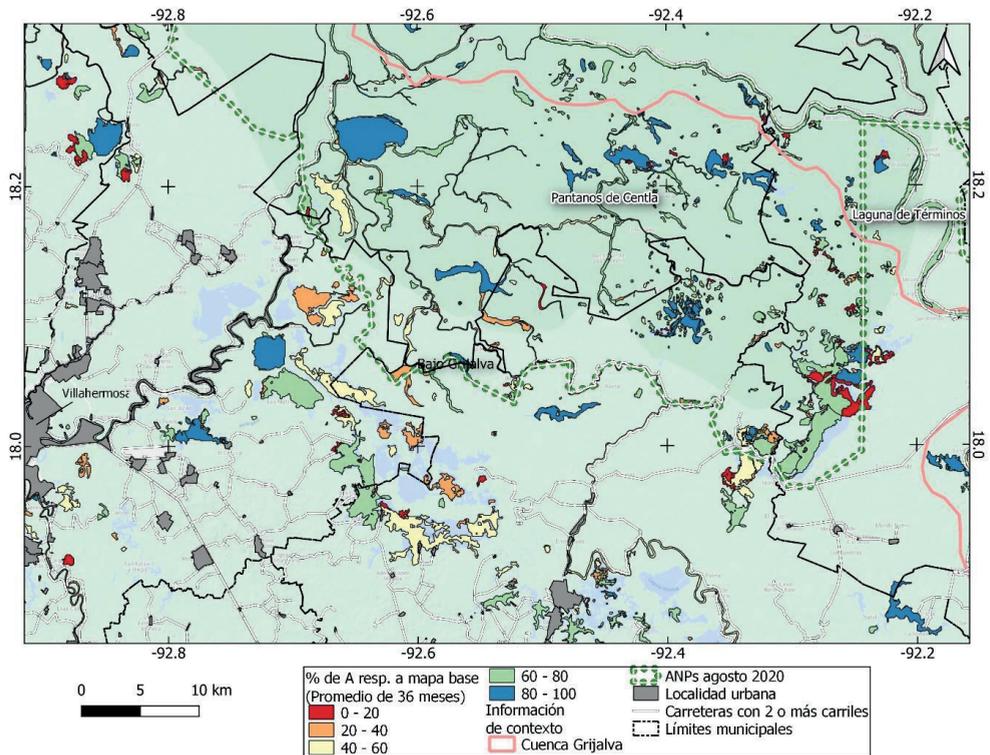


Fig. 4. Valor promedio de área (A) de cada cuerpo de agua (sin distinguir por tipos) en porcentaje, respecto a su valor en el mapa base para los 36 meses del periodo de estudio visualizado a escala la cuenca baja del Grijalva. Este nivel de acercamiento incluye localidades urbanas, carreteras y límites municipales.

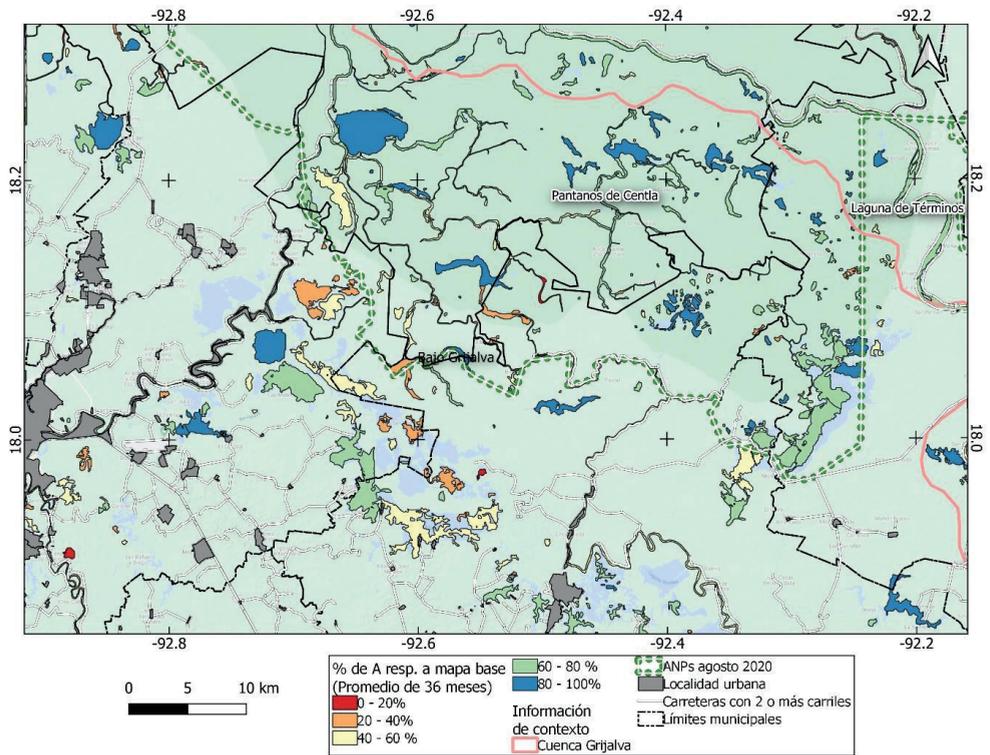


Fig. 5. Valor promedio de área (A) de cada cuerpo Permanente en porcentaje, respecto a su valor en el mapa base para los 36 meses del periodo de estudio visualizado a escala la cuenca baja del Grijalva. Este nivel de acercamiento incluye localidades urbanas, carreteras y límites municipales.

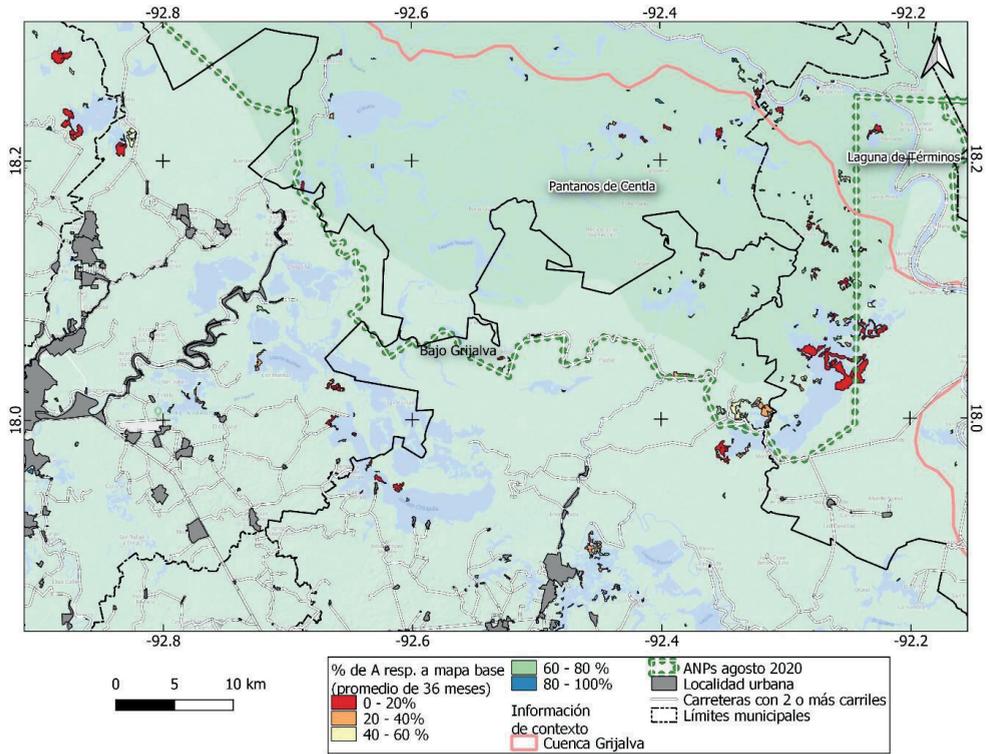


Fig. 6. Valor promedio de área (A) en porcentaje de cada cuerpo temporal, respecto a su valor en el mapa base para los 36 meses del periodo de estudio visualizado a escala la cuenca baja del Grijalva. Este nivel de acercamiento incluye localidades urbanas, carreteras y límites municipales

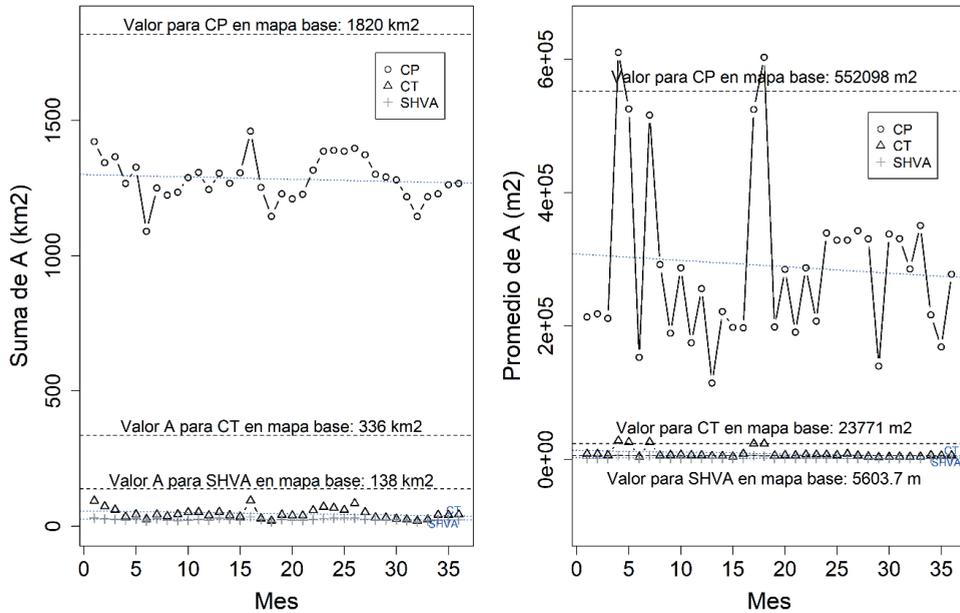


Fig. 7. Suma y promedio de área (A) por tipo de cuerpo de agua para la serie mensual en comparación con su valor definido en el mapa base (CB). CP: cuerpos de agua permanentes, CT: cuerpos temporales, SHVA: suelos húmedos y vegetación acuática. Gráfico incluye líneas punteadas de tendencia de cada serie temporal en color azul.

Conclusiones

El proceso de investigación desarrollado permitió procesar grandes cantidades de datos, que permitieron traducirlos de las imágenes de radar en indicadores de conservación para cada cuerpo de agua. El haber usado este tipo de imágenes para esta cuenca, que presenta abundancia de cuerpos de agua, pero también mucha nubosidad, fue un aspecto clave del enfoque desarrollado, dado que permiten obtener datos aún en condiciones atmosféricas que impiden una buena visibilidad. El uso de un mapa base, obtenido en términos multianuales para monitorear los cambios que cada cuerpo de agua experimentó durante el periodo de estudio y definir su grado de conservación, fue un acierto importante, al tener una referencia de largo plazo para establecer la magnitud de los cambios en cuanto a la superficie de los cuerpos de agua.

Mediante la información generada, fue posible identificar la condición de cada uno de los cuerpos de agua para brindarles la atención requerida mediante los términos e instrumentos de política conducentes. En cuanto a los descubrimientos principales, se detectó una enorme reducción (86.5 por ciento) en la superficie de los cuerpos de agua temporales. Para evitar su pérdida total, deben considerarse de atención prioritaria. Se determinó que los permanentes han perdido un porcentaje mucho menor y, en general, se mantienen con valores superiores al 80 por ciento de lo establecido en el mapa base. Estos cuerpos deben conservarse y su atención con esta finalidad es también prioritaria. Se pudo observar también cómo el área protegida Pantanos de Centla ha servido como una barrera de conservación de los cuerpos de agua, pero que su zona limítrofe, cercana a poblados y vías de comunicación, se ve afectada en cuanto a la condición observada de los cuerpos de agua.

Las actividades del proyecto, respecto al monitoreo de los cuerpos de agua, han detonado un proceso de investigación que permitirá generar aún más insumos desde las ciencias de la información geoespacial para fomentar su monitoreo y conservación. A partir del proceso de extracción y procesamiento de la información, llevado a cabo con imágenes radar y su manejo mediante métodos de análisis espacial, se dispone de indicadores referidos al largo plazo sobre la extensión, configuración y grado de conservación de los cuerpos de agua en el territorio en estudio. Esto permite acercarse al conocimiento de sus tendencias, en cuanto a estabilidad y pérdida. La información y el conocimiento generados pueden ocuparse para diseñar y operar, en términos espacialmente diferenciados, políticas a nivel de cuerpos de agua individuales o a nivel de municipio, para fomentar su conservación y de los servicios ambientales que ofrecen.

Agradecimientos

La información presentada en este artículo fue obtenida en colaboración con un excelente equipo del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo). Ellos fueron la doctora Alejandra López-Caloca, quien coordinó el procesamiento de las imágenes radar; la M.C. Aymara Ramírez y la licenciada Pilar Henao, quienes realizaron las actividades de validación de las imágenes (coordinadas por el autor de este artículo); el licenciado José Luis Gonzaga, quien procesó el mapa base, así como la especialista en Geomática Guadalupe Rivera quien apoyó en el procesamiento de la información. El autor también expresa su agradecimiento a la M.C. Rosa Ivette Tapia Silva, quien revisó este documento para mejorar sus características de comunicación al público. El autor agradece especialmente a la doctora López-Caloca por haberlo invitado a participar en la investigación. El autor también agradece la confianza de la doctora. Elvia Martínez Viveros, quien muy atinadamente coordinó el proyecto de investigación “PROYECTO FORDECYT-2018-10. ANÁLISIS Y MONITOREO DEL CRECIMIENTO DEL MEDIO URBANO Y DEL COMPORTAMIENTO DE CUERPOS DE AGUA DESDE UN ENFOQUE DE SUSTENTABILIDAD; CASOS DE ESTUDIO: CORREDOR METROPOLITANO CENTRO PAÍS Y CUENCA DEL GRIJALVA”. Este artículo es un producto de ese proyecto. El autor le agradece a la doctora Martínez Viveros la confianza y la posibilidad de participar en él. Finalmente, el autor agradece al CentroGeo y a su director, el doctor José Ignacio Chapela Castañares, quienes le permitieron hacer una estancia de investigación y participar en este proyecto.

Referencias

- Ellison. A. M. (2004). "Wetland of Central America", en *Wetlands ecology and Management*, núm. 12, pp. 3-55.
- Sánchez, A. J., Salcedo, M. A., Florido, R., Mendoza, J. D., Ruíz-Carrera, V. y Álvarez-Pliego, N. (2015). "Ciclos de inundación y servicios ambientales en Grijalva-Usumacinta", en *ContactoS*, núm. 97, pp. 5-14.
- Zamora-Zaud N., Pérez Sánchez E., Carballo Cruz V. R. y Galindo Alcántara A. (2018). "Dinámica de las terrazas fluviales en la subcuenca Grijalva-Villahermosa", en *México Bol. Soc. Geol. Mex*, núm 71, pp. 805-817. Disponible en <<http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2019v71n3a10>>.

Mapeo de la mancha urbana en el tiempo. Caso de estudio: corredor metropolitano del Bajío

José Luis Silván Cárdenas, Juan Carlos

Valdiviezo Navarro, Adán Salazar Garibay

Resumen

El monitoreo de los asentamientos humanos en el tiempo, mediante imágenes satelitales, es una necesidad recurrente para el estudio de los sistemas urbanos y su interacción con los sistemas naturales. Si bien el problema se ha abordado desde el advenimiento de las tecnologías satelitales, los avances tecnológicos y la emergencia de problemas asociados a la sustentabilidad de las urbes, demanda un continuo replanteamiento del problema de mapeo, así como una constante actualización de la información acerca de su distribución y densidad. En este capítulo se describen los tratamientos necesarios que se dieron a las imágenes del satélite Landsat 8, para generar una serie temporal de porcentajes de cobertura urbana en el corredor metropolitano del centro país, que fue un insumo básico para la segunda etapa del proyecto “Análisis y monitoreo de la dinámica de crecimiento del medio urbano y del comportamiento de cuerpos de agua, desde un enfoque de sustentabilidad; casos de estudio: Corredor Metropolitano Centro País y Cuenca del Grijalva” (Proyecto FORDECYT no. 297259). El texto deja de lado numerosos detalles técnicos para favorecer una mejor comprensión del problema y la naturaleza de los datos presentados.

Introducción

Una ventaja de emplear imágenes satelitales, para conocer la cobertura urbana, es que esta tecnología ha registrado la superficie terrestre desde principios de los años setenta, lo que permite reconstruir la evolución temporal de los asentamientos urbanos desde entonces, al posibilitar el estudio de su dinámica, en relación con otras variables que, se piensa, promueven la urbanización o son propiciadas por ella. Por ejemplo, el impacto del crecimiento urbano en la contaminación de cuerpos de agua y en la deforestación de zonas boscosas, representa un tema de gran interés para encausar políticas ambientales. Asimismo, la relación entre el crecimiento de la cobertura urbana y la dinámica poblacional es otro tema de gran interés, para quienes se encargan de diseñar las políticas demográficas o para quienes estudian el desarrollo económico de una región.

En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) es el organismo encargado de generar, analizar y distribuir productos cartográficos y estadísticos, que incluyen la de las zonas urbanas y rurales, por municipio y entidad federativa. Los datos de las localidades urbanas del país son generados a partir de los resultados de los Censos de Población y Vivienda, degradados hasta el nivel de área geoestadística básica (AGEB) y manzana. Un AGEB es la extensión territorial que corresponde a la subdivisión de las áreas geoestadísticas municipales. Según sus características, se clasifican en AGEB urbana o rural; la urbana es un área geográfica ocupada por un conjunto de una a 50 manzanas, perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno, cuyo uso de suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, y sólo son asignadas al interior de las localidades urbanas que, por definición, es donde viven más de 2500 personas (Inegi, 2010). Los AGEB urbanos están disponibles, para su análisis, para años específicos y se utilizan como indicadores de la expansión urbana. El catálogo del Sistema Urbano Nacional (CONAPO, 2012) identifica 384

ciudades de más de 15 mil habitantes, de las cuales 59 son zonas metropolitanas, 78 conurbaciones y 247 centros urbanos. Dichas áreas fueron identificadas a partir del censo de población y vivienda de 2010, por lo que su delimitación y nivel de detalle quedan necesariamente supeditadas a las unidades censales mínimas. Desde luego, el sesgo demográfico en la definición de las áreas urbanas es frecuente, pero no se niega que “en su concepción más abstracta de corte funcional, la ciudad representa el espacio físico o la configuración territorial en donde se establece la población y tienen lugar los procesos socio-económicos” (CONAPO, 2012), lo que abre la oportunidad para una definición más acorde a lo que pueden registrar las imágenes satélites.

Por su parte, la generación de datos de cobertura urbana, mediante imágenes satelitales, es un problema que ha sido ampliamente abordado por la academia y se han publicado varios productos de cobertura urbana a nivel global, aunque no necesariamente con el nivel de detalle y con la frecuencia temporal que demandan algunas aplicaciones. La Tabla 1 se refiere a los productos de cobertura urbana globales, publicados durante la década pasada. Dos características fundamentales de estos productos, son la resolución espacial, que es el tamaño del elemento de área mínima (pixel) que uno puede distinguir en el mapa, y la resolución temporal, que es el intervalo de tiempo entre tomas consecutivas de las imágenes; de ellos, el producto con la mayor resolución espacial y temporal que hasta ahora existe es el de Liu, y otros con 30 metros de resolución y un año de frecuencia (Liu *et. al*, 2020); es decir, que para cada pixel de 30 x 30 metros de la superficie terrestre (salvo los polos) y para cada año entre 1985 y 2015 inclusive, se registró si es urbano o no.

Tabla 1

A la luz de los datos disponibles, cabe preguntarnos si podemos mejorar la resolución espacial y temporal de la cobertura urbana, o al menos si podemos saber qué tan urbanizada está el área de cada pixel. Desde luego, esto conlleva la necesidad de establecer una escala de medición de la urbanización.

En el presente capítulo se define dicha escala de urbanización y se describe cómo se generó una serie temporal del porcentaje de cobertura urbana, de 2014 a 2020, para el corredor metropolitano del centro del país, a partir de compuestos trimestrales de imágenes multispectrales Landsat 8 con tamaño de pixel de 30 metros. Los datos referidos están disponibles desde el aplicativo Urbanización del Corredor Metropolitano Centro-País (Ilustración 1) en el siguiente vínculo:

⟨<https://jsilvan.users.earthengine.app/view/asentamientos-urbanos>⟩.

Ilustración 1

Relevancia del área de estudio

El Corredor Metropolitano Centro País (CMCP), por su dinámica demográfica y económica, es una región urbana con características relevantes para estudiar su expansión periurbana. Estas dinámicas se detonan principalmente por cuatro zonas metropolitanas (ZM): Aguascalientes, León, Querétaro y San Luis Potosí, que incluyen en sus zonas de influencia otras ZM a municipios con ciudades de más de 100 mil habitantes y una variedad de pequeños poblados. Es una región con relaciones funcionales relevantes, tanto entre sus conglomerados urbanos, como con las regiones más grandes y pujantes del país, como la megalópolis de la ZM de la Ciudad de México y la ZM de Guadalajara. Sus ZM crecen más que el promedio anual del conjunto de otras del país; por su dinámica demográfica, con datos de 2015, Guanajuato se reconoció como ZM. El crecimiento en 2016 del PIB en esta región, compara positivamente con el índice nacional, al destacar el de Aguascalientes (9.8 por

ciento); por su parte, las ZM de León y Querétaro sobresalen por su contribución porcentual al PIB nacional; entre sus conglomerados urbanos, se observan relaciones funcionales, como los viajes cotidianos al trabajo, que son más intensos cuando son de personas con alto nivel de capital humano.

La mancha urbana como superficies impermeables

Desde el punto de vista de la ciencia del cambio de suelo (*land change science*), las áreas urbanas se pueden cuantificar en términos de la cobertura de superficies impermeables (Weng, 2012), que son (principalmente) elementos antropogénicos, a través de los cuales el agua no se infiltra al suelo, como caminos pavimentados, carreteras, banquetas, estacionamientos, techos, etcétera, por lo que suelen ser consideradas como un indicador del grado de urbanización o como uno de la calidad ambiental de zonas habitadas, ya que en grandes extensiones pueden indicar riesgo de inundaciones o carencia de servicios ambientales, como captura de carbono, recarga de acuíferos, producción de oxígeno por la vegetación, entre otros (Ilustración 2).

Ilustración 2

Una forma práctica de mapear las superficies impermeables, en imágenes satelitales de resolución media (con píxeles de entre 10-100 metros), es mediante la conceptualización de los píxeles de la imagen, como mezclas de distintos materiales espectralmente puros llamados miembros extremos (*endmembers*), entre los cuales se encuentran materiales permeables e impermeables. La contribución de cada material puro al píxel se llama abundancia y proporciona una medida del área cubierta. Esta conceptualización nos permitió determinar la abundancia de superficies impermeables en el corredor metropolitano centro país (Ilustración 3), mediante un algoritmo conocido como desmezclado espectral lineal.

Ilustración 3

Desmezclado espectral lineal

El método del desmezclado espectral lineal consiste en determinar las abundancias de cada material puro, a partir de un modelo matemático de la mezcla espectral de dichos materiales (Ilustración 4) (Keshava y Mustard, 2002). La pregunta obvia es: ¿cuáles deben ser los materiales a considerar como miembros extremos y cómo se obtienen sus valores espectrales? Más aún, ¿qué es un miembro extremo? Este concepto se heredó del campo de la mineralogía, en donde un mineral es considerado miembro extremo por encontrarse al extremo de una serie mineral en términos de su pureza, por lo que cualquiera de la serie se pueda representar como combinación de dos o más miembros extremos de la misma.

Ilustración 4

Para el caso del mapeo de la cobertura terrestre, a partir del desmezclado espectral, los miembros extremos son los tipos de cobertura, cuyas firmas espectrales no se pueden generar como la combinación de otras presentes en la imagen. Por ejemplo, las superficies hechas de teja, lámina, cemento o asfalto, pueden ser consideradas como miembros extremos de las impermeables, mientras que la vegetación verde o seca, el agua, la arena, la roca y la arcilla son ejemplos de miembros extremos de la cobertura de superficies permeables. Ahora bien, las firmas espectrales de los miembros extremos son los valores que tendría un pixel si estuviera cubierto exclusivamente del material en cuestión, por lo que se pueden extraer de la misma imagen. Aunque eso es posible en la mayoría de los casos, en general, y sobre todo cuando el tamaño del pixel de la imagen es grande,

en relación al tamaño de las superficies de los miembros extremos, resulta difícil si no es que imposible, encontrar la firma espectral pura. En esos casos, la alternativa es recolectar firmas espectrales en campo o a partir de mediciones hechas en laboratorios y que son publicadas como bibliotecas espectrales de materiales; si esto se puede evitar es mejor, ya que las mediciones, en condiciones distintas a las de la toma de la imagen, ocasionarían errores en los mapas de abundancia. En nuestro caso, sólo descartamos la firma de asfalto, ya que no fue posible encontrar un área relativamente grande cubierta con este material. La Ilustración 4 muestra la ubicación y la firma espectral de los miembros extremos, extraídos de una de las imágenes de la serie.

Ilustración 5

Otra cuestión a decidir, es el nivel de restricción que se impone al problema de optimización, en el cual el objetivo es minimizar la diferencia entre la firma mezclada que el modelo predice y la que presenta el pixel, ya que se complica sustancialmente al imponer las siguientes restricciones (Silván-Cárdenas y Wang, 2010):

- Las abundancias en el pixel deben sumar uno.
- Las abundancias son valores no negativos.

Cuando se imponen ambas restricciones, se trata de un desmezclado completamente restringido, pero si sólo se impone una de las dos, es parcialmente restringido; y si no se impone ninguna, se dice que es sin restricciones. Desde el punto de vista computacional, el desmezclado sin restricción es el más simple, mientras que el completamente restringido es el más complejo. Si elegimos el problema más simple, existe la posibilidad de que las abundancias obtenidas no tengan una interpretación válida. ¿Qué

significa una abundancia negativa o una abundancia sea mayor a uno? Que el modelo no es apropiado o no está bien constreñido. Esto suele pasar si se omite un miembro extremo que es abundante o que el modelo no captura apropiadamente el mecanismo de mezclado. Al asegurar que todas las abundancias cumplen con las dos restricciones, y sólo entonces se puede garantizar la interpretación de las abundancias como una fracción del área cubierta por el material, por tanto pueden ser agregadas en fracción de superficies impermeables (las no impermeables son el complemento a uno), y escaladas a porcentaje de cobertura. En suma, es necesario aplicar un desmezclado espectral completamente restringido.

La mancha urbana como luces nocturnas

Los satélites no sólo captan la luz reflejada de las superficies durante el día, sino también la luz emitida por las fuentes de iluminación durante la noche (Ilustración 6). La intensidad de la luz emitida desde el área del pixel correlaciona con el tamaño de la población, el poder adquisitivo y el grado de urbanización del área en cuestión, por lo que se ha sugerido como un indicador de éstos en lugares donde no se cuenta con datos públicos o los existentes están desactualizados, (Martin, y Vargas, 2020).

Ilustración 6

Al ser la intensidad luminosa una medida del grado de urbanización, no se requieren transformaciones complejas para mapear la mancha urbana (como el desmezclado espectral) y generalmente basta con la aplicación de una simple regla: un pixel es urbano si presenta un valor de iluminación más allá de un valor mínimo; de lo contrario, deben ser considerados no urbano. Entonces, ¿por qué no sólo se emplean imágenes nocturnas para mapear las áreas urbanas? La intensidad de luz nocturna es muy débil

cuando se observa a más de 800 km de distancia, por lo que los sensores satelitales se deben diseñar para integrar la luz de áreas relativamente grandes, del orden de 20 o más hectáreas de superficie; es decir, se sacrifica el detalle en favor de una mayor sensibilidad.

Entonces, ¿basta con el desmezclado espectral de imágenes de menor resolución espacial? No. Las manchas urbanas que se detectan con imágenes de luces nocturnas suelen presentar menos detecciones falsas que las que se generan con las imágenes multiespectrales y el desmezclado espectral, por lo que las primeras se suelen emplear para filtrar las detecciones falsas que se cometen con las segunda; de esa manera, se mantiene el nivel de detalle de los datos, pero con menos errores. Un ejemplo de ello se muestra en la Ilustración 7, en el cual las zonas con suelos rocosos, que fueron detectados como superficies impermeables e incluidas como parte de la cobertura urbana por el desmezclado espectral, son excluidas al considerar los valores de iluminación nocturna que presentan.

Ilustración 7

Lidiar con cambios ilógicos

Una característica única de la cobertura urbana es que tiende a ser irreversible; es decir, que una vez que un área se ha urbanizado, es difícil que el cambio se revierta (al menos en cuanto a infraestructura se refiere; en población es otra historia). Esta característica implica que el porcentaje de cobertura en el área de un pixel no debe decrecer, sino que debe crecer durante un periodo de desarrollo hasta alcanzar su máxima densidad, donde se estabilizará. A nivel de la mancha urbana, se puede poblar nuevas áreas en las periferias, las cuales se densificarán gradualmente en el tiempo, hasta formar un continuo con la mancha urbana preexistente.

Ilustración 8

Contrario a ese sentido común, las observaciones satelitales del porcentaje de cobertura urbana por pixel, en el tiempo, parecieran oscilar (Ilustración 8); si se observa con detenimiento, tienden a coincidir con los ciclos anuales, al indicar una menor cobertura urbana durante la época de lluvias (mayo a octubre) y mayor durante la época seca (noviembre a abril). Esto es bastante razonable, si se considera la presencia de vegetación urbana, sobre todo donde las copas de los árboles se extienden sobre calles, banquetas y techos, lo que suele causar una subestimación de las superficies impermeables que es alrededor del 30 por ciento (Weng, 2012). Este hecho es la principal razón por la cual el mapeo de la cobertura urbana, mediante imágenes satelitales multiespectrales, se realiza con una frecuencia anual o multianual, al tratar de evitar la época de lluvias.

Cabe preguntarnos si es posible compensar las variaciones estacionales en la serie trimestral del porcentaje de cobertura urbana. Sabemos que la serie debe presentar la característica no decreciente y en la época seca los valores son más aproximados a lo real; por lo tanto, es seguro suponer que la envolvente superior de la curva puede ser una buena aproximación a la variación real del porcentaje de cobertura urbana. Una forma de obtener dicha envolvente y forzar la característica no decreciente es asignar a la segunda fecha el máximo entre el valor actual y el de la fecha previa, y repetir el proceso sucesivamente con cada fecha subsecuente al tomar el valor actualizado de la fecha previa, lo que llamaremos como filtro máximo acumulado (Ilustración 9).

Ilustración 9

¿Qué pasa si hay errores de origen? ¿No se acarrearán de las fechas previas

a las fechas recientes? Si un pixel no cumple la suposición de no decremento en el porcentaje de cobertura urbana, toda la serie en ese punto estará mal; por fortuna, esos casos son poco frecuentes. Pero es posible que algunas superficies impermeables no sean permanentes; los techos móviles que se usan en campos de cultivos, para protegerlos de eventos meteorológicos extremos, son un claro ejemplo de esto. La Ilustración 10 muestra las series temporales originales (derecha) para puntos en campos de cultivos (izquierda). Las firmas temporales sugieren que el techo se colocó por algún tiempo y luego se retiró. La imagen de la izquierda confirma la posición del techo en 2017 (círculos rojos). Afortunadamente, en la mayoría de los casos, los cultivos se encuentran alejados de la iluminación nocturna que caracteriza los asentamientos, por lo que los techos móviles son eliminados por el enmascaramiento de luces nocturnas (vea la sección anterior), y no contribuyen significativamente a la sobreestimación de la cobertura urbana. En el ejemplo de la Ilustración 10, esto ocurre con las series de todos los puntos, salvo el punto azul que está contiguo a los edificios de la finca, por lo que el filtro máximo acumulado, lo incluye como urbanizado a partir de 2018, fecha en se colocó el techo.

Ilustración 10

Urbanización: ¿en qué momento ocurre?

Esta es una pregunta que requiere diferenciar lo urbano de lo no urbano, en cada instante de tiempo y en cada área de pixel. Sin entrar en debate sobre la definición de lo urbano y lo no urbano, acordemos que un área (la de un pixel, por ejemplo) se urbaniza justo cuando el porcentaje de cobertura de superficie impermeable incrementa por primera vez, en al menos una cantidad, digamos un 25 por ciento, y ocurre en un lapso de tiempo determinado, digamos un año. Desde luego, esta definición podría descar-

tar áreas que se urbanicen con mayor lentitud. En esos casos, diremos que simplemente no es posible determinar con precisión cuándo ocurre la urbanización. Tomada esta definición, se generó un mapa donde el valor en cada píxel corresponde al tiempo (año y fracción trimestral) en que ocurrió la urbanización. Se trata de una espacialización del tiempo que permite visualizar la progresión del proceso de urbanización.

Ilustración 11

La Ilustración 11 muestra ejemplos de visualización del año de urbanización con una escala de colores. Las áreas grises corresponden a áreas donde no se detectó un año de urbanización, pero estaba urbanizada desde antes de 2014. Como es de esperarse, la urbanización de años recientes ha ocurrido en las periferias de la mancha urbana preexistente. Si bien el mapa no indica cuál es el nivel de urbanización alcanzado, el tener un valor de tiempo es indicativo de que al menos se alcanzó un 25 por ciento en el porcentaje de sellamiento, en el año indicado por el valor del píxel.

Confiabilidad e incertidumbre

Cuando empleamos mapas para sacar información es común preguntarnos ¿qué tan certera es esa información? La efectividad de las decisiones basadas en la información de los mapas va en función de su calidad. Medir la calidad de un mapa de categorías no es una tarea trivial, ya que requiere la selección apropiada de valores de referencia extraídos del mundo real, ya sea mediante muestreo en campo o mediante otras fuentes de alta confiabilidad. En esos casos, el método estándar son los índices de confiabilidad, basados en la matriz de confusión, que es una tabla de contingencia que resume las intersecciones entre las clases de referencia y las que asignó el clasificador. El problema se complica cuando en lugar de evaluar

una variable categórica que sólo toma los valores urbano y no urbano, se quiere evaluar una que representa la intensidad de la urbanización, como el porcentaje de cobertura urbana subpixel. Por si no fuera poco, se desea evaluar la consistencia de la serie temporal, más que la de cada mapa estático. En ese caso, y si bien se han propuesto algunas alternativas metodológicas (Silván-Cárdenas y Wang, 2008), el cuello de botella es la recolección de datos de referencia contra los cuales contrastar la serie.

Debido a todas esas limitaciones, la evaluación de estos productos aún representa un reto técnico para los especialistas en el área. La alternativa tomada en el estudio fue aplicar umbrales para generar dos categorías (urbano y no urbano), y sólo evaluar algunos mapas representativos de la serie. Los datos de referencia se generaron con ayuda de la herramienta de libre acceso CollectEarth (<https://collect.earth/>) y se interpretaron datos auxiliares provenientes principalmente de imágenes históricas de alta resolución espacial. Las observaciones más importantes del ejercicio fueron: 1) que la confiabilidad general alcanzada fue de alrededor del 80 por ciento, al ser mayor para los años 2014-2017; 2) que el valor umbral óptimo para el porcentaje de cobertura, es decir, el que permite separar lo urbano de lo no urbano apropiadamente, cae entre 25-50%; 2) que la principal fuente de error fue la degradación de las imágenes multiespectrales por efectos atmosféricos, y 3) que el tipo de error preponderante fue la sobreestimación.

Comentarios finales

Los resultados de este ejercicio demuestran las capacidades y limitaciones para cuantificar la cobertura urbana a nivel regional. Como conclusiones principales, destacan los siguientes puntos:

El mapeo subpixel de la cobertura urbana es factible mediante imágenes satelitales multiespectrales de resolución media (tipo Landsat, Senti-

nel o SPOT), pero se requiere la combinación con otros insumos, como las imágenes de luces nocturnas y de alta resolución espacial, para la corrección de errores sistemáticos.

El filtrado en tiempo de los productos de cobertura urbana, puede reducir cambios ilógicos de cobertura, pero se requiere de una plataforma que permita el procesamiento de series de tiempo de grandes extensiones geográficas, así como conocimiento sobre los procesos de cambio.

La explotación de herramientas libres, como Google Earth, Google Earth Engine, Google Earth Engine Apps y Collect Earth, para el procesamiento, visualización y análisis en la nube, proporcionan una oportunidad sin precedente para el estudio de la dinámica de procesos, mediante imágenes satelitales de libre acceso.

La evaluación de productos subpixel aún presenta limitaciones, que sólo podrán ser superadas cuando los datos de alta resolución espacial y temporal, así como herramientas más sofisticadas que permitan su interpretación automatizada, sean accesibles.

Finalmente, los resultados obtenidos en este ejercicio representaron un insumo primordial para la ejecución de la segunda etapa del proyecto “Análisis y monitoreo de la dinámica de crecimiento del medio urbano y del comportamiento de cuerpos de agua, desde un enfoque de sustentabilidad; casos de estudio: Corredor Metropolitano Centro País y Cuenca del Grijalva (Proyecto FORDECYT no. 297259)”. Los datos son parcialmente accesibles desde la plataforma y podrán ser proporcionados en su totalidad, a solicitud expresa para fines no comerciales.

Referencias

- Ch, R., Martin, D. A. y Vargas, J. F. (2020). “Measuring the size and growth of cities using nighttime light”, en *Journal of Urban Economics*, pp. 103-254.
- Esch, T., Marconcini, M., Felbier, A., Roth, A., Heldens, W., Huber, M., Dech, S. (2013). “Urban footprint processor—Fully automated processing chain generating settlement masks from global data of the TANDEM-X mission”, en *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, núm. 10(6), pp. 1617-1621.
- Gong, P., et al. (2020). “Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018”, en *Remote Sensing of Environment*, núm. 236, pp. 111-510.
- Keshava, N. y Mustard, J. F. (2002). “Spectral unmixing”, en *IEEE signal processing magazine*, núm. 19(1), pp. 44-57.
- Liu, X., et al. (2018). “High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform”, en *Remote sensing of environment*, núm. 209, pp. 227-239.
- Liu, X., et al. (2020). “High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015”, en *Nature Sustainability*, pp. 1-7.
- Pesaresi, M., et al. (2013). “A global human settlement layer from optical HR/VHR RS data: concept and first results”, en *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, núm. 6(3), pp. 2102-2131.
- Schneider, A., Friedl, M. A. y Potere, D. (2010). “Mapping global urban areas using MODIS 500-m data: New methods and datasets based on ‘urban ecoregions’”, en *Remote Sensing of Environment*, núm. 114(8), pp. 1733-1746.
- Silván-Cárdenas, J. L. y Wang, L. (2010). “Fully constrained linear spectral unmixing: Analytic solution using fuzzy sets”, en *IEEE Transactions*

on *Geoscience and Remote Sensing*, núm. 48(11), pp. 3992-4002.

Silvan-Cardenas, J. y Wang, L. (2008). "Sub-pixel confusion-uncertainty matrix for assessing soft classifications", en *Remote Sensing of Environment*, num. 112(3), pp. 1081-1095.

Weng, Q. (2012). "Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends", en *Remote Sensing of Environment*, num. 117, pp. 34-49.

Lista de tablas

Tabla 1. *Productos de cobertura urbana global y sus características de resolución espacial y temporal.*

| v | Resolución (metros) | Referencia temporal | Referencia |
|---|---------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Global Urban Areas | 500 | 2001-2002 | (Schneider, Friedl y Potere, 2010) |
| Global Human Settlement Layer | 10, 50 y 500 | 2013 | (Pesaresi et al., 2013) |
| Global Urban Footprint | 12 | 2011-2013 | (Esch et al., 2013) |
| Global Urban Land | 30 | 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 | (Liu et al., 2018) |
| Global Artificial Impervious Area | 30 | 1985-2018 | (Gong et al., 2020) |
| Normalized Urban Areas Composite Index | 30 | 1985-2015 | (Liu et al., 2020) |
| BASE DE EXTENSIÓN DE ÁREAS METROPOLITANAS | 1000 | 2000, 2010 | (Ch, Martin y Vargas, 2020) |

Lista de figuras

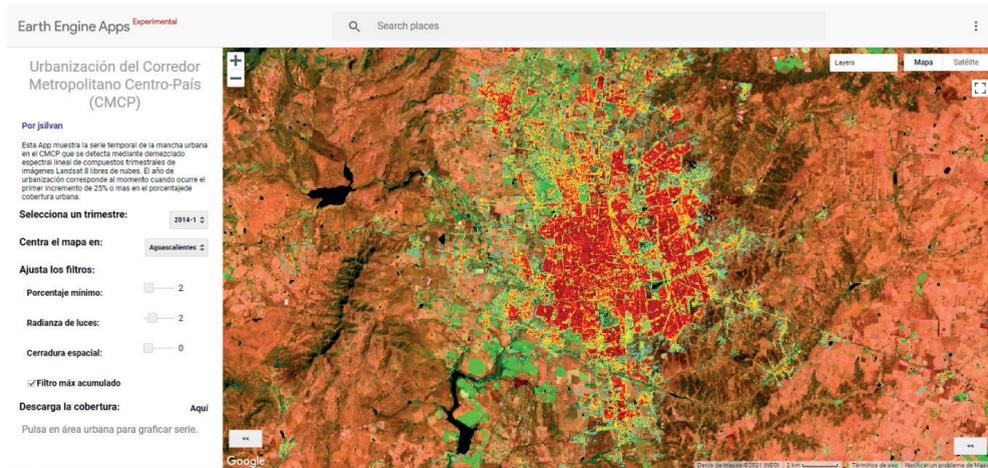


Ilustración 1. Pantalla inicial del aplicativo Urbanización del Corredor Metropolitano Centro-Pais (CMCP)

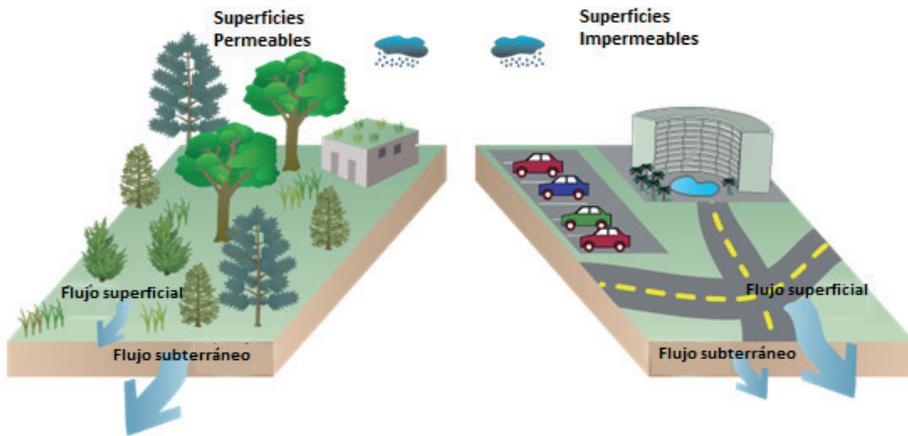


Ilustración 2. Superficies permeables e impermeables.

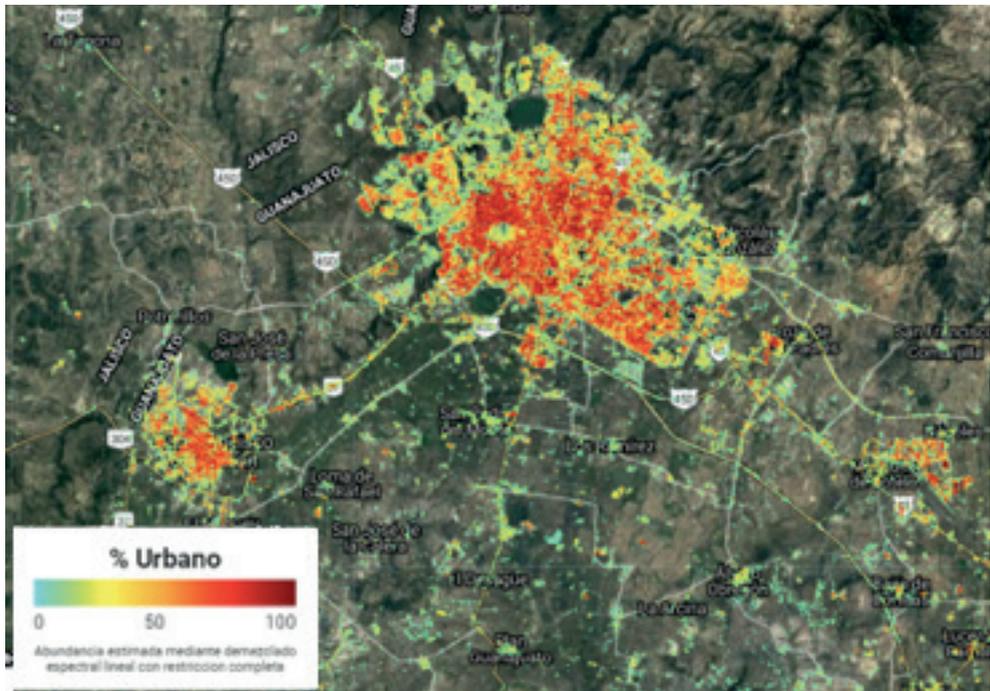


Ilustración 3. Porcentaje de cobertura urbana estimado, mediante desmezclado espectral completamente restringido.

Ilustración 4. Modelo de mezclado espectral lineal

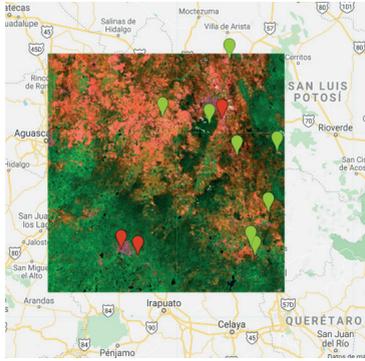


Ilustración 5. Ubicación y firma espectral de los miembros extremos (endmembers).



Ilustración 6. Imagen de luces nocturnas registradas por sensor viirs sobre un mapa base.

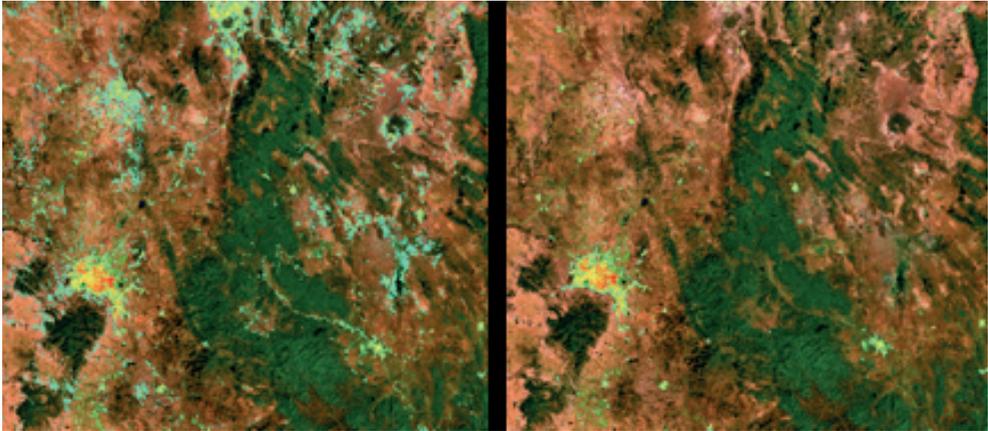


Ilustración 7. Ejemplo del antes y después de aplicar la máscara de radianza de luces de imágenes nocturnas al mapa de porcentaje de cobertura urbana por desmezclado espectral.

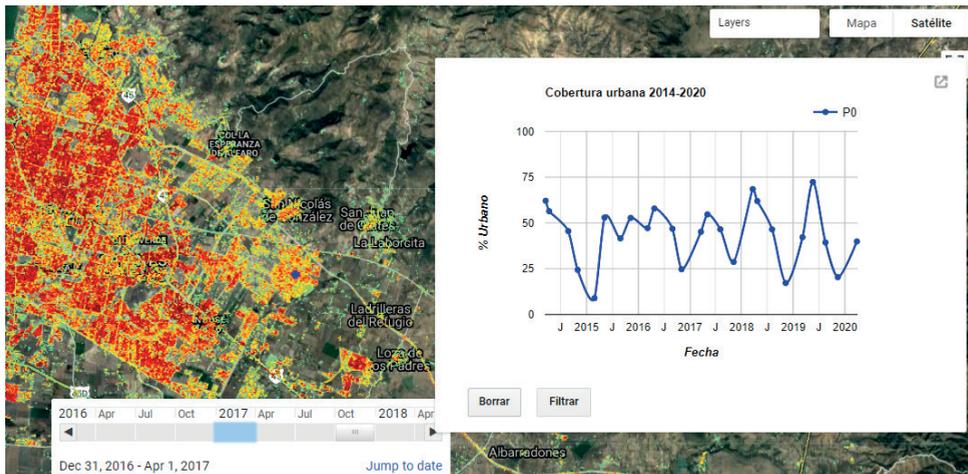


Ilustración 8. La inspección del porcentaje de cobertura urbana en un punto fijo revela variaciones en el tiempo que son contrarias al sentido común

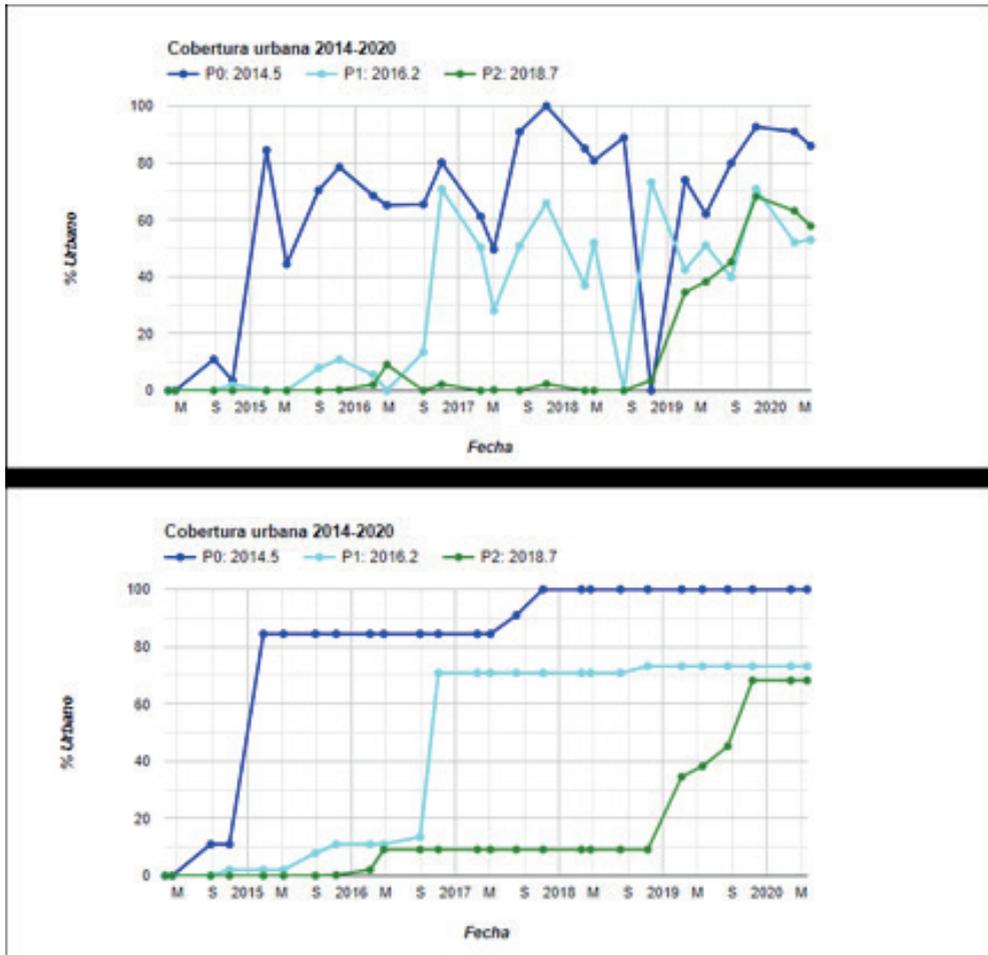


Ilustración 9. Ejemplos series temporales antes (arriba) y después del filtro de máx acumulado (abajo).



Ilustración 10. Izquierda: imagen de alta resolución (Google 2017), que muestra techos móviles (encerrados en rojo) y puntos de las series. Derecha: series temporales de porcentaje de cobertura urbana, detectado con imágenes satelitales Landsat.

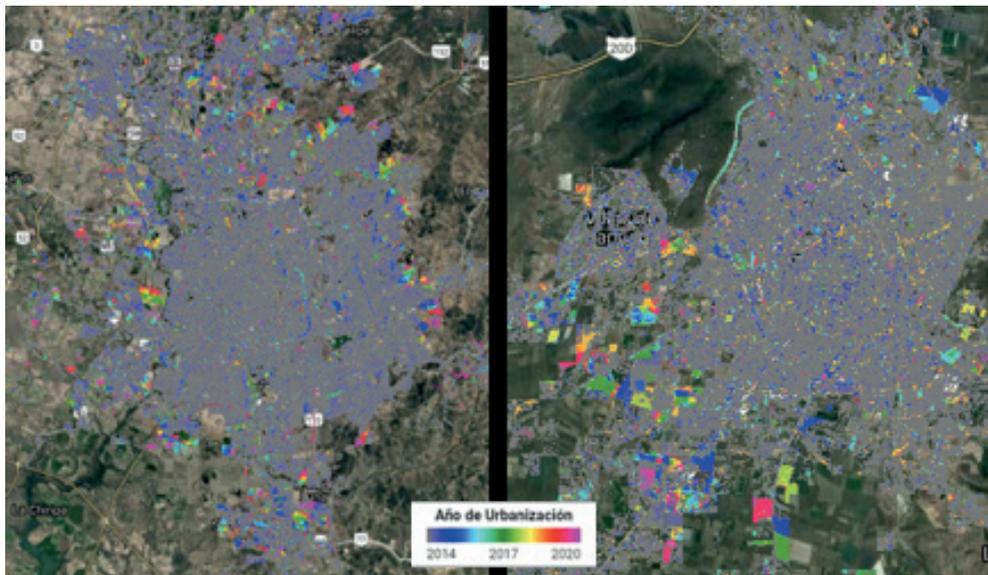


Ilustración 11. Visualizaciones del mapa de cambios para Aguascalientes (izquierda) e Irapuato (derecha). El color representa el año de urbanización al 25 por ciento. Las áreas grises corresponden al área urbana preexistente al 2014.

Análisis de la evolución espacial periurbana en el Corredor del Bajío

Elvia Martínez Viveros, Yezmín Calvillo

Saldaña, José Luis López Gonzaga

y Diego Quintino Silva

Introducción

Este capítulo presenta un estudio de caso, que aborda un análisis exploratorio del proceso de urbanización en el espacio red de la región urbana. La hipótesis de trabajo es que la dinámica de las relaciones funcionales entre los aglomerados urbanos de la región provoca centralidades y formas de expansión en el periurbano que son de interés como conocimiento para conducir el desarrollo urbano y metropolitano, con miras a lograr la sustentabilidad de las ciudades y la calidad de vida de sus habitantes.

El enfoque en la región urbana abarca más que la mera manifestación física del medio construido en el espacio, e incluye a una visión relacional de la constitución de lo urbano. En esta escala se desarrollan relaciones funcionales entre sus asentamientos humanos, de las que surge un espacio-red, en el cual cada función genera interacciones que se yuxtaponen entre ellas y sus conexiones fluyen por la infraestructura de transporte, de comunicaciones y del ciberespacio. Estas relaciones son de suma relevancia en la integración de mercados de trabajo y de servicios, en el encadenamiento de actividades económicas (cercanas o lejanas) y en la consoli-

dación de la identidad territorial. Es una escala relevante en términos del análisis de múltiples fenómenos, como pueden ser, entre otros, los flujos y patrones de viaje, la migración, las cadenas de suministro, la aglomeración de la actividad productiva, el uso y la conservación de los recursos naturales o la yuxtaposición entre el espacio urbano y rural en las interfaces periurbanas. Todos estos fenómenos se relacionan con la ubicación y aglomeración de actividades, la conectividad e interacción espacial o la accesibilidad.

El caso que aquí se presenta se refiere a un análisis exploratorio de la expansión periurbana en el Corredor del Bajío, una región urbana conceptualizada como un espacio-red integrado por cinco zonas metropolitanas y cuatro conurbaciones. En un primer acercamiento, encontramos un sistema de ciudades que, por el tamaño de sus poblaciones, integran un sistema jerárquico encabezado por dos zonas metropolitanas de mayor tamaño, pero ninguna preeminente. Un sistema en el que se pueden detectar, como nodos centrales, mercados de trabajo de relevancia metropolitana; que también motivan el surgimiento de relaciones que cruzan las fronteras metropolitanas y que se analizan empíricamente en términos de viajes cotidianos al trabajo y de procesos de extensión de la expansión urbana. Ambos, facilitados por la infraestructura carretera que permite la conexión vial entre las localidades urbanas y orienta la expansión del medio construido para vivienda o el establecimiento de industrias o comercios. Con ello, surge un proceso de periurbanización carente de planeación urbana; estos procesos observables en la escala regional ponen el acento en la necesidad de abordar el fenómeno metropolitano en una escala más amplia y desde una perspectiva de gobernanza que no sólo queda fuera del ámbito de la gestión municipal o estatal, sino que incluso rebasa el muy incipiente ámbito de gobernanza en la escala metropolitana.

La relevancia del monitoreo de la tendencia de la expansión periurbana se puede apreciar por el cúmulo de evidencia sobre la aceleración de la urbanización y de la concentración de la mayoría de la población del mun-

do en el medio urbano; tendencia que es más acentuada en los países en desarrollo y da lugar a la formación de megaciudades, que plantean problemáticas muy complejas para su gestión sustentable, incluyente y garante de derechos para sus pobladores.

El proceso de urbanización en México, lejos de manifestarse en un crecimiento compacto y coordinado de sus ciudades, ha resultado, con la mayor frecuencia, en una expansión territorial urbana descoordinada de baja densidad residencial y con déficit de servicios. Este proceso conlleva impactos negativos, entre otros, en los costos del transporte, en los tiempos de traslado, en la degradación del medio ambiente natural, en el incremento de los riesgos urbanos y en la poca calidad de vida de la población. De acuerdo con un reporte de onu-habitat (2011: 17), la expansión territorial de las ciudades de México refleja un modelo de ciudad discontinuo, disperso y de baja densidad que no es sustentable.

El caso inicia con la presentación de la región urbana, el análisis de la jerarquía entre las ciudades que la integran y la exploración de sus centralidades. Posteriormente, se analizan los flujos que enlazan sus aglomerados urbanos, en función de los viajes cotidianos al trabajo, que dan un primer indicador de los nodos más integrados y los vínculos más interesantes en la red de ciudades de esta región. Lo anterior provee el marco para explorar las tendencias de la expansión del medio construido en la zona periurbana de este espacio-red, a partir de dos fuentes de datos: las series de imágenes ópticas del satélite Landsat 8, correspondientes al primer trimestre de los años 2015 a 2020, y los establecimientos del Directorio de Unidades Económicas (denue), ubicados a lo largo del periodo en este periurbano. El caso reporta un análisis exploratorio de las tendencias principales de la expansión del medio construido en el periurbano de la región, en el marco de un proceso de urbanización difusa que en ciertos tramos convive con la ubicación de la actividad económica en este espacio-red. Estas evidencias pueden ser útiles para el diseño de la política pública y los procesos de gobernanza territorial, en la escala de la región urbana.

La región urbana Corredor del Bajío

La escala de la región urbana se plantea como un nivel esencial de los sistemas urbanos, en los que se puede observar la formación de una región funcional “crecientemente entretejida e interactiva”, entre mercados de trabajo y de servicios, y lugares de formación de familia (Antikainen, 2005: 447). En la región urbana conviven ciudades de mayor tamaño, con un conjunto de asentamientos urbanos de tamaño medio y pequeño. Estos se entrelazan a partir de relaciones que se pueden observar en el espacio físico, como las conexiones derivadas de las vías carreteras o las tendencias del medio construido, que se pueden corroborar de manera empírica con datos de viajes cotidianos, de flujos de información o de intercambios comerciales. Son relaciones que permiten avanzar hipótesis viables sobre el espacio-red que las enlaza en términos funcionales.

El análisis regional, desde un enfoque de relaciones funcionales, aborda los ritmos diferentes del crecimiento de la población en el centro o en los centros de actividad de los aglomerados urbanos y sus áreas circundantes, así como las interacciones que se entretajan. Este enfoque abarca más que la mera manifestación física del medio construido en el espacio y apela a una visión relacional de la constitución de lo urbano. El análisis se lleva a cabo en el espacio-red que generan los movimientos que fluyen por la infraestructura de transporte, las transacciones en los circuitos financieros y comerciales o en las comunicaciones en las redes digitales. La dinámica de estas relaciones incide en la forma urbana, en sus centralidades y en las formas de expansión periurbana, procesos que son de interés para informar la construcción de políticas de desarrollo urbano y la planeación territorial.

La región urbana de este estudio es el Corredor del Bajío, que une la zona metropolitana de Querétaro con la de León (Mapa 1). Se conceptualizó a través de las redes que enlazan las cinco zonas metropolitanas de Querétaro, Celaya, Guanajuato, León y San Francisco del Rincón. En el

territorio que circunda esta red de zonas metropolitanas se asienta una variedad de localidades urbanas, 12 de ellas clasificadas en el Sistema Urbano Nacional como conurbaciones; cuatro se incluyeron como parte de la región urbana, por el tamaño de su población (mayor de 70 mil habitantes) y por su relación relativamente densa con los mercados de trabajo en alguna de las cinco zonas metropolitanas: Salamanca, Irapuato, San Juan del Río y San Miguel de Allende. Las otras ocho conurbaciones, por su tamaño, peso económico y relación con el tejido de las ciudades incluidas en la región urbana, se consideraron parte de la zona de influencia.¹

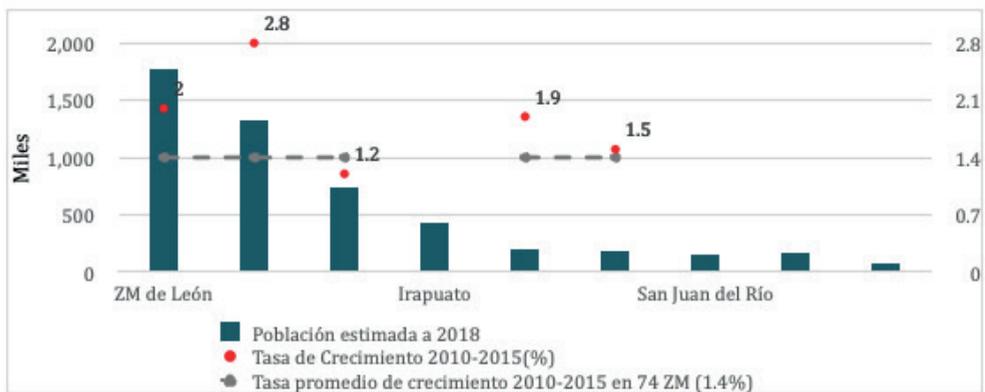
Los nodos de esta región urbana han tenido históricamente una relevancia económica, cultural y turística. Su dinámica económica actual se detona principalmente por las zonas metropolitanas, de León y Querétaro; ambas con más de un millón de habitantes. La población de este corredor urbano equivale al 6.7 por ciento de la población registrada en las 74 zonas metropolitanas del Sistema Urbano Nacional en 2015; esta población, de 2010 a 2015, crecía en las dos zonas metropolitanas mencionadas y en la de San Francisco del Rincón, a una tasa promedio anual superior a la del conjunto de las 74 zonas metropolitanas del país (1.4 por ciento). La zona metropolitana de Querétaro creció en el periodo al doble de esta tasa (Gráfica 1). Esta dinámica poblacional se acompaña de un proceso de periurbanización y de relaciones funcionales más densas con localidades en la zona de influencia; procesos que, por ejemplo, conllevaron a la anexión en 2018 de un municipio de Guanajuato, Apaseo el Alto, a la zona metropolitana de Querétaro y del municipio de Cortázar, a la de Celaya.

Cabe mencionar que el proceso de definición de zonas metropolitanas en el Sistema Urbano Nacional incluye, entre otros criterios, el tamaño de la población urbana, la contigüidad del medio construido, la densidad de

¹ Estas ocho conurbaciones son Abasolo, Apaseo el Grande, Dolores Hidalgo, Salvatierra, San José Iturbide, San Luis de la Paz y Juventino Rosas, en Guanajuato; y Tequisquiapan, en Querétaro. Su población proyectada para 2018 representaba el cinco por ciento de la población del Corredor del Bajío; región urbana a la que cotidianamente viaja a laborar el 11 por ciento de los ocupados en los municipios que albergan estas conurbaciones, al ser los principales orígenes de estos traslados Apaseo el Grande, Tequisquiapan y Juventino Rosas.

viajes cotidianos entre los municipios, la conectividad resultante de las vías de comunicación terrestre y, desde 2018, se dio el carácter de zona metropolitana a todas las ciudades que fueran capitales de su entidad federativa; con lo cual, en el caso de esta región urbana, Guanajuato pasó a ser parte de las zonas metropolitanas del país, a pesar de ubicarse en el territorio de un solo municipio.

Gráfica 1. Población del Corredor del Bajío y tasas de crecimiento promedio anual de sus zonas metropolitanas



Fuente: Elaboración propia con datos de sedatu, conapo, Inegi. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015

Policentralidad o metropolización en la región urbana del Corredor del Bajío

La policentralidad se planteó por los sociólogos urbanos de la Escuela de Chicago como un modelo alternativo a sus pioneros modelos monocéntricos, surgidos en los veinte para analizar la estructura urbana. A finales del siglo xx, esta noción resurgió en la literatura de planeación de la Comisión Europea, principalmente en el marco de la Perspectiva de Desarrollo Espacial Europeo (Committee on Spatial Development, 1999), como alternativa

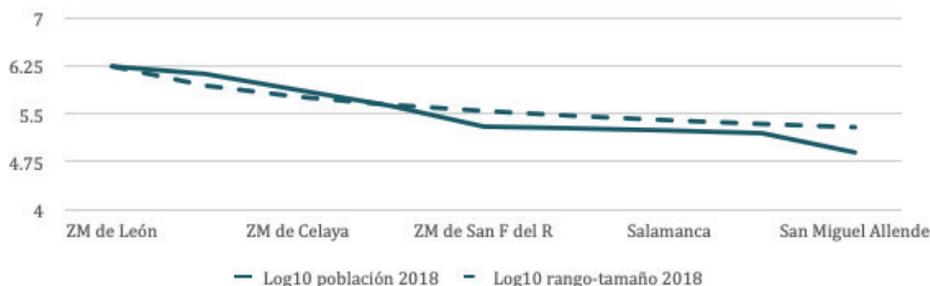
analítica a los modelos de centro-periferia y con el interés de promover una estructura espacial que –esta perspectiva suponía– favorece un desarrollo regional balanceado. La noción de policentralidad depende de la escala. En la escala intra-urbana refiere a la existencia de múltiples centros dentro de un mismo aglomerado urbano; mientras que en la interurbana “una región urbana policéntrica se caracteriza por ciudades distintas y separadas o asentamientos más pequeños que interactúan entre ellos en un grado significativo” (Dieleman y Faludi, 1998, citados en Davoudi S, 2003: 984). Estas interacciones integran un espacio red por el que fluyen relaciones y transacciones económicas, socioculturales y políticas, que cobran más relevancia que las fronteras político administrativas formales.

Una región urbana policéntrica sugiere una red, cuya forma física depende de la ubicación de las ciudades en el contexto regional; es una red que se teje entre ciudades de distinta importancia económica, ubicadas a distancias conmutables, pocas de ellas de un tamaño más grande, aunque similar y, la mayoría, de tamaño pequeño (Brezzi y Veneri 2015: 1128). En este sistema regional, además, la distribución de rango tamaño de la población es log-lineal y cuando es más plana o menos escarpada es indicio de que la región es más policéntrica (Green, 2007: 2081-2082). Esta red se puede conceptualizar en términos funcionales o morfológicos. En el primer caso, se aproximan por relaciones entre negocios, transacciones financieras o intercambios de información y conocimiento; son redes que se facilitan y evolucionan con el soporte de las tecnologías de información y comunicaciones. En el segundo caso, la policentralidad surge de la topografía urbana, su forma física depende de la ubicación de las ciudades y evoluciona como resultado de los cambios en la infraestructura de comunicaciones y transporte; pero este tipo de policentralidad también incluye la existencia de relaciones funcionales. La estimación del grado de policentralidad requiere, entonces, medir los vínculos de la red o las redes que interconectan las ciudades de la región. Las mediciones pueden referirse, por ejemplo, a la intensidad de las telecomunicaciones entre empresas

ubicadas en distintas ciudades de la región, a través de llamadas telefónicas, correos electrónicos, teleconferencias o viajes de negocios de ejecutivos. Un primer problema para estas mediciones radica en la dificultad de conseguir los datos; otro, es establecer las métricas.

La distribución de la población del Corredor del Bajío entre sus ciudades refleja una estructura urbana relativamente equilibrada y despliega una jerarquía cercana a una distribución de rango tamaño (Gráfica 2).²

Gráfica 2. Población 2015 en los aglomerados urbanos del Corredor del Bajío y su desviación de una distribución de rango-tamaño.



Fuente: Elaboración propia con datos de sedatu, conapo Sistema Urbano Nacional 2018 y sedatu, conapo, Inegi. Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015

La relación funcional que se utiliza para aproximar el espacio de los flujos en la región son los viajes intermunicipales cotidianos al trabajo, tanto de las personas ocupadas como de quienes trabajan en actividades intensivas en conocimiento.³ La medición se basa en un índice de policentralidad funcional propuesto, desde una perspectiva morfológica, por Green

2 La distribución de rango tamaño se caracteriza porque la población de la ciudad principal es el doble de la que le sigue, el triple de la tercera y, en general, n veces mayor que la que ocupa la enésima posición. En términos más formales, su distribución corresponde a una de Pareto con exponente -1.

3 El concepto de ocupaciones intensivas en conocimiento se instrumentó seleccionando de la Clasificación de Ocupaciones del Inegi, a aquellas que requieren de una base de conocimiento para su desempeño. Estas se agruparon en ocho atributos, que se nombraron como ocupaciones propias de 1) dirección o gerencia de empresas; 2) mercadotecnia, finanzas o administración; 3) investigación y desarrollo; 4) ingeniería; 5) tecnologías de la información y comunicación; 6) profesiones creativas; 7) educación, y 8) salud (Martínez *et al.*, 2017: 54-56).

(2007) y también utilizado en el proyecto Polynet, para el análisis de ocho regiones urbanas europeas (Hall y Pain, 2011). Este índice se basa en la topología de una red con nodos vinculados funcionalmente y considera su densidad y balance. Sus valores se pueden derivar y comparar para cualquier relación funcional y para distintas escalas. Cuando los vínculos de la red se distribuyen de manera uniforme; esto es, cuando todos los arcos representan un flujo igual de viajes cotidianos al trabajo; consecuentemente, ningún nodo está más conectado que los otros, el índice toma el valor de 0 y apunta a la inexistencia de policentralidad funcional. Cuando el índice vale uno, la policentralidad es perfecta y correspondería a que todas las personas de la región viajaran diario a trabajar a otro lado. Un valor cercano a uno indica que los flujos de viajes cotidianos a trabajar en otro nodo o municipio son desproporcionadamente grandes en relación con el tamaño de los mercados locales de trabajo. De acuerdo con Green (2007: 2101), aunque los valores teóricos del índice oscilan entre cero y uno, en la práctica se observan números muy pequeños.⁴

Los resultados del índice para los viajes cotidianos al trabajo de ambos tipos de ocupados en el Corredor del Bajío, toman valores muy bajos (Cuadro 1). Debido al tamaño relativamente grande de los mercados de las zonas metropolitanas de la región, especialmente de las de León y Querétaro,

4 El cálculo del índice se basa en las desviaciones estándar del grado de los nodos de la red. Con base en una matriz de origen y destino de los viajes a trabajo, los totales por renglón de la matriz representan el grado de salidas de un aglomerado urbano y los totales por columna el grado de las entradas.

σ_e es la desviación estándar del grado de las entradas de los nodos de la red.

σ_s es la desviación estándar del grado de las salidas de estos nodos.

$\sigma_{\alpha\epsilon}$ es la desviación estándar entre las entradas al nodo con mayor flujo y las entradas a un nodo sin flujo, que puede ser hipotético.

$\sigma_{\alpha\sigma}$ es la desviación estándar entre las salidas al nodo con mayor flujo y las salidas de un nodo sin flujo, que puede ser hipotético.

L_c o grado de *commuting* es la suma de los flujos (esta suma es igual para las entradas o las salidas).

L_{max} son todos los ocupados en el nodo más grande de la red (al incluir los que no viajan cotidianamente, Green le resta las entradas al nodo con menor flujo).

La densidad de la red, Δ se calcula como la proporción entre las conexiones reales y las potenciales: L_c/L_{max} .

El índice de policentralidad de las entradas es: $PFe = (1 - \sigma_e / \sigma_{\alpha\epsilon}) * \Delta$.

El índice de policentralidad de las salidas es: $PFs = (1 - \sigma_s / \sigma_{\alpha\sigma}) * \Delta$

$\Phi = 1 - \sigma(\sigma_e / \sigma_{\alpha\epsilon}, \sigma_s / \sigma_{\alpha\sigma})$

El índice de policentralidad general es $PGF = \Phi * ((PFe + PFs) / 2)$.

la densidad de la red es baja y no es de extrañar que los valores del índice de policentralidad para los viajes cotidianos al trabajo sean muy pequeños.

Los índices para los viajes de las personas en ocupaciones intensivas en conocimiento son entre 50 por ciento y 82 por ciento mayores que los de los viajes de los ocupados en general. Esto se debe a que los mercados de trabajo de los primeros son mucho más pequeños y, como se verá más adelante, este tipo de ocupados tiene en proporción una mayor movilidad cotidiana para ir a trabajar. Un parámetro para interpretar estos resultados son los valores de este índice en el estudio de Polynet que oscilan entre 0.02 para la región París y 0.19 para la región Rin Ruhr, la más policéntrica entre las incluidas en dicho estudio (Hall, 2011: 36).

Cuadro 1. Índice de policentralidad funcional de la región urbana Corredor Bajío

| | Ocupados | poic* |
|---|----------|-------|
| Policentralidad de entradas de viajes cotidianos al trabajo | .011 | .020 |
| Policentralidad de salidas de viajes cotidianos al trabajo | .010 | .015 |
| Policentralidad Funcional General | .010 | .017 |

*poic: Personas en ocupaciones intensivas en conocimiento

Fuente: Elaboración propia con datos de viajes cotidianos al trabajo entre municipios de Inegi Encuesta Intercensal 2015

Los resultados de este índice no dan cuenta clara de la existencia de una región policéntrica y podrían interpretarse como la evidencia de una dinámica que, con el tiempo, pudiera evolucionar hacia este tipo de formación urbana en la región. Esto sucedería en la medida que porciones crecientes de empleo se ubicaran fuera de los mercados de las ciudades más grandes y en mercados intermedios que representaran un opción laboral para la fuerza de trabajo asentada en la región. Además, el carácter policéntrico de la región podría ser más evidente si los viajes cotidianos al trabajo no fueran la única variable para la medición de la organización de la red de

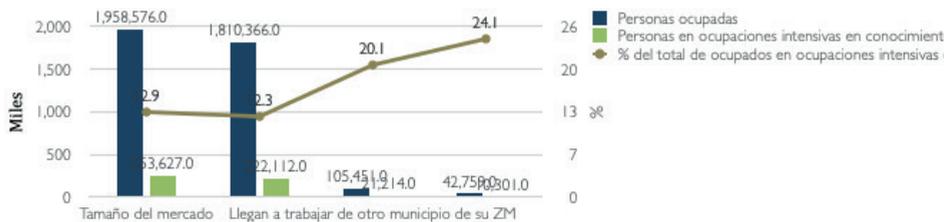
relaciones entre las ciudades y se contara con datos de otro tipo de intercambios, como mercancías, servicios, información o conocimiento. En el marco del análisis exploratorio de la estructura espacial de la región, resulta pertinente identificar las centralidades, su ubicación y sus posibles relaciones.

Centros de mercado laboral en el Corredor del Bajío

Los nodos principales del espacio red de este corredor se identificaron a partir del patrón espacial de sus centros de mercado laboral y se exploraron las relaciones entre ellos y sus áreas de influencia. Los municipios que son centros de mercado laboral en la región se identificaron por el número de sus ocupados, la densidad de su mercado y la atracción que ejercen para que personas de otros municipios laboren en ellos. En su detección se utilizó la misma variable que entró en la medición de policentralidad funcional: la movilidad cotidiana para trabajar entre los municipios de la región. Al enfocar los municipios como mercados laborales, es posible constatar que la mayoría de los ocupados son residentes locales, pero también es posible observar que estos mercados de trabajo se integran con residentes de otros municipios, que diariamente llegan a trabajar a este mercado. Los municipios de origen pueden ser de la misma zona metropolitana, de otras o de las conurbaciones urbanas de la región.

El mercado laboral del Corredor del Bajío es de alrededor de 1.958,576 personas ocupadas en 2015. La gran mayoría de ellas, el 92.4 por ciento, no se desplaza de su municipio para trabajar; una porción mucho menor (5.4 por ciento) viaja a trabajar a un municipio de su zona metropolitana y solo una pequeña minoría (2.2 por ciento) hace este viaje desde un municipio de otra zona metropolitana (Gráfica 3).

Gráfica 3. Integración de los mercados de trabajo del Corredor del Bajío



Fuente. elaboración propia con datos de Inegi-eic 2015

El análisis se propuso identificar tres niveles de centros de mercado laboral: primarios, secundarios y terciarios.⁵ No obstante, en el Corredor del Bajío, y con el procedimiento propuesto, se pudieron diferenciar solo dos tipos de mercados: los municipios de León y Querétaro se clasificaron como centros primarios, y los de Celaya e Irapuato como terciarios. El municipio de León tiene el tamaño más grande de mercado, pero la tasa de atracción de Querétaro y su densidad lo posicionan como el mercado más dinámico de la región. Los centros de ocupados, en su conjunto, aglomeran casi las tres cuartas partes del mercado laboral de la región (74.7 por ciento) y los de ocupaciones intensivas en conocimiento un poco más: el 77.8 por ciento. Esto es, en proporción, las personas en ocupaciones intensivas en conocimiento se concentran más en los centros de mercado que los ocupados en general. Es de notar también que la tasa de atracción de Irapuato de estos ocupados con alto capital humano es 2.4 veces mayor que en general y que su mayor tasa de atracción se observa en Querétaro (19.1 por ciento). Esta tasa se calcula como la porción del tamaño del mercado que integran las personas que llegan cotidianamente a trabajar de otro municipio (Cuadro 2).

⁵ Esta clasificación que se estableció como sigue:

Sea μ : promedio y σ : desviación estándar TM: el tamaño del mercado; D: densidad del mercado y TA tasa de atracción del mercado.

Los mercados deben cumplir al menos dos de las siguientes opciones:

Mercados primarios: $\mu+2\sigma < TM$, $\mu+2\sigma < D$ y $\mu < TA$.

Mercados secundarios: $\mu+\sigma < TM < \mu+2\sigma$, $\mu+\sigma < D < \mu+2\sigma$ y $\mu-\sigma/2 < TA < \mu$

Mercados terciarios: $\mu < TM < \mu+\sigma$, $\mu < D < \mu+\sigma$ y $\mu-\sigma < TA < \mu-\sigma/2$

Cuadro 2 Tamaño, densidad y tasa de atracción de los centros de mercado del Corredor del Bajío

| M e r - c a d o | M u n i c i - p i o | Ocupados | | | En ocupaciones intensivas en conoci- miento | | |
|--|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|---------------------|---------------------------------------|
| | | Número de ocupados | O c u p a - d o s p o r Km2 | Tasa de atrac- ción (%) | Número de ocupados | Ocupados por Km2 | Tasa de a t r a c - c i ó n (%) |
| Prima- rio | Queré- taro | 436,645 | 645.01 | 1.5 | 76,751 | 113.37 | 19.1 |
| | León | 672,393 | 555.49 | 1.4 | 79,676 | 65.82 | 2.1 |
| Tercia- rio | Celaya | 200,528 | 365.57 | 5.5 | 21,595 | 39.36 | 5.4 |
| | Irapua- to | 154,417 | 183.0 | 2.5 | 19,281 | 22.85 | 6.0 |
| Total en los cen- tros | | | | | 197,303 | | |
| % del mercado del Corredor del Bajío | | 74.7 | | | 77.8 | | |

Fuente: elaboración propia con datos de Inegi, Encuesta Intercensal 2015

Viajes cotidianos al trabajo

Una representación del espacio red de la región urbana se entreteje con los flujos de estos viajes cotidianos al trabajo, su densidad y dirección. Los más relevantes son a los centros de mercado laboral, lo cual era de esperarse, ya que su definición considera la tasa de atracción de estos traslados. Estos centros son el destino cotidiano de 64.8 por ciento de los 148,210 ocupados que viven en otro municipio y del 59.4 por ciento de los traslados de personas en ocupaciones intensivas en conocimiento. Los flujos en sentido contrario, indican que los centros son origen del 24.7 por ciento del total de viajes cotidianos de los ocupados de la región, y de un porcentaje mayor (33.6 por ciento) del total de los viajes de los que traba-

jan en las ocupaciones más especializadas. Pero también es de notar que los centros atraen 2.6 veces más ocupados y 1.8 veces más personas con mayor capital humano de los que expulsan. En este proceso vale la pena destacar a Querétaro como el principal atractor, tanto de ocupados (con un saldo de 57,619) como de personas en ocupaciones intensivas en conocimiento (con un saldo de 11,678); a Celaya, que atrae más ocupados de los que expulsa; e Irapuato, de donde los que salen cotidianamente a trabajar representan el 7.8 por ciento del tamaño de su mercado de ocupados y el 11.6 por ciento del tamaño de su mercado de personas en ocupaciones intensivas en conocimiento (Cuadro 3).

Una parte esencial de la estructura policéntrica de una región urbana es la intensidad de las relaciones funcionales entre los centros (Vasanen, 2012). En este caso, es interesante notar que los flujos cotidianos de viajes al trabajo entre los centros dan cuenta de apenas el 3.2 por ciento de los viajes de ocupados y el 5.3 por ciento de los de personas en ocupaciones intensivas en conocimiento; señal de que el intercambio de capital humano especializado ocurre con mucha mayor intensidad entre los centros que el intercambio de ocupados en general. Pero también, señal de una escasa conexión entre los centros laborales que permite suponer una policentralidad débil en la región; la cual parece estar más bien integrada por áreas urbanas funcionales autocontenidas, cada centro con su área de influencia; aunque se comparte entre algunos centros. Esto se puede ilustrar con el Mapa 2, que presenta los flujos resultantes de los viajes cotidianos desde los centros de mercado para el total de los ocupados. Estos viajes exhiben una dinámica metropolitana, donde las personas que viajan a trabajar a otro municipio, en su mayoría, se trasladan en el espacio de una misma zona metropolitana.

Cuadro 3. Viajes cotidianos al trabajo con destino y origen en los centros de mercado

| Centros de mercado | Viajes hacia los centros (3) | | Viajes desde los centros (4) | | Saldo de los viajes (3)-(4) | |
|----------------------------------|------------------------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | Ocupados | poic | Ocupados | poic | Ocupados | poic |
| León | 13,997 | 1,686 | 9,745 | 3,595 | 4,252 | -1909 |
| Querétaro | 67,215 | 14,680 | 9,596 | 3,002 | 57,619 | 11,678 |
| Celaya | 11,015 | 1,182 | 5,195 | 1,754 | 5,820 | -572 |
| Irapuato | 3,936 | 1,159 | 12,064 | 2,235 | -8,128 | -1,076 |
| Total centros (1) | 96,113 | 18,707 | 36,600 | 10,586 | 59,513 | 8,121 |
| Total de viajes en la región (2) | 148,210 | 31,515 | 148,210 | 31,515 | | |
| % centros (1)/(2) | 64.8 | 59.4 | 24.7 | 33.6 | | |

Fuente: elaboración propia con datos de Inegi: Encuesta Intercensal 2015

No obstante, es de interés notar los vínculos que en este espacio red se tejen en la región urbana y que dan cuenta de una intensa interconectividad entre los aglomerados urbanos que lo integran. Los viajes cotidianos al trabajo entre las zonas metropolitanas son menos numerosos, pero reflejan una movilidad diaria de 42.8 mil personas que van a trabajar a un municipio que no está en su zona metropolitana; 24 por ciento de ellas laboran en ocupaciones intensivas en conocimiento. Así, esta movilidad, medida por la porción del tamaño del mercado que representan los viajes al trabajo, es mayor para las personas que trabajan en ocupaciones intensivas en conocimiento (4.06), que para los ocupados en general (2.18). Las personas con mayor capital humano representan, en proporción, una fuerza más intensa de esta relación funcional entre las zonas metropolitanas y conurbaciones de la región urbana, y también una relación más interesante, porque da cuenta de intercambios de intangibles presentes en el conocimiento y habilidades de las personas.

La zona metropolitana de León es el principal destino de los viajes cotidianos al trabajo entre zonas metropolitanas: recibe el 33.3 por ciento de

ellos, más de la mitad con origen en Irapuato. Es también el principal atractivo de personas en ocupaciones intensivas en conocimiento: es destino de un poco más de la quinta parte de los viajes cotidianos al trabajo en este grupo de ocupaciones. Le sigue en relevancia el destino de ocupados la zona metropolitana de Querétaro, que también recibe más ocupados de los que expulsa, pero cuando se trata de personas en ocupaciones intensivas en conocimiento expulsa a la región más de las que recibe. Como destino de los viajes de ocupados destaca en tercer lugar la zona metropolitana de Guanajuato, que ocupa el segundo lugar como destino de las personas en ocupaciones intensivas de conocimiento. Esta zona metropolitana alberga la capital de esta entidad y no es origen relevante de estos viajes. Salamanca e Irapuato son conurbaciones físicamente cercanas y estrechamente vinculadas: 42 por ciento de los viajes cotidianos al trabajo que salen de Salamanca van a Irapuato, mientras que de Irapuato provienen el 25 por ciento de los que llegan a Salamanca. Ambas conurbaciones destacan dentro de los principales orígenes y destinos de ambos tipos de ocupados. No obstante, el destino principal de los viajes que salen de Irapuato van a la zona metropolitana de León (65 por ciento). Finalmente, la zona metropolitana de Celaya destaca como origen relevante de los viajes cotidianos al trabajo, tanto de los ocupados en general como de las personas en ocupaciones intensivas en conocimiento (Cuadro 4, y Mapas 3 y 4).

Cuadro 4. Principales orígenes y destinos de viajes cotidianos al trabajo entre las zonas metropolitanas y conurbaciones del Corredor del Bajío

| Principales destinos | Por ciento de viajes | | Principales orígenes | Por ciento de viajes | |
|----------------------|----------------------|------|----------------------|----------------------|------|
| | Ocupados | poic | | Ocupados | poic |
| ZM de León | 33.3 | 21.4 | Irapuato | 28.2 | 21.7 |
| ZM de Querétaro | 13.7 | 12.9 | ZM de León | 17.7 | 25.2 |
| ZM de Guanajuato | 11.3 | 18.7 | ZM de Celaya | 17.4 | 15.0 |
| Salamanca | 12.6 | 10.1 | ZM de Querétaro | 10.8 | 14.7 |
| Irapuato | 9.2 | 11.3 | Salamanca | 9.2 | 7.4 |
| TOTAL | 80.1 | 74.4 | TOTAL | 83.3 | 84.0 |
| | | | | | |

Fuente: elaboración propia con datos de la Encuesta Intercensal 2015 de Inegi

Irapuato y Salamanca, aunque no son los más relevantes en términos del tamaño del mercado, de su densidad o de su tasa de atracción, son representativos de una dinámica funcional en el Corredor Bajío. Irapuato es un gran expulsor de ocupados en este corredor y a la vez un receptor relevante, y Salamanca se integra con Irapuato y con la zona metropolitana de Celaya, tanto por su cercanía como en términos de la relación funcional bajo análisis. Se estima que en automóvil, desde Irapuato, se alcanzan nueve destinos en menos de una hora —al que se llega más rápido, 15 minutos, es Salamanca—. Por su posición geográfica, ambas conurbaciones funcionan como goznes entre las zonas metropolitanas de Celaya y León. Desde Celaya, se alcanzan siete destinos en este tiempo, los más accesibles de ellos son Salamanca y Querétaro que están a 30 minutos de viaje. Desde Salamanca, se alcanzan seis destinos en menos de una hora de viaje carretero, al ser Irapuato el destino que menos tiempo requiere. Celaya, Irapuato y Salamanca son el bloque mejor conectado del Corredor del Bajío; desde ellos se llega en tiempos conmutables a las zonas metropolitanas que lo integran.

Las características y la evolución de la estructura de esta región urbana

es más evidente si los viajes cotidianos al trabajo no fuera la única variable para develar la red de relaciones entre sus aglomerados urbanos y se contara con evidencia de otro tipo de relaciones funcionales, como la provisión de servicios especializados, los viajes de negocios o los intercambios de información y conocimiento por medios electrónicos. Los viajes cotidianos al trabajo permiten estimar una conectividad morfológica que Hall y Pain (2006: 10) consideran como un indicador que no nos dice mucho sobre flujos de información, más allá de que los viajantes llevan sus cerebros con ellos. En este sentido, los viajes de personas en ocupaciones intensivas en conocimiento se podrían pensar como un proxy del intercambio de los intangibles del conocimiento y las habilidades de estas personas, cuyos patrones de viaje tienen características distintivas: en proporción, viajan más que el total de los ocupados, sus viajes entre zonas metropolitanas son más significativos, la porción que de ellos sale a trabajar desde los centros de mercado es mayor que la de los ocupados en general y hay municipios como Querétaro, Celaya o Irapuato que se distinguen por aportar a otros mercados de la región más personas con este capital humano de las que atraen. Habría que dar seguimiento en el tiempo a estas tendencias, con el fin de detectar si estas relaciones dan cuenta de la evolución hacia una estructura espacial más policéntrica del Corredor del Bajío o evidencian una dinámica que a futuro conllevaría a la colisión de las zonas metropolitanas en la región y al surgimiento de un aglomerado urbano con una población similar o superior a la de la zona metropolitana de Guadalajara, que hoy día es la segunda más grande del país.⁶ En este sentido, valdría la pena explorar la pertinencia de construir políticas públicas en la escala de la región urbana tendientes a conducir esta dinámica; por ejemplo, hacia el fortalecimiento de una organización en red de ciudades que mantengan un tamaño sustentable.

Aunque no hay evidencia que garantice los beneficios de una estructura

⁶ La población estimada en 2018 de las cinco zonas metropolitanas y cuatro conurbaciones incluidas en el Corredor del Bajío en este estudio es de 5,447,261. Este dato para la zona metropolitana de Guadalajara es de 5,064,750 habitantes (CONAPO, 2018).

espacial urbana policéntrica. La apuesta de sus proponentes es que dicha estructura puede ser una alternativa para evitar grandes concentraciones demográficas en áreas centrales y al mismo tiempo alcanzar la densidad de actividad económica que requiere la competitividad. La noción de policentralidad también se ha usado en términos normativos para posicionar en la agenda de la planeación espacial estratégica la promoción de esta estructura espacial, como una opción de política para lograr un desarrollo regional balanceado o como una herramienta para mercadeo de las ciudades (Davoudi, 2003: 979-980).⁷ Hay autores que alertan sobre los riesgos de promover esta estructura en la planeación de regiones urbanas, al argumentan, entre otras cosas, los impactos negativos a la sustentabilidad del medio ambiente que causa el incremento de la movilidad derivada de las conexiones interregionales (Hague y Kirk, 2003), los daños al medio ambiente resultantes del uso extensivo del suelo y de la emisión de gases de invernadero (Veneri y Burgalassi, 2010) o la falta de evidencia empírica suficiente que sustente de manera definitiva su contribución al equilibrio del desarrollo regional (Meijers y Sandberg, 2019) .

En un análisis sobre las tendencias del desarrollo urbano en México de onu-Hábitat, se señala que la expansión de las ciudades mexicanas se caracteriza por un patrón disperso y una forma urbana fracturada que deja grandes vacíos urbanos.⁸ Además, autores como Delgado (2003) argumentan que los conceptos que se utilizan para estudiar la ciudad-región en

7 Por ejemplo, en el programa de 2013 de la Red de Observación de la Planeación Espacial Europea (ESPON, 2012: 13), el establecimiento de clústeres urbanos policéntricos en el territorio europeo se perfila como una posibilidad de incrementar el desarrollo y la cohesión territorial a través de la cooperación. La Perspectiva de Desarrollo Espacial Europea promueve una estructura policéntrica como alternativa al modelo de centro-periferia, con el argumento de que la primera asegura un desarrollo regional balanceado (EC, 1999: 20); también, la Agenda Territorial de la Unión Europea 2020 (EU, 2011: 6) plantea la promoción de la policentralidad y del desarrollo territorial balanceado como una prioridad territorial para el desarrollo de la Unión Europea. En el estudio de Polynet destaca el policentrismo como una política para promover en el territorio europeo centralidades alternativas al llamado pentágono formado por Birmingham, París, Milán, Hamburgo y Ámsterdam (Hall y Pain, 2006). Cabe señalar que con el tiempo el concepto de policentralidad en la planeación de la Unión Europea se integró en el de Cohesión territorial, concepto normativo que enfatiza de manera más clara las dimensiones de un desarrollo regional balanceado (Medeiros, 2016)

8 <<https://onuhabitat.org.mx/index.php/tendencias-del-desarrollo-urbano-en-mexico>>.

países desarrollados no son aplicables a México y cuestionan la debilidad del cambio de la escala metropolitana a la regional en el análisis del fenómeno urbano. Como alternativa al análisis del espacio red, Delgado propone estudiar el desplazamiento de actividades y población de las grandes ciudades hacia el espacio periurbano y sus efectos espaciales, bajo el concepto de urbanización difusa en sus formas de expansión del medio construido, de las actividades económicas y de los movimientos migratorios. El estudio de Delgado se centra en la zona metropolitana del Valle de México. En el caso de la región urbana de este estudio y, particularmente del Corredor del Bajío, se tienen evidencias que apuntan hacia la evolución de un espacio red entre sus ciudades; mismo que, como se mencionó, puede ser una manifestación de un proceso de evolución hacia una región urbana cada vez más policéntrica; pero en la región también se observa un proceso de extensión del crecimiento del medio construido, a través del paisaje periurbano.

Los viajes cotidianos al trabajo, la infraestructura por la cual fluyen y la proximidad entre los aglomerados urbanos, son indicadores relevantes de la forma y dirección del crecimiento urbano en la escala regional. Dar seguimiento a esta forma resulta de interés tanto para desentrañar si la urbanización se despliega en el marco de la consolidación de un sistema de ciudades medias en la región, la formación de más zonas metropolitanas o la colisión de sus aglomerados urbanos en estructuras que tienden hacia la formación de una región metropolitana extendida. Así, el seguimiento de la extensión de la expansión periurbana resulta de gran utilidad para informar políticas y programas para la conducción ordenada del proceso de urbanización en esta región urbana

La expansión periurbana⁹

Por expansión periurbana referimos en esta sección al fenómeno que en

⁹ Utilizamos la frase extensión de la expansión urbana para referir a la noción que en inglés nombran *sprawl*.

inglés nombran como *sprawl*, noción que conlleva múltiples definiciones que, en general, refiere a un proceso que se manifiesta físicamente en el paisaje por la cobertura dispersa del medio construido (Jaeger et al., 2010, citado en Rubiera-Morollón y Garrido Yserte, 2020: 3); que alude a un fenómeno complejo y multidimensional, que surge de diversos factores económicos, sociales y culturales y conlleva múltiples consecuencias en la organización socioeconómica, en el medio ambiente y en la vida cotidiana de las personas. Es también un proceso que asume características distintas en las ciudades de países desarrollados y en las de los países en desarrollo

La expansión urbana es un fenómeno mundial. onu-Hábitat analizó los resultados de una muestra global de ciudades con más de 100 mil habitantes, representativa del mundo urbano en 2010 y demostró que “el consumo de suelo para la urbanización está superando el crecimiento de la población urbana, lo que lleva a una expansión urbana de menor densidad de habitantes urbanos por superficie urbana (km²)” (Clos, 2017).

Las formas de expansión del medio construido en las ciudades dependen, en gran medida, de su tamaño, estructura socioespacial y ritmo de crecimiento. Mucho de este crecimiento se ubica en áreas o interfaces periurbanas. Son “zonas de transición o interacción donde se yuxtaponen actividades urbanas y rurales y donde los rasgos del paisaje sufren modificaciones rápidas inducidas por la actividad humana” (Douglas, 2006: 18). Las actividades productivas y las formas de vida en estas zonas combinan elementos propios de la forma de vida rural y de la forma de vida urbana que inciden en la construcción de territorios con actividades, composición social, dinámica e identidades distintivas.

Pero las formas del crecimiento urbano dependen también del grado de desarrollo. La expansión periurbana de ciudades de países desarrollados exhibe formas espaciales, actividades y procesos sociales muy distintos a los de las ciudades de países en desarrollo, donde es frecuente encontrar asentamientos precarios, con vivienda informal, servicios deficientes e inseguridad en la tenencia del suelo; así como formas de vida sustentadas

en la economía informal o irregular o en remuneraciones salariales bajas. En estos países la extensión de la expansión urbana, a través del paisaje periurbano, se da a un ritmo mayor que el del crecimiento de la población, que dan lugar a patrones de urbanización de baja densidad y segregación de los distintos usos del suelo.

“Mientras que en los países industrializados el fenómeno obedece a la relocalización espacial de las actividades productivas y al mejoramiento del hábitat y de los espacios para el ocio, en los países pobres, el periurbano se expresa de manera diferente, en su dinámica se interrelacionan fenómenos como la expansión incontrolada de las urbes, las migraciones del campo a las ciudades, el mercado ilegal de tierras y el precarismo urbano, entre otros” (Ávila, 2001: 108).

Douglas (2006), al referirse a ciudades de distintas latitudes, apunta que en la ocupación de estas zonas participan tanto clases medias o altas, que buscan en ellas un modo de vida más rural, con acceso a instalaciones extensivas de esparcimiento, como habitantes pobres que encuentran en ellas un lugar que, a pesar de su marginalidad, posibilita su traslado al trabajo y a la escuela. Son también sitio de localización industrial o lugares que los municipios usan para rellenos sanitarios o depósitos de basura. Su valoración se asocia con los procesos propios del uso y apropiación del suelo periurbano y se hace en términos del precio del suelo, del estilo de vida o de su cercanía y accesibilidad a mercados. Los pobres las valoran como la única alternativa disponible para acceder a suelo para construir su vivienda.

El espacio de oportunidad para la ocupación formal o informal del suelo periurbano resulta de diversos arreglos económicos e institucionales. Es frecuente que en este suelo se intercalen asentamientos humanos informales con construcciones precarias, fraccionamientos con suelo desarrollado y vivienda media o de lujo, y actividades agrícolas o industriales de pequeña o gran escala, con frecuencia vinculadas con la economía de la ciudad interna o con economías de otras escalas o latitudes. Son zonas

cercanas a los mercados urbanos de trabajo, mercancías o servicios, pero en países en desarrollo, como México, los tiempos de viaje cotidiano a estos mercados son excesivos y el transporte es de mala calidad. Un aspecto a destacar en estas zonas es el costo de proveer servicios públicos en áreas alejadas y de baja densidad residencial, lo cual es de especial relevancia cuando estos espacios se ocupan de manera informal y por familias de escasos recursos, que carecen de la posibilidad de pagar su costo e independientemente de su condición social tienen derechos de acceso al agua, a la salud o a la educación; derechos que el Estado tiene la obligación de proteger. Con frecuencia son también zonas expuestas a riesgos.

Si bien la expansión urbana es un fenómeno complejo, la medición de su expresión física resulta relevante como punto de partida para análisis cualitativos e informar la política urbana en la escala regional. La disponibilidad actual de datos y tecnologías de información geoespacial facilita esta medición.

La interfaz periurbana se observa y estudia en la escala regional; pero no hay criterios claros para la delimitación de sus fronteras, ya que asume características distintas en diversas latitudes y en regiones urbanas de un mismo país; por ello su definición conceptual es elusiva. En general es una zona con acceso, si bien a veces difícil, a mercados urbanos y el uso de su suelo está sujeto a una fuerte influencia urbana. Si se define como un buffer, se corre el riesgo de que, en un proceso acelerado de crecimiento urbano, la extensión sobre la que se expande el medio construido sobrepase sus cotas en el corto plazo. También podría delimitarse por distancias conmutables o en términos funcionales, pero se carece de una definición operacional de lo periurbano que permita su instrumentación en variables o indicadores espaciales cuantitativos y discretos. (Simon et al., 2016: 9-11). Por ello, algunos estudiosos de la materia como Webster y Muller proponen como generalización razonable establecer para ciudades grandes una franja de 30 a 50 kilómetros, a partir del bordo urbano, y consideran que en ciudades de menor tamaño el periurbano puede estar en zonas más angostas (citado en Simon et al., 2016: 11).

La planeación de zonas o interfaces periurbanas requiere de información sobre su localización y extensión, y su clasificación y mapeo es un reto. Las imágenes de satélite han demostrado ser una fuente relevante para la estimación de la cobertura del medio construido (Rubiera-Morollón F y Garrido-Yserte R., 2020; Dittakan et al., 2013; Nole et al., 2015; DiPalma et al., 2016). Aunque hay autores que alertan que los problemas de producir datos precisos con percepción remota, pues el proceso de clasificación y la integración de los datos se complejizan por la mezcla de usos del suelo, el tamaño pequeño de las parcelas y el cambio acelerado (Brook y Dávila, 2000: 232); también se reconoce que con esta fuente de datos se revela una porción mayor de la población urbana, que la que se registra en las estadísticas oficiales, ya que los procesos formales de recopilación de datos no incluyen una buena parte de la población en asentamientos muy fragmentados que traspasan las fronteras político administrativas (Clos, 2017).

El uso de percepción remota ofrece un gran potencial para derivar información de entornos con varios tipos de cobertura del suelo. Realizar este potencial no está exento de retos, pero la ventana de oportunidad se abrió con el acceso abierto a series de imágenes de satélite de Sentinel-2 o Landsat 8, que con una muy corta frecuencia temporal en su producción, permiten dar cuenta de la dinámica de cambio en la expansión urbana y periurbana y, construir con ello, estimadores para comprender su evolución en el tiempo y desentrañar sus características.

Para la definición del periurbano se consideró la delimitación que hace Inegi de las localidades urbanas correspondientes a los centros económicos y demográficos de las zonas metropolitanas y las conurbaciones que lo integran. A partir de estos límites, se estableció una franja de cinco kilómetros en las localidades de León y Querétaro, de cuatro en las de Celaya e Irapuato y de tres en las de San Francisco Rincón, Guanajuato, Salamanca, San Juan del Río y San Miguel de Allende. Esta distancia se decidió en función del tamaño de la población estimada para 2018 en la escala de la

localidad. Asimismo, se delimitó un corredor de tres kilómetros a lo largo de las carreteras federales o estatales de dos carriles o más que las unen (Mapa 5).

La distancia para la definición de este búfer se calibró a partir de la exploración de la cobertura del medio construido detectado en las imágenes Landsat-8 para los primeros trimestres de 2015 a 2020. La cobertura y expansión del medio construido se estimó, al considerar los píxeles clasificados con un porcentaje de cobertura urbana mayor del 10 por ciento.¹⁰

Como es de esperar, la mayor concentración del área cubierta con píxeles con más del 10 por ciento de urbanización en la región se registra dentro de las localidades urbanas, aunque su peso proporcional declina 7.5 puntos porcentuales de 2015 a 2020. Para 2020 un poco más de la mitad de esta superficie se ubica fuera de los límites oficiales de estas localidades con una forma de urbanización muy dispersa. Estos datos evidencian que el búfer periurbano en este corredor capta el mayor volumen la expansión del medio construido fuera de los límites de las localidades de la región (Cuadro 5).

La expansión del medio construido en este corredor sigue una tendencia de consolidación a lo largo de los ejes carreteros principales; en la cual se observan ciertas desviaciones en espina o bifurcaciones, como las que siguen la trayectoria desde Celaya hacia San Miguel Allende y Dolores Hidalgo, o la que conecta a Irapuato con Guanajuato o con Silao. Este crecimiento en cordón del medio construido y de las unidades económicas enlaza localidades urbanas y traspasa fronteras de municipios, de zonas metropolitanas e incluso los límites entre los estados de Querétaro y Guanajuato, en el marco de una expansión difusa, en forma de archipiélagos urbanos y se consolida de manera más marcada en algunos lugares (Mapa 18). Con el fin de ilustrar los matices en la tendencia de esta expansión,

¹⁰ Los datos de la serie temporal de porcentajes de cobertura urbana en la región bajo estudio se generaron por el doctor José Luis Silván a partir de las imágenes del satélite Landsat 8. Cada píxel se ponderó con el porcentaje exacto de cobertura urbana obtenido del procesamiento digital de los datos. La metodología para su obtención y procesamiento se detalla en el reporte técnico: Silván J.L. *et al.*, "Mapeo de la Urbanización del Corredor Metropolitano Centro-País" (CMPC).

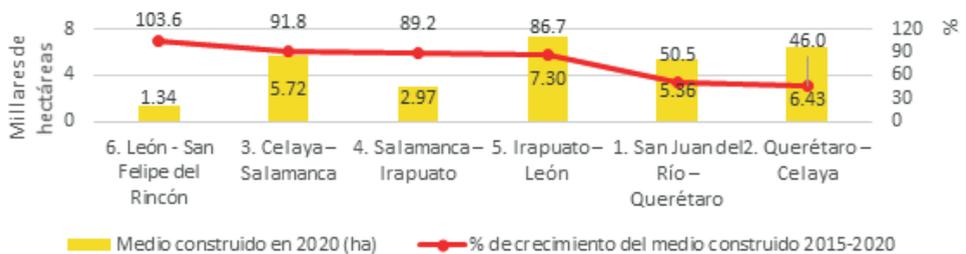
su análisis se segmentó en seis tramos de este búfer o representación física del periurbano como espacio red: 1) San Juan del Río-Querétaro; 2) Querétaro-Celaya; 3) Celaya-Salamanca; 4) Salamanca-Irapuato; 5) Irapuato-León, y 6) San Francisco del Rincón-León (Mapa 19). Estos tramos, en 2020, captaron el 32.5 por ciento del área cubierta por píxeles con más de por ciento de cobertura urbana, y representaron dos terceras partes de la superficie de esta expansión en el periurbano definido. Asimismo, en estos tramos la expansión periurbana creció 70.1 por ciento de 2015 a 2020, crecimiento mayor al del resto de la franja perirubana (55.7 por ciento) y al de las localidades urbanas (22.4 por ciento) (Cuadro 5). La exploración de la expansión del medio construido en el tiempo se realizó a lo largo de los seis tramos de este búfer o representación física del periurbano como espacio red.

Cuadro 5. Medio construido detectado por las imágenes Landsat 8 en el corredor del Bajío

| Extensión del medio construido | Área que cubren los píxeles con más de 10.1% de urbanización | | | | Crecimiento 2015-2020 (%) |
|---|--|-------|-----------|-------|---------------------------|
| | 2015 (ha) | % | 2020 (ha) | % | |
| En el territorio de los municipios que albergan al Corredor del Bajío | 63,718 | 100.0 | 89,813 | 100.0 | 41.0 |
| En localidades urbanas | 36,217 | 56.8 | 44,318 | 49.3 | 22.4 |
| En los tramos periurbanos | 17,089 | 26.8 | 29,125 | 32.5 | 70.4 |
| En el resto de la franja perirubana | 9,362 | 14.7 | 14,572 | 16.2 | 55.7 |
| En el resto del territorio | 1,050 | 1.7 | 1,798 | 2.0 | 71.2 |

Fuente: elaboración propia con datos de Silvan (2020).

La Gráfica 4 presenta un comparativo de la extensión del medio construido en 2020 en cada tramo periurbano y el crecimiento porcentual de esta cobertura de 2015 a 2020. Es posible observar que la mayor cobertura ocurre en los tramos más largos; los de Irapuato a León y de Querétaro a Celaya, con un crecimiento más acentuado en el primero. En los tramos de Celaya a Salamanca y de San Juan del Río a Querétaro el medio construido abarca superficies relativamente equivalentes, pero con un crecimiento más acelerado en el primero de ellos. Los tramos con menor cobertura son los que unen a Salamanca con Irapuato y a San Francisco del Rincón con León, pero son también los tramos más cortos y donde el crecimiento del medio construido es más dinámico.



Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, en la expansión urbana, “mientras más área se construya y más dispersas estén las construcciones, mayor será el grado de expansión urbana” (Jaeger et al., 2014 en Ribiera-Morollon y Garrido-Yserte, 2020: 3). Para dar una visión sintética del tipo de expansión periurbana en esta región se clasificaron los pixeles en rangos agregados, que representan el grado de urbanización. Los que registran más de 10 y hasta el 50 por ciento de cobertura urbana, se consideraron con un grado de urbanización bajo (los que representan un mayor sprawl), de más de 50 por ciento y hasta 75 por ciento, con un grado medio y con más de 75 por ciento con un grado alto. Puesto que la extensión de las ciudades en las periferias se densifica

gradualmente, lo más frecuente es que los pixeles que se detectan por primera vez tengan un grado de urbanización bajo y en años posteriores se densifiquen. Como sería de esperar, en zonas periurbanas, en todos los lugares y a lo largo del periodo, la mayor cobertura de su expansión se observa en el grado bajo de urbanización. Del total de 29.1 mil has, que están cubiertas con algún grado de urbanización en el periurbano en 2020, el 79.3 por ciento corresponde a un grado de urbanización bajo. Los grados medio y alto cubren en conjunto el 20.7 por ciento del medio construido en el periurbano, pero su cobertura creció respectivamente el 82.4 por ciento y el 145.1 por ciento, de 2015 a 2020; mientras que el grado bajo creció en el periodo 63.4 por ciento. Esto da cuenta de un proceso de consolidación de la cobertura del medio construido en el periurbano del Corredor del Bajío (Gráfica 5).

Gráfica 5 Evolución del grado de urbanización en el periurbano del Corredor del Bajío en extensión y proporción

| | Grados de urbanización en el periurbano del Corredor del Bajío (hectáreas) | | | | | | % de cambio 2015-2020 |
|-------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | |
| Bajo | 14,137.47 | 16,071.25 | 18,135.66 | 20,217.41 | 21,855.51 | 23,097.73 | 63.4 |
| Medio | 1,924.64 | 2,218.26 | 2,576.04 | 2,925.17 | 3,234.42 | 3,511.40 | 82.4 |
| Alto | 1,026.65 | 1,272.81 | 1,575.21 | 1,879.57 | 2,222.65 | 2,515.95 | 145.1 |
| TOTAL | 17,088.76 | 19,562.32 | 22,286.91 | 25,022.15 | 27,312.58 | 29,125.08 | 70.4 |

Fuente: elaboración propia.

Si bien la cobertura del medio construido ha crecido en el tiempo, en todos los grados de urbanización a lo largo de la zona periurbana definida, esta

expansión se diferencia en ritmo, densidad y dirección en distintos nodos y tramos de la red. La extensión y densificación del crecimiento del medio construido en la franja periurbana de este corredor se acompaña de la dinámica económica resultante de la localización de establecimientos con más de 30 ocupados, los cuales más que duplicaron su presencia periurbana de 2015 a 2020, al pasar de 645 a 1356.

El crecimiento del medio construido del periurbano en el tramo León-San Francisco del Rincón tiende a aglomerarse en la zona de influencia que circunda de manera cercana ambas localidades y se extiende a lo largo de la carretera que las une, con una distancia de alrededor de 20 kilómetros y con una tendencia difusa en dirección sureste. El predominio del grado bajo de urbanización es patente en el tramo, pero una parte significativa de las áreas, que en 2015 tenían un grado de consolidación bajo, para el 2020 aparecen con grados medio y alto; mientras que el área cubierta con un grado bajo se amplía de manera difusa (Mapa 6). De la información del cuadro 6 es posible observar que de 2015 a 2020 el grado urbanización medio, más que se duplicó (creció 125.3 por ciento, al cubrir el 11 por ciento de la superficie construida) y el grado alto más que se triplicó, al abarcar el 8.4 por ciento de la cobertura del medio construido. El grado bajo creció a un ritmo menor (93.9 por ciento), aunque claramente partió de una cobertura más extensa (Cuadro 6). La presencia de unidades económicas con más de 30 ocupados o el crecimiento de su ubicación en este tramo periurbano, en comparación con otros tramos, no es significativa (Gráfica 6).

Cuadro 6. Evolución del grado de urbanización (gu) periurbana en tramos del Corredor del Bajío (has.)

| Tramo | gu | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | Cambio 2015 - 2020 (%) | % del to- tal de co- bertura 2020 |
|-----------------|----|------|------|------|------|------|------|------------------------------|--|
| periur- bano | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|--|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| S a n J u a n del Río / Que- rétaro | BAJO | 2834.5 | 3075.4 | 3319.7 | 3558.6 | 3728.1 | 3942.1 | 39.1 | 73.5 |
| | M E - DIO | 463.4 | 522.0 | 608.8 | 676.0 | 726.4 | 794.7 | 71.5 | 14.8 |
| | ALTO | 267.2 | 332.1 | 415.8 | 477.5 | 549.9 | 627.6 | 134.9 | 11.7 |
| | T O - TAL | 3565.2 | 3929.4 | 4344.2 | 4712.1 | 5004.4 | 5364.4 | 50.5 | 100.0 |
| Q u e - rétaro / Cela- ya | BAJO | 3685.2 | 3966.2 | 4307.9 | 4677.7 | 4878.7 | 5081.7 | 37.9 | 79.1 |
| | M E - DIO | 495.4 | 545.0 | 639.8 | 710.0 | 754.4 | 807.2 | 62.9 | 12.6 |
| | ALTO | 222.4 | 268.5 | 342.3 | 410.8 | 479.7 | 538.7 | 142.2 | 8.4 |
| | T O - TAL | 4403.0 | 4779.7 | 5290.0 | 5798.6 | 6112.8 | 6427.6 | 46.0 | 100.0 |
| Celaya / Sala- manca | BAJO | 2558.0 | 2989.5 | 3637.4 | 4260.2 | 4651.0 | 4919.1 | 92.3 | 86.0 |
| | M E - DIO | 274.1 | 312.5 | 345.6 | 401.2 | 455.9 | 483.7 | 76.5 | 8.5 |
| | ALTO | 150.6 | 175.3 | 201.2 | 243.0 | 290.8 | 319.5 | 112.1 | 5.6 |
| | T O - TAL | 2982.7 | 3477.3 | 4184.3 | 4904.4 | 5397.6 | 5722.2 | 91.8 | 100.0 |
| Sala- manca / Ira- puato | BAJO | 1297.9 | 1560.6 | 1807.6 | 2045.2 | 2289.3 | 2430.1 | 87.2 | 81.8 |
| | M E - DIO | 177.0 | 204.1 | 226.8 | 261.1 | 303.1 | 330.7 | 86.8 | 11.1 |
| | ALTO | 96.2 | 116.0 | 133.6 | 156.9 | 183.5 | 211.8 | 120.1 | 7.1 |
| | T O - TAL | 1571.1 | 1880.7 | 2168.0 | 2463.2 | 2775.8 | 2972.5 | 89.2 | 100.0 |
| I r a - puato / León | BAJO | 3205.3 | 3807.1 | 4283.9 | 4791.5 | 5302.0 | 5645.9 | 76.1 | 77.3 |
| | M E - DIO | 449.6 | 550.0 | 654.2 | 763.7 | 859.5 | 948.4 | 110.9 | 13.0 |
| | ALTO | 254.4 | 329.9 | 416.2 | 510.7 | 622.0 | 705.2 | 177.2 | 9.7 |
| | T O - TAL | 3909.3 | 4687.0 | 5354.3 | 6065.9 | 6783.4 | 7299.5 | 86.7 | 100.0 |

| | | | | | | | | | |
|--|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| León / San Francisco del Rincón | BAJO | 556.5 | 672.6 | 779.2 | 884.1 | 1006.5 | 1078.8 | 93.9 | 80.6 |
| | M E - DIO | 65.2 | 84.6 | 100.8 | 113.2 | 135.1 | 146.8 | 125.3 | 11.0 |
| | ALTO | 35.8 | 51.0 | 66.1 | 80.6 | 96.9 | 113.2 | 215.8 | 8.5 |
| | T O - TAL | 657.5 | 808.2 | 946.1 | 1078.0 | 1238.5 | 1338.8 | 103.6 | 100.0 |
| Total Corredor del Bajío | BAJO | 14137.5 | 16071.3 | 18135.7 | 20217.4 | 21855.5 | 23097.7 | 63.4 | 79.3 |
| | M E - DIO | 1924.6 | 2218.3 | 2576.0 | 2925.2 | 3234.4 | 3511.4 | 82.4 | 12.1 |
| | ALTO | 1026.7 | 1272.8 | 1575.2 | 1879.6 | 2222.7 | 2516.0 | 145.1 | 8.6 |
| | T O - TAL | 17088.8 | 19562.3 | 22286.9 | 25022.2 | 27312.6 | 29125.1 | 70.4 | 100.0 |

Fuente: elaboración propia.

En el tramo que une a Irapuato con Guanajuato o con Silao, y de ahí con León, se presenta una tendencia del medio construido que de Irapuato a Guanajuato enlaza pequeñas localidades urbanas; y hacia Silao sigue la línea carretera hasta unirse con la expansión derivada de la centralidad de esta localidad, para continuar dentro de las fronteras de la zona metropolitana hacia la localidad central de León (Mapa 7). En el patrón de expansión a lo largo de este periurbano, predomina también el grado bajo, pero se observa también que la superficie cubierta con un grado de urbanización medio más que se duplica en el periodo 2015-2020, y crece 177.2 por ciento en el grado alto (Cuadro 6). El tramo ocupa el segundo lugar en el Corredor del Bajío, por el número de unidades económicas con más de 30 ocupados que en 2020 se estaban ubicadas en él. Son 296 establecimientos que representan el triple de los que había en 2015 (Gráfica 6).

Gráfica 6. Establecimientos con más de 30 ocupados en los tramos del periurbano del Corredor del Bajío

El tramo de Salamanca a Irapuato evidencia los motivos por los cuales el gobierno de Guanajuato, mediante un decreto estatal reconoció que ambos municipios, Salamanca e Irapuato forman la séptima zona metropolitana de la entidad, aunque esto no lo incorpore aún el Sistema Urbano Nacional.¹¹ Esta decisión en cierto sentido se respalda con la evolución del crecimiento del medio construido que se aprecia en el Mapa 8, donde se evidencia su avance, tanto en el espacio que circunda las fronteras de ambas localidades como en el corredor que las une. En el mapa es posible también detectar el avance en la consolidación del grado de urbanización de esta expansión, en la cual el alto crece al ritmo más acelerado (120.1 por ciento) (Cuadro 6). Esta tendencia no se acompaña de una dinámica similar en la ubicación de unidades económicas con más de 30 ocupados, los cuales representan el 8.1 por ciento del total de estos establecimientos en los seis tramos periurbanos en 2020, y su crecimiento de 2015 a 2020 fue poco significativo (Gráfica 6).

Entre los seis tramos, el de Celaya a Salamanca ocupa el tercer lugar por el número de sus unidades económicas, en 2020, con más de 30 ocupados, aunque su tasa de crecimiento en el periodo es relativamente baja (Gráfica 6). La expansión del medio construido en su periurbano surge en el área de influencia circundante de Celaya y prácticamente corrobora su enlace metropolitano con Cortázar y Villagrán y Congregación Mexicanos ; y se conecta, fuera del límite metropolitano, con Valtierra y con la expansión periurbana de Salamanca. En dirección noroeste la expansión en el periurbano de la zona metropolitana de Celaya sigue un patrón fragmentado hacia Juventino Rosas. Nuevamente, el grado de urbanización que predomina es el bajo, pero para 2020 muestra una mayor continuidad en la ocupación del espacio (Mapa 9). En el proceso de consolidación de esta expansión, también es más rápida la transición del grado medio al alto (Cuadro 6).

11 Información obtenida en la página de la Secretaría del Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial del Gobierno de Guanajuato. Consultada el 24 de febrero de 2021 en <<https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/zonas-metropolitanas>>.

El Mapa 10 muestra la influencia de la zona metropolitana de Querétaro en este proceso de expansión. Aquí se puede apreciar el proceso metropolitano, derivado de su localidad central que la une con los dos Apaseo, el Grande y el Alto. Sólo el segundo es parte de su zona metropolitana; y es claro que fuera de estas fronteras, la conexión de la expansión del medio construido de Celaya con Apaseo el Grande es mucho más evidente; aunque este municipio no es parte de la zona metropolitana de Celaya. El grado de urbanización que predomina es por supuesto el bajo, pero se hace muy evidente que este grado transita a los grados medio y alto principalmente en las zonas que circundan a ambas localidades, lo que da cuenta del carácter metropolitano de esta expansión. En este marco es de notar las transiciones, de 2015 a 2020, del grado de urbanización bajo al medio y del medio al alto en la zona que conecta Apaseo el Grande con Celaya. En términos tendenciales, el crecimiento del grado bajo de urbanización ha decrecido su participación en la expansión y ha crecido en apenas 37.9 por ciento; mientras que el crecimiento del grado medio es de 62.9 por ciento y el del grado alto de 142.2 por ciento. Esto es, el grado alto ha incrementado 2.4 veces su cobertura en la superficie del periurbano (Cuadro 6). Es de notar que en este tramo el número de unidades económicas con más de 30 ocupados es bajo, en comparación con otros tramos; no obstante, en el periodo 2015-2020 este número se ha triplicado (Gráfica 6).

Finalmente, está la expansión en el tramo periurbano que conecta a Querétaro con San Juan del Río, conurbación fuera de su zona metropolitana en la que el medio construido cubre una superficie, en 2020, de más de 5, 300 hectáreas. Esta superficie se extiende de manera muy fragmentada y enlaza con pequeñas localidades a lo largo de un corredor y abarca en el periodo de análisis una superficie creciente (Mapa 11). En esta expansión predomina el grado bajo de urbanización, y los grados medio y alto solo se observan en la parte del tramo que desemboca dentro de las fronteras metropolitanas de Querétaro y se expresa con un crecimiento acentuado de 134 por ciento en el grado alto y de 71.5 por ciento en el gra-

do medio (Cuadro 6). Entre los seis tramos periurbanos, este concentra la mayor porción de las unidades económicas con más de 30 ocupados. Se trata de 312 establecimientos en 2020; 158 por ciento más que en 2015.

Puesto que los tramos difieren en longitud y superficie, las comparaciones entre ellos no ofrecen evidencia para sustentar hipótesis robustas sobre la asociación entre los grados de urbanización y la ubicación de establecimientos económicos. No obstante, es posible notar cierta tendencia en los tramos cortos hacia una mayor densificación del medio construido y una menor presencia y crecimiento de unidades económicas con más de 30 ocupados.

Si se simplifica un poco la dinámica de densificación del periurbano y se piensa como un proceso en el cual primero aparecen zonas con una cobertura del medio construido menor al 50 por ciento (grado bajo) y que aumentan la densidad de su construcción hasta llegar al 100 por ciento, los datos agregados del Corredor del Bajío darían la imagen de que de 2015 a 2020, 1,489.3 hectáreas transitaron del grado de urbanización medio al alto; 3,076.1 del bajo al medio; y el medio construido extendió su expansión en 12,036.3 hectáreas, que anteriormente formaban parte del paisaje natural. Aunque esta forma de expansión del medio construido sucede en términos generales, también hay lugares y momentos en los que la expansión surge desde el inicio con un alto grado de densificación, cuando el mercado inmobiliario encuentra los incentivos adecuados.

Conclusiones

La tendencia mundial de aceleración de la urbanización y de concentración de la mayoría de la población en el medio urbano acontece también en México, donde el mayor peso del crecimiento de la población lo ha asumido el Sistema Urbano Nacional, en un marco de carencias de infraestructura, servicios, recursos y capacidades institucionales para acomodar el creci-

miento. El proceso de urbanización en México, lejos de manifestarse en un crecimiento compacto y coordinado de sus ciudades, ha resultado, con la mayor frecuencia, en una expansión territorial urbana descoordinada y caótica, de baja densidad residencial y de déficit de servicios que ha generado impactos negativos en costos de transporte, tiempos de traslado, medio ambiente natural, riesgos urbanos y calidad de vida de la población. De acuerdo con un reporte de onu-Hábitat (2011: 19), la expansión territorial de las ciudades de México refleja un modelo de ciudad discontinuo, disperso y de baja densidad que no es sustentable.

La expansión incontrolada de las urbes hace patente la necesidad de construir una estrategia espacial en la escala de la región urbana, en cuyo marco el monitoreo del proceso y la forma de la expansión periurbana se perfila como una actividad relevante.

Este capítulo presentó una exploración del proceso de urbanización en un estudio de caso en la escala de la región urbana. El estudio ilustró el uso de diversas fuentes de información disponibles para llevar a cabo un monitoreo de la expansión periurbana en la escala regional. El análisis de la región como un espacio red se basó en información derivada de la colección formal de las estadísticas del Inegi, que permitió perfilar un marco para develar una relación funcional entre los mercados de ocupados en la región. Este marco se puede actualizar quinquenalmente. El análisis de la evolución anual del fenómeno urbano en el espacio físico de la región se basó en información de dos series de tiempo: las imágenes del satélite Landsat-8 procesadas para detectar el medio construido y datos georreferenciados de las unidades económicas del censo con un tamaño suficiente para constituirse en una fuente de empleo de cierta relevancia. La motivación para emprender este estudio surgió de la posibilidad de que, en el marco de un proyecto de investigación financiado por el Fondo para el Desarrollo Regional de Ciencia y Tecnología (fordecyt), se mostrara el valor agregado que las series en el tiempo de imágenes de satélite ofrecen para el estudio de la evolución del proceso de urbanización en la escala regio-

nal. Este valor surge de sus características técnicas, de la periodicidad de su recolección y de su publicación y apertura para su acceso.

Los resultados del análisis exploratorio de estas fuentes de información en el periodo 2015-2020 dan cuenta del dinamismo del régimen espacio-temporal de la urbanización, en la escala de la región urbana bajo análisis. Por un lado, pareciera que esta evolución, en el Corredor del Bajío, se desarrolla en el marco de un conjunto de ciudades con una jerarquía poblacional relativamente equilibrada, con relaciones funcionales fuertes con sus zonas de influencia, aunque relativamente débiles entre sus centros. Una estructura que pudiera a futuro desplegar algunas de las características que los adherentes al modelo policéntrico consideran favorables para un desarrollo urbano equilibrado y cuyas desventajas se destacan por sus críticos, principalmente, en función de sus externalidades ambientales.

Por el otro lado, la expansión periurbana del medio construido no se ordena por un trazo urbano planificado. El desplazamiento de la actividad industrial, y de la población al espacio periurbano, se extiende principalmente a lo largo de ejes carreteros que conectan diversos poblados en una expansión que, en mayor parte, es de baja densidad y difusa y con frecuencia caracterizada por parches o islas urbanas, aunque en algunos tramos y algunas zonas exhibe un proceso de densificación no planeada. Esta dinámica pudiera evolucionar hacia un proceso de colisión de zonas metropolitanas: cinco de Guanajuato enlazadas en cordón, vinculadas por el extremo oriente con la zona metropolitana de Querétaro, en la cual se incluye un municipio de Guanajuato y por el occidente con de San Francisco del Rincón, en la cual se incluye un municipio de Michoacán.¹²

En México, la definición oficial de las fronteras de las zonas metropolitanas ha sido posterior al proceso de expansión urbana, cuya dinámica no se ha enmarcado en esfuerzos planificados guiados por una visión de

12 En las cinco zonas metropolitanas de Guanajuato se contabiliza la de Irapuato-Salamanca, reconocida como tal por el gobierno local.

una organización espacial congruente con la orientación del crecimiento urbano sostenible social, económico cultural y ambiental. Además, cuando lo metropolitano cruza las fronteras de entidades, su reconocimiento oficial no se ha acompañado de esfuerzos comprensivos y estratégicos para gestionar las dinámicas metropolitanas y planificar su forma y evolución espacial. La definición de las zonas metropolitanas parece tener más un propósito para ordenar la generación de estadísticas, que para planificar su crecimiento o control, al seguir una estrategia de desarrollo espacial.

Múltiples autores señalan la necesidad de poner más atención en las relaciones funcionales que se entretejen y yuxtaponen en la escala de la región, que cruzan las delimitaciones político administrativas de las ciudades y plantean temas relevantes para la gobernanza urbana. Entre otros, Champion (2001) destaca que la región urbana se forma por la coalescencia funcional de varios asentamientos de tamaño similar; Galland (2015: 66) expone que “la dinámica de transformación territorial urge a reconsiderar el desajuste espacial entre las fronteras de las jurisdicciones administrativas y los territorios más bien fluidos de las regiones funcionales”; y, Paasi y Zimmerbaur (2016: 74) rescatan la propuestas de diversos autores que consideran que las fronteras no deben asumirse sin cuestionamientos como definitorias del espacio regional y enfatizan la necesidad de balancear las visiones territorial y relacional en la gobernanza

Cabe preguntar si la dinámica de las zonas metropolitanas del Corredor del Bajío se puede seguir al pensar en términos de localidades separadas físicamente en la escala de la región urbana, conectadas funcionalmente con diversas formas de movilidad cotidiana e intercambios de mercancías, información o conocimiento, en un escenario en que la accesibilidad mejora, el crecimiento de la población de las localidades pequeñas se acelera y los mercados de trabajo se desconcentran, o si lo que se perfila corresponde a un proceso de formación mega-metropolitana, donde el campo de conectividad de los centros de trabajo traspasa las fronteras formales de las zonas metropolitanas, se expresa en la expansión física de la activi-

dad industrial y del medio construido, y plantea el riesgo de formación de una gran aglomeración metropolitana que por su tamaño sería la segunda del país. A partir del cordón actual del Corredor del Bajío, a más largo plazo, un aglomerado de esta magnitud incluiría en su zona de influencia o como parte de su conurbación, pequeños archipiélagos urbanos formados en corredor y asentados muy cerca del periurbano aquí definido; por citar dos ejemplos, el corredor formado al sur de Celaya, por un conjunto de pequeñas localidades alineadas desde Salvatierra hasta Valle de Santiago, que conectan con una urbanización muy difusa con Salamanca; o al norte de Celaya, el cordón de urbanización difusa que une a Dolores Hidalgo con San Miguel de Allende.

Aunque un escenario de esta naturaleza pareciera alarmista, hay que recordar que la urbanización acelerada vigente en los países en desarrollo, más que evolucionar hacia estructuras urbanas ordenadas y compactas, sigue una tendencia de expansión periurbana en la que la tasa de conversión del suelo natural en áreas construidas es más acelerada que la tasa de crecimiento de la población. Esto es, el crecimiento espacial de la expansión urbana es más acelerado que el crecimiento de la población y esta conversión da lugar a patrones de uso del suelo de baja densidad que no se complementan y a formas de urbanización difusas, desordenadas e incluso caóticas, que no siguen un trazo urbano planificado, sino que se autoorganizan en función de una infraestructura carretera diseñada para conectar poblados espacialmente independientes.

El análisis exploratorio pone en evidencia la complejidad que ambos escenarios plantean, y el reto que esto conlleva no para la gobernanza metropolitana, sino para la inter-metropolitana del desarrollo urbano. Solo por ejemplificar esta complejidad, se puede mencionar que este corredor urbano se integra por 18 municipios que deben trabajar coordinadamente para resolver problemáticas relacionadas con las implicaciones de la ocupación del espacio físico en la sustentabilidad y en los derechos de sus habitantes.

La expansión del medio construido en el periurbano y sus patrones de densificación requieren analizarse a la luz de diversos factores, como las políticas o los incentivos que promueven la descentralización de las industrias a las periferias o que desincentivan su permanencia dentro de los límites de las localidades urbanas; las políticas de vivienda que financian desarrollos inmobiliarios en las zonas periurbanas, sin considerar los costos de llevar servicios públicos a sus habitantes o las necesidades de traslados o los obstáculos para el acceso a la ciudad y a sus servicios. Tras el análisis de estos factores, quedan abiertas preguntas relativas a las implicaciones de la ocupación del espacio físico en la construcción del territorio periurbano del Corredor del Bajío. Asimismo, como trabajo a futuro, queda explorar las formas de urbanización que se despliegan en el espacio periurbano de este corredor; entre ellos, las características distintas del medio construido, los usos del suelo, los tipos de asentamientos humanos y las formas de propiedad que se combinan en ellos.

La planeación espacial de la región urbana escasamente se ve en programas de ordenamiento territorial o planes parciales de infraestructura; programas regionales que contienen un sesgo específico para promover un tema económico, de comercio o de desarrollo de vivienda, pero que no consideran de manera integral y sistémica sus impactos en la calidad de vida urbana o en la sustentabilidad económica y ambiental de la expansión de los aglomerados urbanos. La agenda urbana requiere darle un lugar prioritario al análisis de las dinámicas urbanas en curso en la escala regional, la construcción de una estrategia de desarrollo espacial adecuada para la conducción de un desarrollo urbano que sea sustentable, incluyente y garante de derechos; y, las formas y los procesos de gobernanza que esta conducción requiere.

Referencias

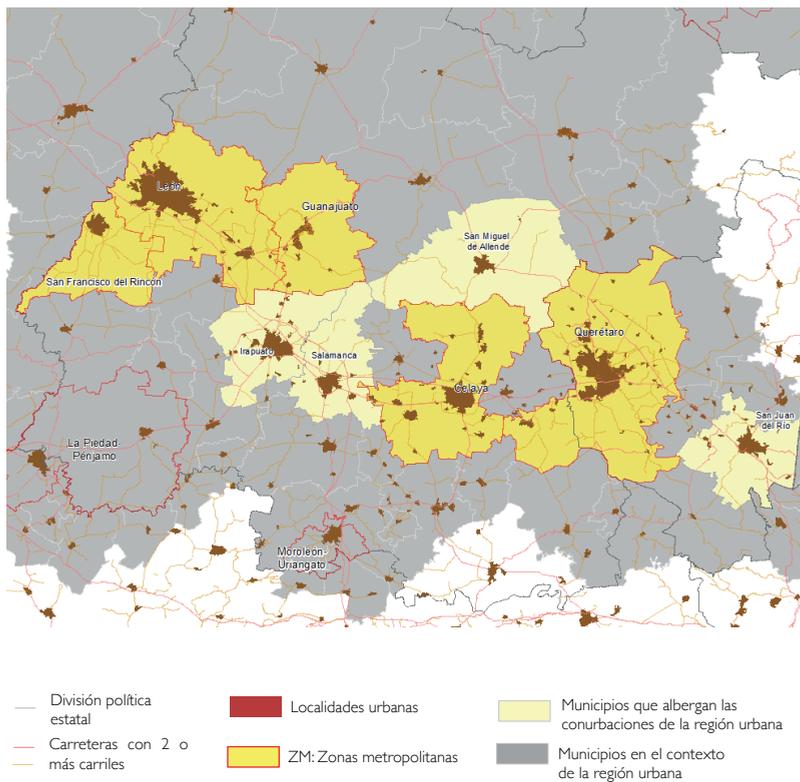
- Antikainen J. (2005). "The concept of Functional Urban Area", en *Informationen zur Raumentwicklung*, núm. 7,
- Ávila S. H. (2001) "Ideas y planteamientos teóricos sobre los territorios periurbanos. Las relaciones campo-ciudad en algunos países de Europa y América", en *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, unam*, núm. 45, pp. 108-127.
- Brezzi M. y Veneri P. (2015) "Assessing Polycentric Urban Systems in the oecd: Country, Regional and Metropolitan Perspectives", en *European Planning Studies*. vol. 23 (6), pp. 1128-1145
- Brook R.M. y Dávila J. D (eds) (2000) "The Periurban Interface: a Tale of Two Cities" School of Agricultural and Forest Sciences, University of Wales and Development Planning Unit, University College London.
- Champion, A. G. (2001). "A changing demographic regime and evolving polycentric urban regions: consequences for the size, composition and distribution of city populations", en *Urban Studies*, núm. 38(4), pp. 657-677.
- Clos J. (2017) "Policy Statement 26th Session of the Governing Council", en UN-HABITAT.
- Committee on Spatial Development (1999) "ESDP. European Spatial Development Perspective Towards Baced and Sustainable Development of the Territory of the European Union", en European Commission. Disponible en <https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum_en.pdf.
- conapo (2018). Sistema Urbano Nacional 2018. Disponible en <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/400771/SUN_2018.pdf.
- Davoudi S. (2003). "European Briefing: Polcentricity in European spatial planning: from an analytical tool to a normative agenda", en *European Plannig Sru-dies*, núm. 8.

- Delgado J. (2003). “La urbanización difusa, arquetipo territorial de la ciudad región”, en *Sociológica*, núm. 51, pp. 13-48.
- Di Palma F., Amato F., Nolè G., Martellozzo F. y Murgant B. (2016). “A SMAP Supervised Classification of Landsat Images for Urban Sprawl Evaluation”, en *isprs International Journal of Geo-Information*, núm 5, pp. 109. Disponible en <doi:10.3390/ijgi5070109>.
- Dittakan K., Coenen F., Christley R. y Wardeh M. (2013) “Population Estimation Mining Using Satellite Imagery”, en Bellatreche L., Mohania M.K. (eds) *Data Warehousing and Knowledge Discovery. DaWaK Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin, Heidelberg. Disponible en <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40131-2_25>.
- Douglas I., (2005) “Peri-Urban Ecosystems and Societies: Transitional Zones and Contrasting Values” Capítulo 2 en ed. Simon D, McGregor D, Thompson D., (2005) *Contemporary Perspectives on the Peri-Urban Zones of Cities in Developing Countries*. Routledge
- espon (2012). “European Spatial Planning Observatory Network 2013 Program”, en European Union. Disponible en <file:///C:/Users/Elvia%20Mart%C3%ADnez/Desktop/ESPON_Project_Overview_December_2012.pdf>.
- espon (2016). “Polycentric Territorial Structures and Territorial Cooperation”, en espon Policy Brief ESPON European Union. Disponible en: <www.espon.eu/sites/default/files/attachments/ESPON_policy_brief_polycentricity_071016_FINAL_2.pdf>.
- European Commission (1999). “esdp. European Spatial Development Perspective. Towards Balanced and Sustainable Development of the Territory of the European Union”, European Communities, Luxembourg.
- European Union (2011). “Territorial Agenda of the European Union 2020. Towards an Inclusive, Smart and Sustainable Europe of Diverse Regions”. Disponible en <https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/policy/what/territorial-cohesion/territorial_agenda_2020.pdf>.

- Galland D. y Elinbaum P. (2015) "Redefining Territorial Scales and the Strategic Role of Spatial Planning". *The Planning Review*, 51(4), pp. 66-85
- Green N. (2007). "Functional Polycentricity: A Formal Definition in Terms of Social Network Analysis", en *Urban Studies*, núm. 11, pp. 2077-2103.
- Hague C. y Kirk K. (2003). "Polycentricity Scoping Study". Disponible en <<http://archive.northsearegion.eu/files/user/File/Events/Thematic%20Events/Polycentric%20Seminar/ScopingPoly.pdf>>.
- Hall P. (2011) "The polycentric metropolis. A Western European perspective on mega-city regions". Capítulo 2 en ed Xu J. et al *Governance and Planning of Mega-City Regions, An International comparative perspective*. Oxfordshire: Routledge
- Hall P. y Pain K. (2006) "The Polycentric Metropolis. Learning from Mega-City Regions in Europe", en Earthscan. London-Sterlin va.
- Mc Gregor D., Simon D. y Thompson D. (2005). *The Periurban Interface. Approaches to Sustainable Natural and Human Resources Use*. London: Routledge.
- Martínez V.E., Calvillo S.Y. y López G.J. (2017). "Mercados de trabajo intensivos en conocimiento en las regiones urbanas". Reporte Técnico realizado en el marco del proyecto Tendencias del Nuevo Orden Mundial. Impacto en el Desarrollo y las Regiones del País: rubro: Caracterización territorial de regiones en el país con mayor vulnerabilidad a efectos internacionales o mayor potencial para enfrentar problemáticas de desarrollo socioeconómico. Financiado por el Fondo Institucional del Conacyt-2017.
- Medeiros (2016). "Territorial Cohesion: An EU concept", en *European Journal of Spatial Development*.
- Meijers E y Sandberg K. (2006). "Polycentric development to combat regional disparities? The relation between polycentricity and regional disparities in European countries", en 46th Congress of the European Regional Science Association: "Enlargement, Southern Europe and the Mediterranean". Volos: Greece.

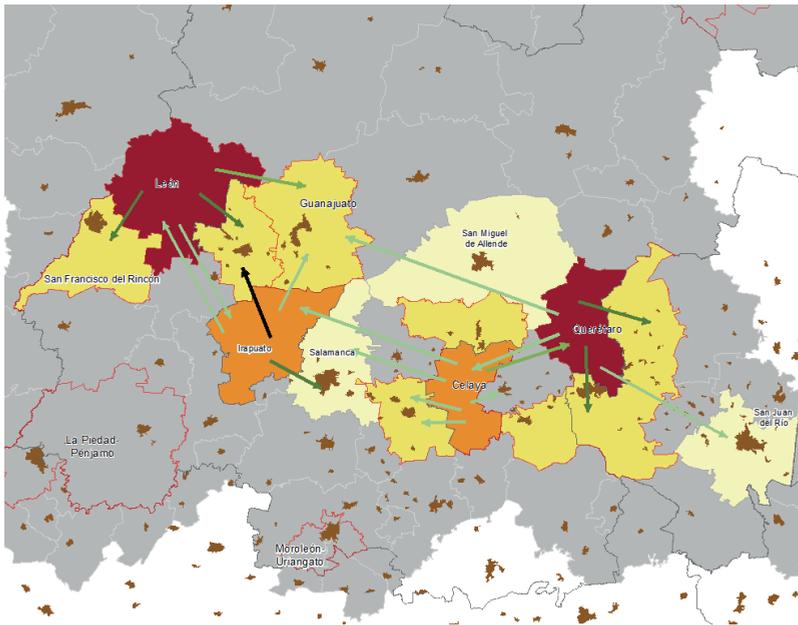
- Nole G., Murgante B., Calamita G., Lanorte A y Lasaponara R, (2015). "Evaluation of urban sprawl from space using open source technologies", en *Ecological Informatics*. vol 26, pp. 151-161.
- ONU-HÁBITAT-SEDESOL (2011). *ESTADO DE LAS CIUDADES DE México*. México: SEDESOL, GOBIERNO DE México.
- Paasi A. y Zimmerbauer K.(2016). "Penumbra borders and planning paradoxes: Relational thinking and the question of borders in spatial planning", en *Environment and Planning A*, Vol. 48(1) pp. 75-93.
- Rubiera-Morollón y Garrido-Yserte (2020). "Recent Literature about Urban Sprawl: A Renewed Relevance of the Phenomenon from the Perspective of Environmental Sustainability" , en *Sustainability*, núm. 12, pp. 6551.
- Simon D., Mc Gregor D., Thompson D. (2005). "Contemporary Perspectives on the Peri-Urban Zones of Cities in Developing Areas", en Simon D, McGregor D, Thompson D., *Contemporary Perspectives on the Peri-Urban Zones of Cities in Developing Countries*.
- Vasanen A. (2012). "Functional Polycentricity: Examining Metropolitan Spatial Structure through the Connectivity of Urban Sub-centers", en *Urban Studies*, núm. 49, pp. 3627-3644.
- Veneri P. y Burgalassi D. 2010 "Questioning polycentric development and its effects: issues of definition and measurement for the Italian NUTS 2" No. 26410, posted 7. November 2010 22:03 UTC. Disponible en <<https://mpra.ub.uni-muenchen.de/26410/> MPRA >.

Mapa I. Región urbana: Corredor del Bajo



Fuente: Elaboración propia.

Mapa 2. Viajes cotidianos al trabajo de ocupados desde los centros de mercado



Viajes cotidianos desde centros de mercado

- 400 - 1000
- 1001 -
- 2001 -
- Más de 6000

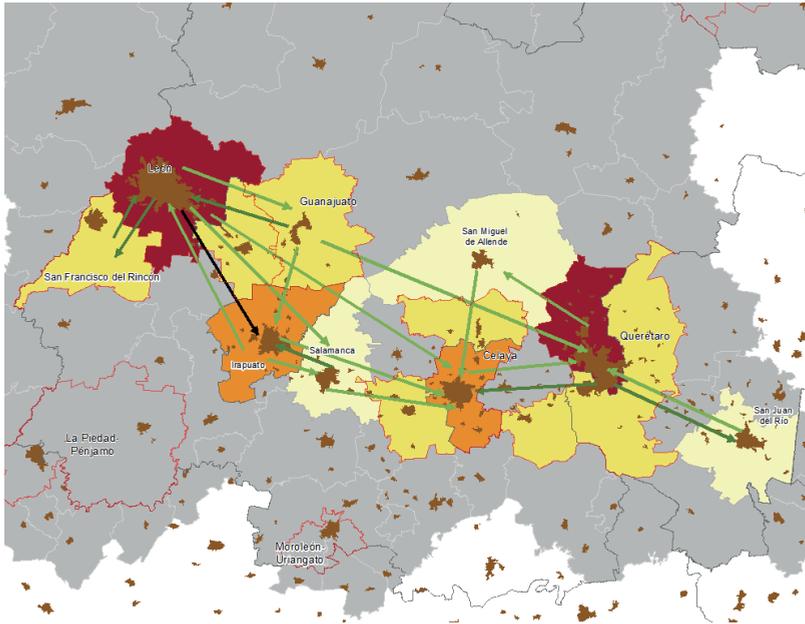
Centros de mercado

- Primario
- Secundario
- Terciario

- Localidades urbanas
- Zonas metropolitanas
- Municipios que albergan las conurbaciones de la región urbana

Fuente: Elaboración propia con datos de Inegi, EIC 2015.

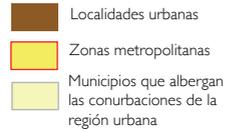
Mapa 3. Viajes cotidianos al trabajo de los ocupados entre zonas metropolitanas



Viajes cotidianos desde centros de mercado

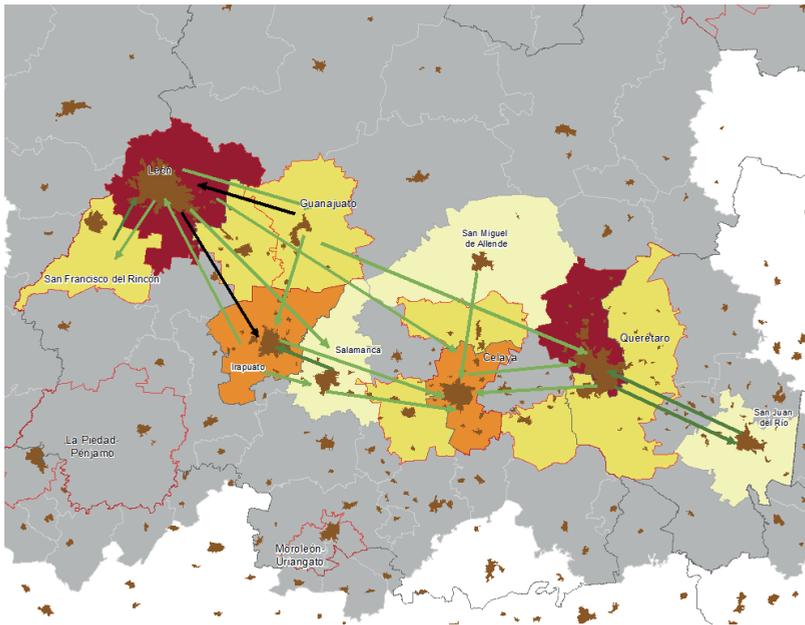


Centros de mercado



Fuente: Elaboración propia con datos de la Encuesta Intercensal 2015 de Inegi.

Mapa 4. Viajes cotidianos al trabajo de personas en ocupaciones intensivas en conocimiento entre zonas metropolitanas



Viajes cotidianos



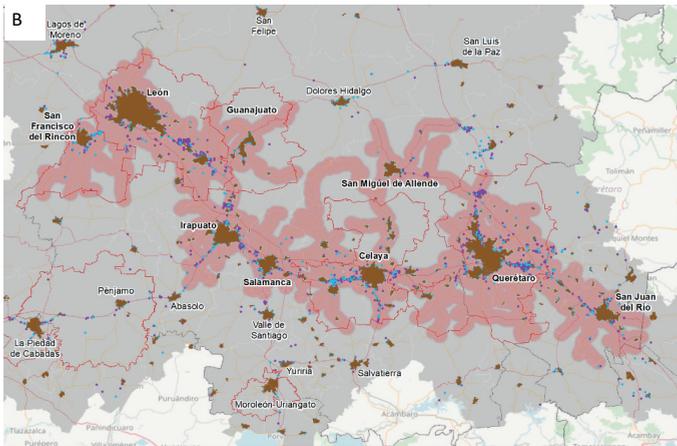
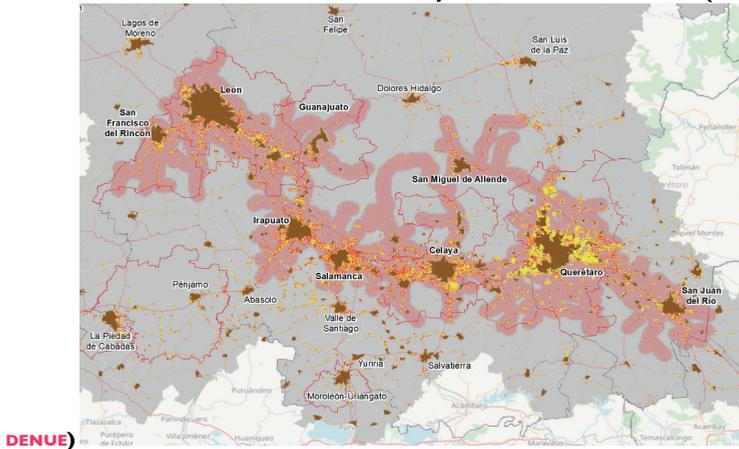
Centros de mercado



Fuente: Elaboración propia con datos de la Encuesta Intercensal 2015 de Inegi.

A

Mapa 5. Periurbano del Corredor del Bajío: A. Medio construido detectado en pixeles con más de 10% de cobertura urbana y B. Unidades económicas (Inegi-



Medio construido (pixeles con más de 10% de cobertura urbana)

Unidades Económicas con 30 ocupados o más



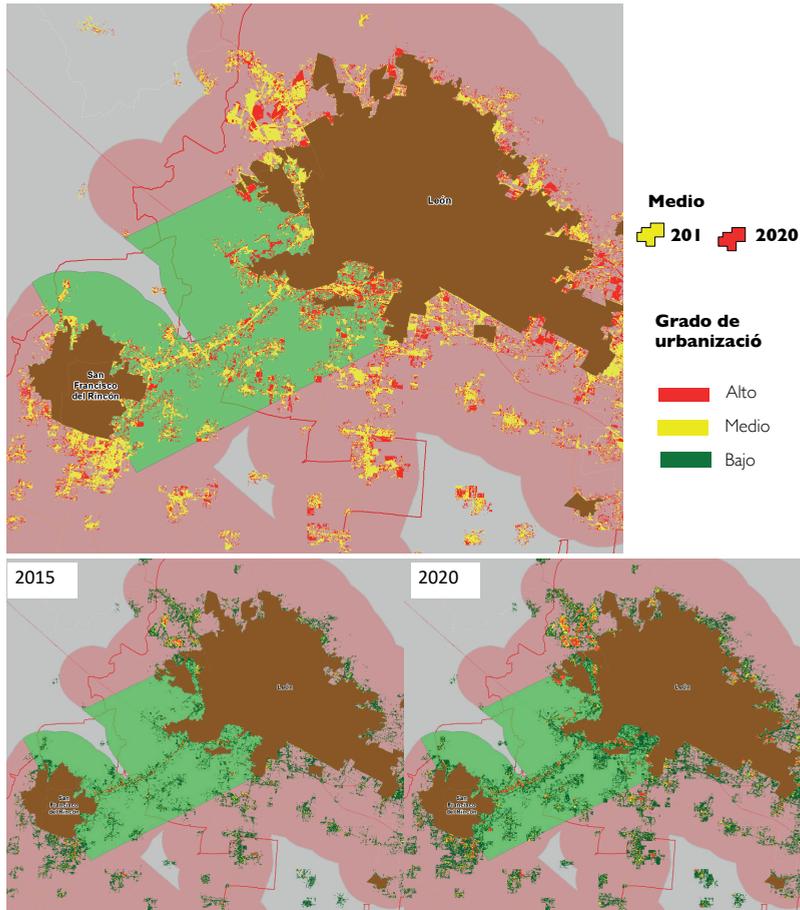
Límite de ZM

Localidad urbana

2015 2020

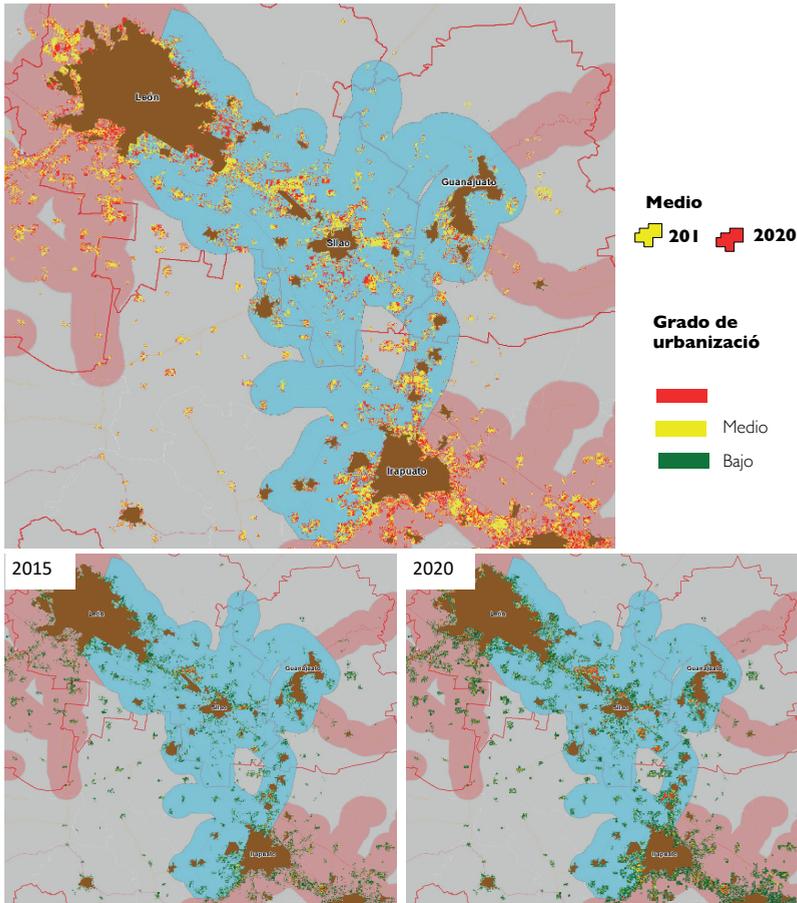
Fuente: Elaboración propia con datos de Landsat-8 y de Inegi-DENU

Mapa 6. Expansión del medio construido y grado de urbanización periurbana en el tramo de San Francisco del Rincón-León



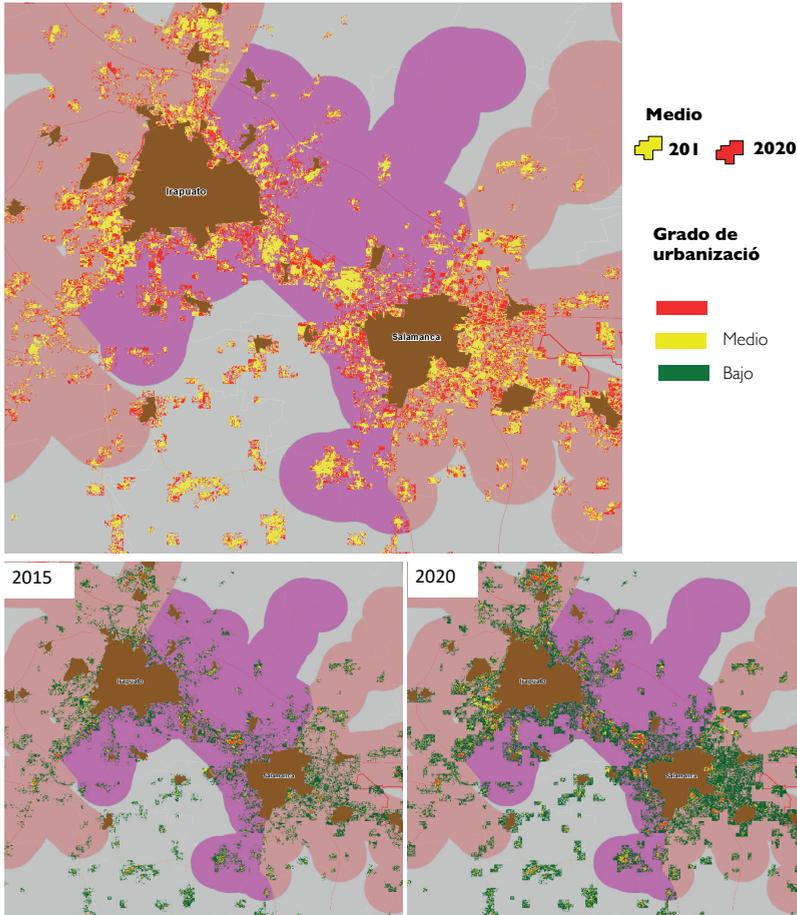
Fuente: Elaboración propia con datos de Landsat-8.

Mapa 7. Expansión del medio construido y grado de urbanización periurbana en el tramo Irapuato-(Guanajuato-Silao)-León



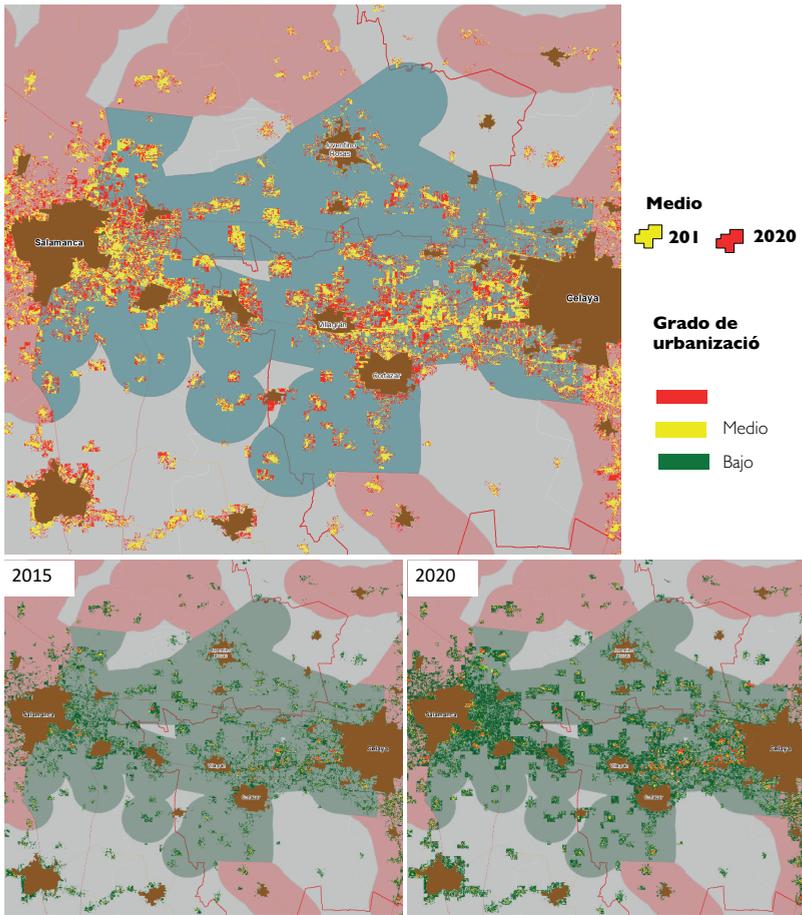
Fuente: Elaboración propia con datos de Landsat-8.

Mapa 8. Expansión del medio construido y grado de urbanización periurbana en el tramo Salamanca-Irapuato



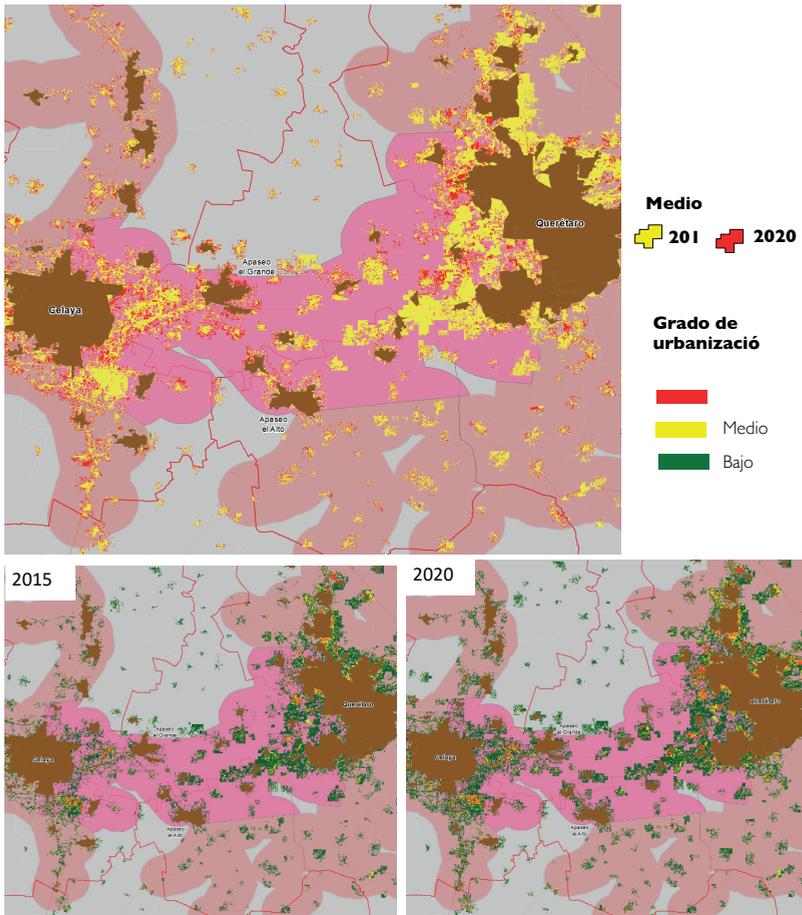
Fuente: Elaboración propia con datos de Landsat-8.

Mapa 9. Expansión del medio construido y grado de urbanización periurbana en el tramo de Celaya-Salamanca



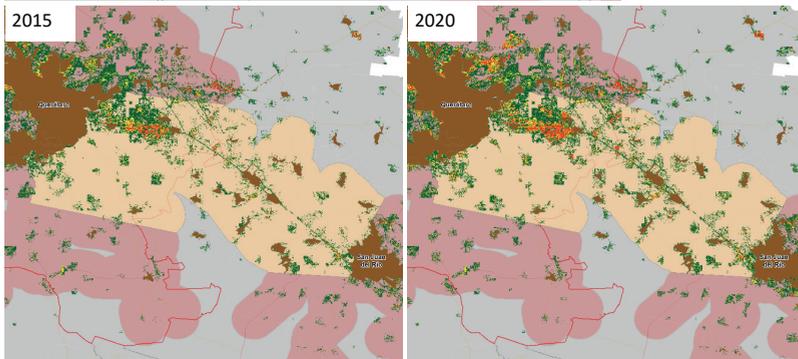
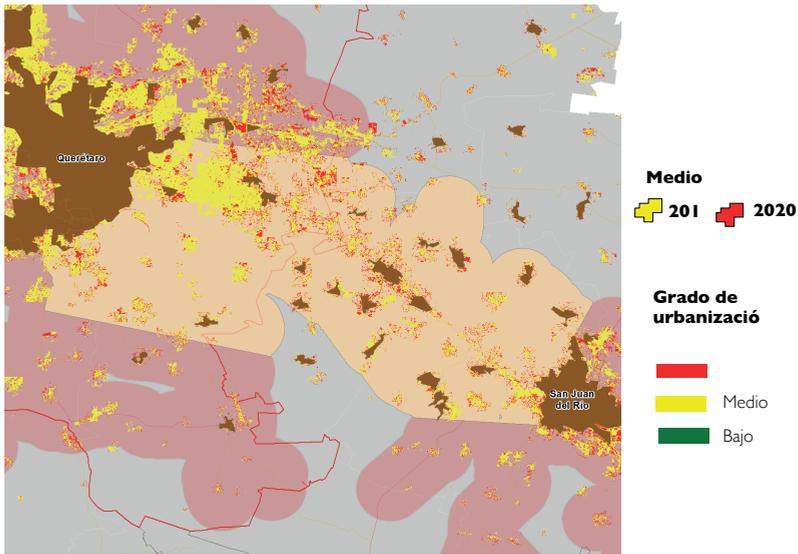
Fuente: Elaboración propia con datos de Landsat-8.

Mapa 10. Expansión del medio construido y grado de urbanización periurbana en el tramo Querétaro-Celaya



Fuente: Elaboración propia con datos de Landsat-8.

Mapa II. Expansión del medio construido y grado de urbanización periurbana en el tramo San Juan del Río- Querétaro



Fuente: Elaboración propia con datos de Landsat-8.

El uso de la analítica geovisual en el desarrollo de plataformas y estudios de caso para problemas sociales

Rodrigo Tapia McClung y Tania Gómez

Fernández

Introducción

Sin duda alguna, los datos masivos son un insumo de información cada vez más accesible en varios campos de interés, como las redes sociales, las transacciones financieras, las operaciones de mercado, etcétera. Estos conjuntos masivos de datos son relevantes para el conocimiento de la sociedad y las relaciones del entorno en el que vive. En consecuencia, el uso de grandes cantidades de datos en diversas aplicaciones es cada vez más extendido. Sin embargo, es relevante y necesario procesarlos, de algún modo, para generar información significativa que sirva para responder a necesidades específicas de conocimiento y de la sociedad.

Hoy en día existen muchos campos dedicados al procesamiento de datos, para extraer información, como la minería de datos (o *Data Mining*, en

inglés), que se enfoca en analizar de forma automática o semiautomática grandes cantidades de datos para extraer patrones interesantes hasta ahora desconocidos. O bien, la estadística descriptiva, que se enfoca en recopilar, organizar y estructurar datos para obtener indicadores relevantes que muestren un panorama general de los datos e incluso en utilizar gráficos bien conocidos, que muestran algunos comportamientos de los datos disponibles. Recientemente, muchos de estos campos se han fusionado en uno nuevo, conocido como analíticavisual de datos (o *Visual Data Analytics*, en inglés), que a grandes rasgos comprende dos etapas de procesamiento: visualización de datos y analítica visual.

La visualización de datos es la representación gráfica que puede ayudar a obtener una primera aproximación a la información que se puede extraer de los datos. Utiliza elementos visuales como cuadros, gráficos y mapas; es una forma amena y accesible de exponer tendencias, valores atípicos y patrones en los datos. De esta manera, se pueden detectar problemas o formular preguntas respecto al panorama que exponen.

Por otro lado, la analítica visual corresponde a los procesos de visualización que perciben de forma tangible valores numéricos o abstracciones de patrones; luego, los asimilan por medio de las funciones cognitivas del cerebro encargadas resolver problemas, entender el ambiente o realizar cálculos, entre otras funciones (Török, 2019). De este modo, un problema complejo se descompone en un panorama más comprensible para el observador. Dicho esto, la analítica visual de datos es un enlace entre la gestión de datos brutos y la creación de modelos de datos complejos.

Más aún, la inclusión de visualizaciones interactivas ha dado pie a la comprensión y solución de problemas en tiempo real, porque el observador construye su propio conocimiento de las relaciones que existen entre los elementos de la visualización, y modela para sí una faceta del problema que le permite comprender en partes más simples un contexto complejo. Algunos han nombrado este proceso como analítica visual ágil (o *Agile Visual Analytics* en inglés) (Kandogan y Engelke, 2016).

Desde tiempos remotos, la cartografía es un poderoso recurso gráfico para visualizar múltiples tipos de datos con un contexto espacial. Incluso pueden mostrarse abstracciones de los datos, como los mapas de calor, los cartogramas, entre otros. La cartografía puede adaptarse a un sinfín de contextos, como datos geográficos, de movilidad, logísticos, de salud, etcétera.

Para transformar los datos en una representación visual, es necesario hablar de funciones cognitivas, destinadas a la abstracción de información y también a la codificación visual (Padilla, 2018). La abstracción de información se vuelve relevante, porque queremos mostrar datos de fenómenos que no necesariamente tienen una representación visual muy obvia o natural. Por ejemplo, en medicina, una radiografía es un apoyo visual muy natural de lo que sucede en el organismo. Entre más realista sea, se podrían tomar decisiones más acertadas sobre una enfermedad. Cuando se utilizan datos de fenómenos abstractos, como preferencias políticas o la situación de desempleo, una representación visual puede complicarse un poco (ver Figura 1). Aquí entra en juego la codificación visual, la cual corresponde a las funciones cerebrales dedicadas a la percepción abstracta de patrones que nacen de la interacción con elementos del medio (Padilla, 2018). Estas funciones son especialmente útiles en el proceso de visualización, porque ayudan a transformar los datos de cualquier tipo en una representación gráfica. Por ejemplo, supongamos que un individuo interactúa con un conjunto de datos de estatura y peso; por medio de las funciones de abstracción, su cerebro le indicaría que existen algunos patrones en el conjunto de datos. Por ejemplo, que algunos datos describen a personas de muy baja o alta estatura, bajo peso, sobrepeso, entre otros. Si le pedimos al individuo que describa gráficamente los patrones que encontró en el conjunto de datos, las funciones de codificación visual transforman la información que obtuvo de los datos en una representación visual, como un gráfico de barras, una tabla u otro.

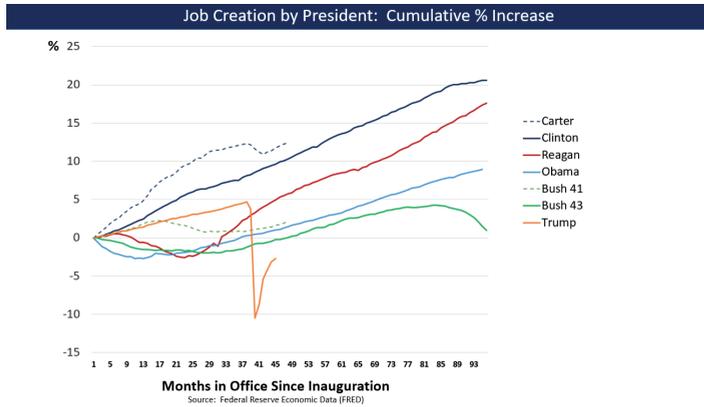
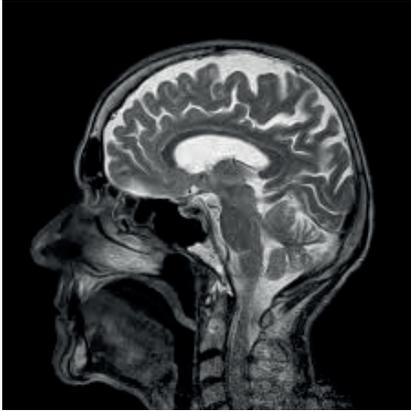


Figura 1. Imagen de radiología computarizada de cabeza (izquierda). imagen de “Creative Commons”, bajo licencia de Pixabay. Creación de empleo por presidente de los EEUU, desde Ronald Reagan hasta Donald Trump (derecha). Imagen de “Creative Commons,” bajo licencia de Attribution-Share Alike 4.0 International.

Para este momento, la abstracción de datos puede parecer un proceso natural de la percepción humana. Sin embargo, en una visualización de datos se requiere que la abstracción y codificación de información se lleve a cabo de forma analítica, pues es necesario considerar que los datos se recolectaron con un propósito específico y, en consecuencia, los gráficos deben transmitir una idea sin sesgos y permitir que otros usuarios construyan sus propias preguntas o juicios acerca de lo que se les presenta (Török,

2019; Tufte, 1983). En muchos casos no existe una visualización obvia para los datos y decidir cuál es la mejor manera de hacerlo puede ser una tarea complicada.

La idea de la analítica visual se puede trasladar al dominio de los datos espaciales; es decir, aquellos que tienen una referencia geográfica explícita. Hereda las técnicas de análisis y visualización, pero además incorpora una relación de los datos que representan en el espacio, en el territorio y en el lugar en donde suceden. Esta línea de investigación se nombra analítica geovisual y, además de centrarse en lo mencionado, tiene un énfasis especial en el análisis de diversas situaciones, a través tanto del espacio como del tiempo.

Para entender un poco mejor este enfoque, es útil definir los siguientes conceptos.

Geovisualización: un dominio que atiende la exploración visual, el análisis, la síntesis y la presentación de datos que contienen información geográfica, al integrar elementos de distintas disciplinas como Ciencias de Información Geográfica, visualización científica, análisis de imágenes, visualización de información y análisis exploratorio de datos (Dykes, MacEachren y Kraak, 2005).

Analítica visual: la ciencia de razonamiento analítico facilitado por interfaces visuales interactivas (Thomas y Cook, 2005).

Analítica geovisual: se refiere a la ciencia de razonamiento analítico con información espacial facilitada por interfaces visuales interactivas (Robinson, 2017). Además, junta áreas como cartografía, métodos computacionales, diseño de interfaces, ciencia cognitiva y reconoce la necesidad de poner atención en el uso de datos espacio-temporales (Andrienko *et al.*, 2007, 2010).

La analítica geovisual es un campo que trata con el análisis de la dinámica de los procesos territoriales, al integrar datos espacio-temporales en interfaces interactivas basadas en mapas y con visualizaciones estadísticas y gráficas vinculadas con métodos computacionales.

De manera muy concreta, una diferencia fundamental entre la geovisualización, la analítica visual y la analítica geovisual, es que la primera da una representación estática, la segunda trata sobre el razonamiento analítico, aunque no de datos espaciales, y la tercera busca juntar estos dos enfoques desde una perspectiva dinámica de los datos espaciales.

Además, la analítica geovisual se ha posicionado como una herramienta y línea de investigación fundamental, que tiene impacto directo en los procesos de toma de decisión en ámbitos que van desde los públicos hasta los privados. Simon (1960) propuso que los procesos de tomas de decisiones tienen tres fases o actividades: inteligencia, diseño y elección. La analítica geovisual tiene cabida en cada una de estas tres actividades y puede apoyar a aquellos involucrados en tomar una decisión en un proceso de naturaleza, tanto espacial como temporal.

Con esto en mente, el propósito de este capítulo es presentar al lector dos casos de estudio en México, que se centran y benefician del uso de la analítica geovisual. El primer caso es el del monitoreo de cuerpos de agua en la cuenca del Río Grijalva. El segundo es el estudio del crecimiento urbano en el corredor metropolitano centro país.

No obstante, antes de entrar de lleno en los casos de estudio, es conveniente hablar un poco acerca de la inspiración y el desarrollo de las plataformas de analítica geovisual.

Acerca del diseño de plataformas de analítica geovisual

Las plataformas se concibieron como herramientas de apoyo para el análisis y la presentación de los resultados obtenidos, a partir de los datos recolectados para los estudios de caso del Corredor Metropolitano Centro País y la cuenca del Río Grijalva. Tienen la finalidad de comunicar de forma clara y objetiva los indicadores más relevantes que derivaron del proyecto de investigación, de manera que los usuarios puedan explorar libremente

dentro de los módulos que la conforman.

Durante la etapa de diseño, se tomaron en cuenta los recursos tecnológicos disponibles que hicieran factible la implementación y el mantenimiento a largo plazo de los módulos que integran las plataformas. También se consideraron aplicaciones cartográficas y estadísticas para medios digitales web que fueran funcionales y pudieran adaptarse bajo distintos contextos. Se utilizó el lenguaje de programación Javascript; en particular, las librerías LeafletJS y amCharts 4, por la facilidad que ofrecen para la implementación de recursos cartográficos y visualizaciones web, que funcionan en diferentes navegadores, además de que cuentan con una amplia comunidad de seguidores y documentación (Puszynski, 2019). Elegir las herramientas adecuadas para la implementación de la plataforma es una tarea relevante, en el sentido de optimizar la experiencia de los usuarios al interactuar con los recursos que forman parte de la plataforma. Esto sirve para presentar una faceta amena y amigable de la investigación, que resulta en el entendimiento intuitivo de los temas complejos que se abordan en los casos de estudio. Una vez elegidas las herramientas de trabajo, llegó el momento de diseñar la interfaz de analítica geovisual.

Durante la selección y el diseño de las partes de las plataformas, fueron necesarios debates relacionados a encontrar la mejor visualización, para exponer los resultados obtenidos de la labor de análisis espacial y estadístico que realizaron previamente los investigadores. Esto es relevante, pues la visualización debe elegirse al considerar el cumplimiento de requerimientos como el contexto de la investigación, el público al que va dirigido, los hallazgos e ideas que el investigador necesita transmitir al usuario y, al mismo tiempo, permitir al usuario explorar sus propios planteamientos, a través de la interacción con las plataformas. Por lo tanto, deben presentar objetivamente los resultados obtenidos a partir de los datos recolectados, para dar cauce a los casos de estudio.

Para esta tarea, recurrimos a la exploración de variedades y usos de gráficas. Es bien sabido que existen visualizaciones reconocidas para el

despliegue de tipos de datos específicos (Heer *et al.*, 2010).

Dada la intención original del proyecto y, en particular para cada caso de estudio, es importante considerar que los resultados expuestos en las plataformas corresponden a un subconjunto específico de datos derivados del análisis de diversas fuentes, los cuales están acotados en función del planteamiento del problema inicial y las conclusiones que se desean transmitir.

Esto implica que los datos brutos derivados del análisis deben ser estructurados y modelados para que sirvan al propósito específico de visualización. Dentro de estas tareas se incluyen los filtros, los agrupamientos, la segmentación, las operaciones lógicas, las aritméticas y otras. El modelado de información, a partir de estas operaciones, facilita acomodar los datos en formas específicas para acoplarlos a un diseño específico de gráficas que sirven y cumplen con el propósito de resaltar ciertas características en el comportamiento de los datos, como ordenamientos, patrones y tendencias, entre otros. El cuarteto de Anscombe ejemplifica de un modo exquisito esta situación. En la tabla superior de la Figura 2 hay cuatro conjuntos de once datos que tienen las mismas propiedades estadísticas (ver a la derecha). Sin embargo, la inspección de sus respectivos gráficos hace evidente que los conjuntos son distintos.

Existe una nutrida variedad de gráficas y visualizaciones. Sin embargo, la selección depende de los hallazgos que se desean transmitir, pues un diseño complejo y rebuscado puede distraer la atención del usuario hacia otros puntos menos relevantes cuando queremos concentrar su atención en una idea puntual. Por ejemplo, en la Figura 3, el ángulo de la imagen de la izquierda impide identificar rápidamente el orden de los segmentos del círculo, reconocer el orden de mayor a menor o un rasgo específico de los datos. Podemos observar que se trata de información mensual, de modo que para este caso podría ser más apropiado utilizar un gráfico de líneas o una gráfica de barras. Por otra parte, la vista superior de la imagen de la derecha permite reconocer ágilmente la distribución de las categorías y la asignación del color reafirma la idea de que el norte y el oeste tienen la

mayor y menor presencia, respectivamente.

| I | | II | | III | | IV | |
|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| X | Y | X | Y | X | Y | X | Y |
| 10.0 | 8.04 | 10.0 | 9.14 | 10.0 | 7.46 | 8.0 | 6.58 |
| 8.0 | 6.95 | 8.0 | 8.14 | 8.0 | 6.77 | 8.0 | 5.76 |
| 13.0 | 7.58 | 13.0 | 8.74 | 13.0 | 12.74 | 8.0 | 7.71 |
| 9.0 | 8.81 | 9.0 | 8.77 | 9.0 | 7.11 | 8.0 | 8.84 |
| 11.0 | 8.33 | 11.0 | 9.26 | 11.0 | 7.81 | 8.0 | 8.47 |
| 14.0 | 9.96 | 14.0 | 8.10 | 14.0 | 8.84 | 8.0 | 7.04 |
| 6.0 | 7.24 | 6.0 | 6.13 | 6.0 | 6.08 | 8.0 | 5.25 |
| 4.0 | 4.26 | 4.0 | 3.10 | 4.0 | 5.39 | 19.0 | 12.50 |
| 12.0 | 10.84 | 12.0 | 9.13 | 12.0 | 8.15 | 8.0 | 5.56 |
| 7.0 | 4.82 | 7.0 | 7.26 | 7.0 | 6.42 | 8.0 | 7.91 |
| 5.0 | 5.68 | 5.0 | 4.74 | 5.0 | 5.73 | 8.0 | 6.89 |

$N = 11$
 mean of X 's = 9.0
 mean of Y 's = 7.5
 equation of regression line: $Y = 3 + 0.5X$
 standard error of estimate of slope = 0.118
 $t = 4.24$
 sum of squares $X - \bar{X} = 110.0$
 regression sum of squares = 27.50
 residual sum of squares of $Y = 13.75$
 correlation coefficient = .82
 $r^2 = .67$

And yet how they differ, as the graphical display of the data makes vividly clear:

F. J. Anscombe, "Graphs in Statistical Analysis," *American Statistician*, 27 (February 1973), 17-21.

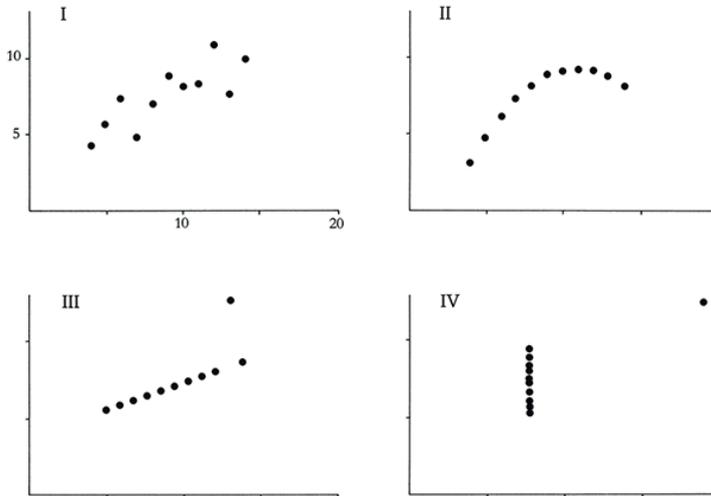


Figura 2. Cuarteto de Anscombe. Imagen de Tufte, E. (2001), "The Visual Display of Quantitative Information".

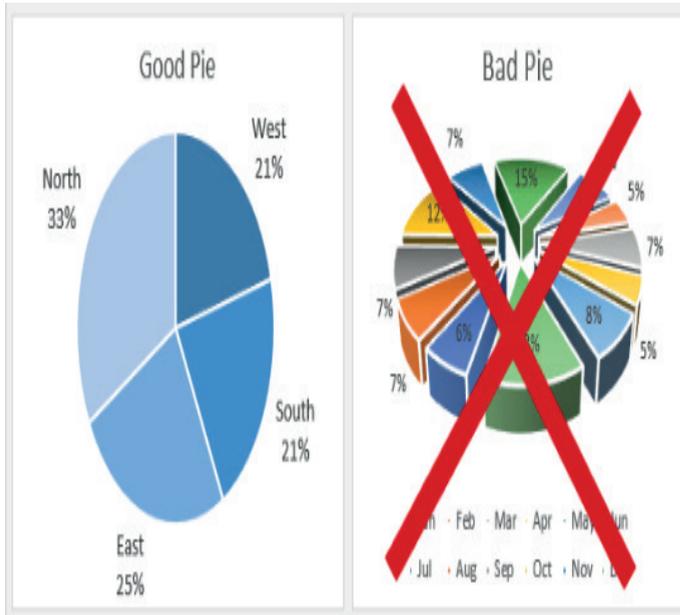


Figura 3. Gráfica circular en vista lateral (izquierda). Gráfica circular en vista superior (derecha). Imagen de “Best practices in pie charts”, licencia bajo Excel Campus International.

Además de la interfaz visual con la que interactúa el usuario, existe una parte esencial, que funciona tras bambalinas, que se encarga del funcionamiento lógico de la plataforma, la estructura y las transacciones entre la plataforma y el servidor donde están alojados los conjuntos de datos originales.

Esta etapa es crucial durante la puesta en marcha, ya que de esto depende la experiencia de uso mientras la persona interactúa con la plataforma. La selección de métodos y elementos que conforman los mecanismos de la plataforma es importante, porque puede reducir el tiempo de ejecución de procesos, como las transacciones de datos, la creación de gráficas y la carga de imágenes, entre otros. Antes de implementar las gráficas, es necesario hacer algunos arreglos en el conjunto de datos, el cual debe ser

lo más prolijo posible; para lograr esto, es indispensable familiarizarse con los datos, entender el contexto del problema y, de ser posible, la coyuntura en la que está inmerso, por si llegado el momento se tenga que decidir si un dato es atípico o un error de captura. Arreglar los detalles en el conjunto de datos es una buena práctica que debería ejecutarse desde el inicio del análisis; sin embargo, no siempre se realiza. Esto no nos exige que dentro de nuestras funciones, como encargados de la visualización, debamos depurar la información que nos llega. Cuando la información es de mala calidad o no es tratada de manera adecuada, se obtienen visualizaciones incongruentes o estrafalarias que pueden conducirnos a conclusiones erróneas de un escenario que nada tiene que ver con la realidad. Para el almacenamiento y la depuración de información se utilizaron sistemas de información geográfica, para explorar los conjuntos de datos y hacer correcciones antes de cargarlos a la base de datos de la plataforma.

La selección de gráficas se hizo con la revisión previa de los datos y los resultados que se querían comunicar para cada caso de estudio. Con esto en mente, se eligieron visualizaciones acordes al tipo de datos disponibles, al poner especial atención a si los datos corresponden a tipo cualitativos o cuantitativos; o bien, si están asociados a un patrón temporal o espacial subyacente o a sus combinaciones. Por ejemplo, patrones cíclicos reconocidos, como la temporada de lluvias y las sequías.

Por último, además de la presencia conjunta de las gráficas, se agregaron controles que permitan al usuario involucrarse de manera individual con la visualización de los datos y deducir su propio conocimiento a partir de los resultados mostrados. Ejemplo de estos controles son selectores de fecha, casillas para seleccionar u omitir elementos, botones para habilitar y deshabilitar información y acercar o alejar el mapa, entre otros. Con esto se consiguen reforzar los hallazgos de la investigación, porque el usuario puede conocer diferentes facetas del mismo ejercicio por medio de los cambios que percibe en la visualización.

Caso de estudio: monitoreo de cuerpos de agua en la cuenca del Río Grijalva

El monitoreo de cuerpos de agua es un tema relevante, dada la estrecha relación que mantienen las sociedades con ellos. La mayoría de las civilizaciones se han establecido en o cerca de fuentes de agua limpia. Cualquier mexicano tiene clara esta relación, pues la gran Tenochtitlán, capital del imperio azteca, fue fundada sobre el lago de Texcoco. Por diversas causas, a quinientos años de la fundación de la Ciudad de México, se sufre la decisión de los antepasados de establecerse en donde lo hicieron. Es paradójico que la ciudad que naciera en medio de un lago ahora tenga problemas de abasto regular de agua.

Por otro lado, en la actualidad hemos sido testigos del número de eventos climatológicos que han afectado de manera negativa la estabilidad de pueblos y regiones. Por ejemplo, en 2020 hubo un total de 30 eventos en el Océano Atlántico y se utilizaron nueve letras del alfabeto griego para nombrar las últimas de la temporada. Esta es la segunda vez en la historia que esto ocurre. En 2005, el Centro Nacional de Huracanes (NHC, por sus siglas en inglés de *National Hurricane Center*) reportó el uso de seis letras del alfabeto griego para nombrar ciclones.

Como consecuencia de estos eventos, puede haber inundaciones en diversas regiones y es importante poder conocer el estado que guarda el territorio, la infraestructura y las personas. Por otro lado, así como puede haber inundaciones desastrosas, sucede lo contrario: sequías extremas que pueden reducir de manera significativa la disponibilidad de agua para cultivo, riego, animales, uso industrial y consumo humano.

Dadas estas circunstancias, se vuelve relevante y necesario contar con una manera de explotar los datos disponibles que sirvan para monitorear de manera clara y eficiente las condiciones en el territorio, en cuanto a cuerpos de agua se refiere. Es por ello que en este caso de estudio se presenta el desarrollo de una plataforma de analítica geovisual que sirva de apoyo en el estudio y al análisis de los cuerpos de agua en una región de México que tiene cierta propensión a las inundaciones en ciertas épocas del año.

La cuenca del Río Grijalva ocupa mayoritariamente los estados de Tabasco y Chiapas (ver Figura 4). El Río Grijalva se origina en Guatemala, cruza dichos estados y desemboca en el Golfo de México. Dentro de la cuenca se encuentran las presas Belisario Domínguez, Chicoasén, Nezahualcóyotl y Ángel Albino Corzo, así como las zonas metropolitanas de Tuxtla Gutiérrez y Villahermosa, capitales de los estados de Chiapas y Tabasco, respectivamente.

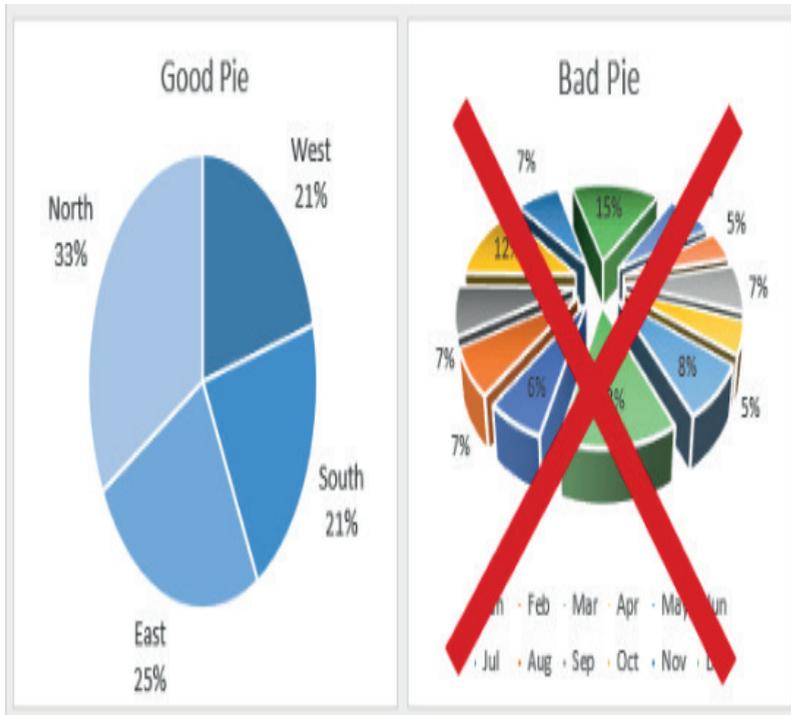


Figura 4. Ubicación de la cuenca del Río Grijalva

En el capítulo X se explica el proceso de extracción de máscaras de cuerpos de agua a partir de imágenes de radar del sensor Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea. En principio, estas imágenes están disponibles cada seis o 12 días. No obstante, la disponibilidad de tal cantidad de datos observacionales abre la necesidad de tener maneras eficientes de analizarlos.

Una de ellas es por medio de la *analítica geovisual*, pues de manera natural permite el uso de datos espacio-temporales. Dicho de otro modo, la analítica geovisual abre la puerta a explorar los cambios que presentan los cuerpos de agua en la cuenca del Río Grijalva a través del espacio y del tiempo.

La plataforma para el caso de estudio permite al usuario escoger uno de dos módulos: la evolución mensual de los cuerpos de agua y la comparación con el mapa base de cuerpos de agua del G3WBM (Global 3 arc-second Water Body Map) (Yamazaki, Trigg e Ikeshima, 2015). En ambos casos, el usuario debe escoger un rango de fechas para desplegar un tablero dinámico e interactivo en el cual se visualiza un mapa en el panel izquierdo y una serie de gráficas en el lado derecho. En este caso de estudio, el usuario puede explorar datos desde enero de 2016 hasta diciembre de 2018.

En el primer módulo, el mapa en el panel de la izquierda permite al usuario navegar por la región de la cuenca del Río Grijalva. El usuario puede acercarse, alejarse o mover el mapa al usar el control en la parte superior izquierda y al utilizar el ratón. También puede cambiar las fechas seleccionadas con anterioridad y activar o desactivar capas adicionales, que sirven para dar más contexto a la zona de estudio, con el control de capas que se encuentra en la parte superior derecha del mapa. Estas capas adicionales incluyen tres mapas base, los cuerpos de agua en la cuenca del Grijalva, así como sus nombres (cuando lo tengan), las escuelas de niveles básico, medio superior y otras, hospitales, hoteles principales, la delimitación de las áreas geoestadísticas básicas (AGEB), las áreas verdes urbanas, puentes, puertos, puntos fronterizos, la red nacional de caminos, los puntos de descargas residuales municipales e industriales, las presas principales, los polígonos de las manzanas en las zonas urbanas, la extensión de la cuenca y las subcuenas del Grijalva, las localidades urbanas, los límites de las zonas metropolitanas de Tuxtla Gutiérrez y de Villahermosa, los límites municipales y los polígonos de las áreas naturales protegidas.

En algunos casos, y al depender del nivel de detalle que tenga cada una de las capas, el usuario solo puede activarlas a partir de un cierto nivel de

acercamiento; de lo contrario, se corre el riesgo de una pobre experiencia del usuario al tener tantos datos desplegados en el mapa.

Inicialmente, el mapa muestra la extensión de la cuenca con un polígono suavizado que llega un poco más allá de los límites oficiales, los cuerpos de agua para el primer mes seleccionado y las áreas naturales protegidas (ver Figura 5). Las gráficas a la derecha muestran al usuario la variación a través del tiempo de 4 indicadores para todos los cuerpos de agua: la suma del área total, la suma del perímetro total, el promedio del desarrollo de línea de costa y el promedio de la dimensión fractal (ver capítulo m para una explicación más a fondo de estos indicadores y ver Figura 5).

Al utilizar el control en la parte inferior del mapa, el usuario puede activar la animación que hará que los cuerpos de agua cambien para los distintos meses seleccionados. Tanto el mapa como las gráficas de la derecha se actualizan al cambiar el mes, de modo que es posible identificar claramente ciertas dinámicas en ciertos periodos al observar el crecimiento o la caída en el tamaño global de los cuerpos de agua.

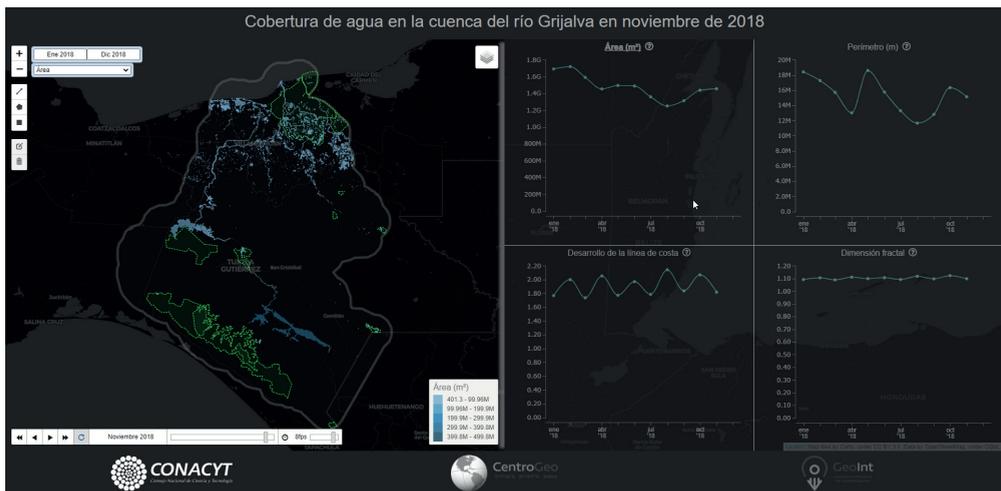


Figura 5. Vista del módulo de análisis para cuerpos de agua en la cuenca del Río Grijalva

Adicionalmente, en el lado izquierdo del mapa hay un control que le permite al usuario dibujar líneas, cajas o polígonos alrededor de los cuerpos de agua. Esto tiene por objetivo que el usuario interesado en una o más regiones específicas pueda analizar el comportamiento de los distintos indicadores para los cuerpos de interés. La Figura 6 muestra algunas figuras dibujadas en mapa con las gráficas del lado derecho actualizadas para mostrar los valores de los indicadores para dichas secciones. Es interesante notar que la dinámica local puede revelar condiciones que no se pueden percibir al ver a los cuerpos de la cuenca como un todo. Hay cuerpos que tienen una alta variabilidad y pueden aparecer o desaparecer de un mes al siguiente.



Figura 6. Vista del módulo de análisis para cuerpos de agua en la cuenca del Río Grijalva, con selecciones en el mapa que muestran la dinámica de cuerpos más pequeños.

Como ejemplo directo de la utilización de esta plataforma, se puede hacer un primer ejercicio de mostrar el monitoreo de los cuerpos de agua en la región del proyecto de la refinería de Dos Bocas, en el estado de Tabasco. Al definir el área de estudio en la zona propuesta, el análisis geovisual permite reconocer que a partir de septiembre de 2018 hubo un incremento

considerable en el área ocupada por cuerpos de agua superficiales. Cabe destacar que los datos son de 2018, pero se reconoce la utilidad que dicha representación podría tener para los tomadores de decisión, en términos de las posibilidades de inundación que pueden existir dentro de la zona de la refinería. La Figura 7 muestra la zona de estudio con el polígono destacado y las gráficas que hacen alusión al aumento de agua en la zona.



Figura 7. Vista del módulo de análisis para cuerpos de agua en la región de la refinería de Dos Bocas.

Es interesante notar que solo el fin de año de 2018 presentó el comportamiento descrito anteriormente y eso lo vuelve aún más interesante, pues da cuenta de una dinámica atípica en la región que, sin duda, debe ser tomada en consideración por los encargados de la ejecución de dicho proyecto.

Este tipo de análisis permite la exploración de las condiciones espacio-temporales de una región específica de México. No obstante, el contar con capas de datos geográficos, como escuelas, hospitales, refugios, negocios, cultivos, infraestructura, etcétera, abre la posibilidad de estudiar el impacto social y económico que puede tener un evento de inundación o de desbordamiento de cuerpos de agua.

Si las condiciones tecnológicas y los algoritmos para obtener y procesar las imágenes de radar permitieran obtener las máscaras de cuerpos de agua en periodos más cortos (por ejemplo, cada semana), sería posible utilizar esta plataforma de analítica geovisual para tener bajo observación alguna región específica y emitir una alerta cuando fuera inminente un posible evento de inundación.

Caso de estudio: monitoreo del crecimiento urbano en el corredor metropolitano centro país

Por su parte, el monitoreo del crecimiento urbano es, sin duda, un tema también de mucha relevancia en la actualidad. Aquella persona que haya tenido la oportunidad de ver las construcciones que se comen los cerros circundantes del valle de México, puede atestiguar que la ciudad se expande. Pero, ¿qué tan rápida o lenta es esta expansión? ¿Es constante o también ha experimentado cambios en la tasa de crecimiento?

Este tipo de preguntas cobran relevancia cuando es de interés detectar regiones que tienen un cierto grado de presión urbana, debido a otras zonas circundantes y cuando es necesario definir políticas públicas que puedan incidir en la calidad de vida de las personas que viven en esas regiones.

Por ello, este segundo caso de estudio busca explotar las capacidades de la analítica geovisual para, una vez más, enfocarse en la evolución espacio-temporal del crecimiento urbano que se puede detectar a partir de usar imágenes de satélite.

El corredor metropolitano centro país (CMCP) se encuentra en la zona del Bajío y se extiende a través de los estados de San Luis Potosí, Aguascalientes, Guanajuato, Michoacán, Querétaro e Hidalgo. En particular, contiene las zonas metropolitanas de San Luis Potosí, Rioverde, Aguascalientes, León, Guanajuato, Celaya, San Francisco del Rincón, La Piedad-Pénjamo, Moroleón-Uriangato y Querétaro (ver Figura 8).

En términos del contexto urbano de una región, este no solo se define de acuerdo con la tipología que se le puede asignar, sino que cobran relevancia las relaciones funcionales que puede haber entre distintas zonas. Para ejemplificar este tema, es de interés estudiar los flujos de personas ocupadas entre las zonas metropolitanas del CMCP.

Para ello, un primer módulo en la plataforma de analítica geovisual permite visualizar dichos flujos de diferentes maneras. Por principio de cuentas, se hace la diferenciación entre las ocupaciones que son intensivas en conocimiento (oic) y las que no. También, se muestra la dinámica de los flujos hacia y desde los centros de mercado o entre zonas metropolitanas. Es interesante darse cuenta que, al depender del tipo de flujo, hay algunas que se comportan como “receptoras” y otras como “emisoras”.

El módulo está compuesto por dos paneles. Del lado izquierdo, los flujos se muestran como arcos entre las distintas zonas metropolitanas del CMCP en un mapa interactivo. El usuario puede seleccionar el tipo de flujo que desea explorar, así como acercarse, alejarse y mover el mapa. Además, hay una serie de capas adicionales que sirven para dar un mayor contexto a la región del corredor, las cuales incluyen distintos mapas base, los municipios para dar contexto y los que albergan las conurbaciones de la región, la red nacional de caminos, el crecimiento urbano por área geoestadística básica en 2005, 2010 y 2015, las unidades económicas en la industria automotriz, de tecnología media-alta 2010 y de tecnología media-alta para distintos años, los centros de mercado por tipo (primario, secundario o terciario), el número de ocupados en orígenes y en destinos, y las zonas metropolitanas, localidades urbanas y estados de la región.

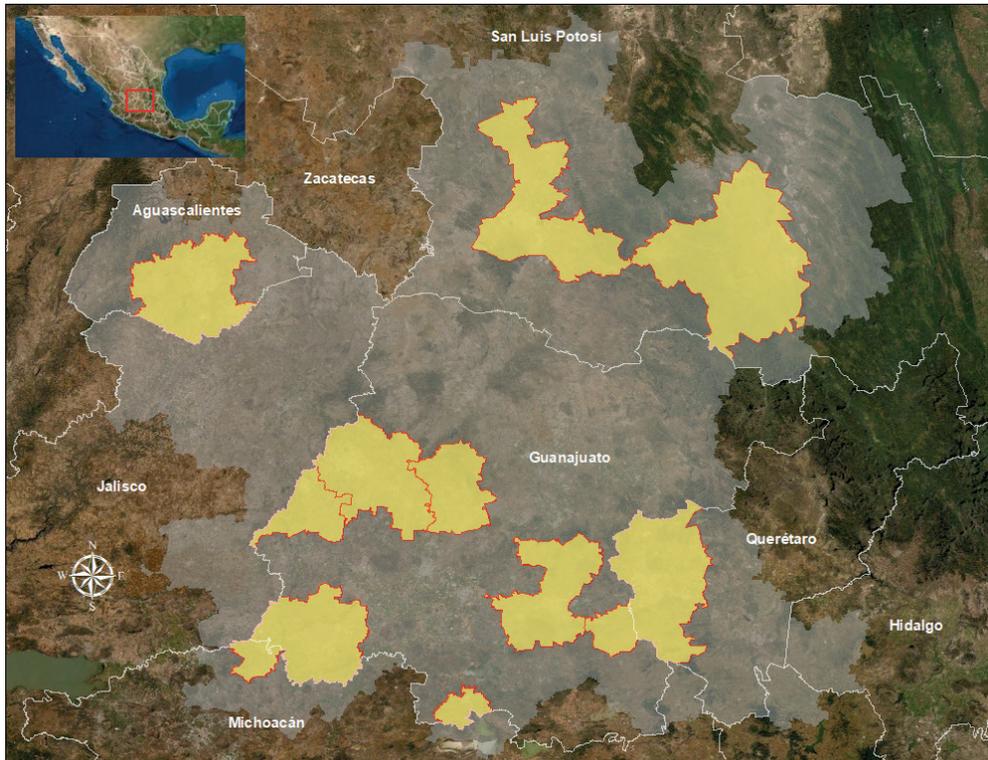


Figura 8. Ubicación del CMCP y de sus zonas metropolitanas

Además de la representación geográfica de los flujos de una zona a otra, los arcos tienen distintos colores y grosores. Ambos están relacionados con la cantidad asociada al flujo.

Una vez seleccionado el tipo de flujo deseado, en el panel hay una tabla que en el renglón superior tiene indicados los orígenes y, en el lado izquierdo, los destinos. El usuario puede explorar alguna combinación de origen-destino y conocer la cantidad de viajes realizados entre ellos. Los colores de las celdas de esta tabla son los mismos que los de los arcos en el mapa, de modo que es posible establecer una relación de colores entre estas dos visualizaciones. Las combinaciones que no tienen relaciones de flujos no tienen celdas de color y tienen un flujo asociado de cero. En la

parte inferior izquierda de este panel, hay una representación alternativa de los flujos del mapa, pero en un diagrama circular. Si el usuario hace clic en alguna zona metropolitana en el mapa, en la parte inferior derecha de este panel se muestra una tabla con la lista de flujos desde-hacia el nodo seleccionado.

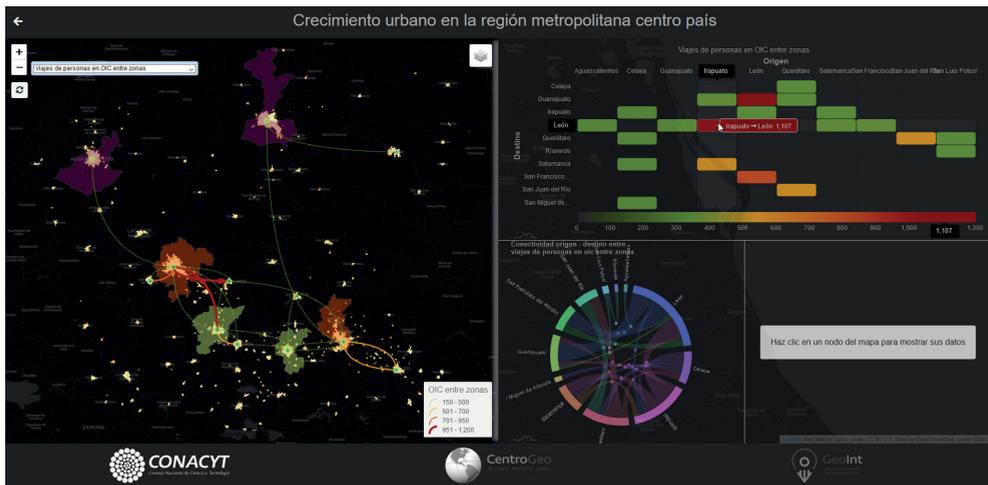


Figura 9. Módulo de exploración de flujos de ocupados en el CMCP

Un segundo módulo nos permite estudiar la dinámica de la evolución del crecimiento urbano en la región del CMCP. En este módulo, el enfoque es sobre cómo ha aumentado la cobertura urbana en la región de 2014 a 2019.

En el capítulo n, se explica con detalle el procedimiento para utilizar series de imágenes de satélite de Landsat 8 y obtener máscaras de urbanización. No repetiremos esa explicación. Basta decir que es posible estimar el trimestre del año cuando una región cambió su cobertura a tener más de 25 por ciento de urbanización por primera vez.

Esta codificación en valores digitales de pixel en una imagen se pueden explorar para conocer un poco más acerca de la dinámica de la evolución de la urbanización a lo largo del tiempo. Un segundo módulo de la plataforma de

analítica geovisual se centra precisamente en presentar al usuario estos cambios.

Al seguir con el diseño del módulo anterior, la pantalla se divide en paneles. Del lado izquierdo hay un mapa interactivo que muestra muchos cuadritos de colores. El usuario puede acercarse, alejarse o mover el mapa para explorar alguna zona de interés. Esos cuadritos de colores indican el trimestre del año en que esa región tuvo su primer cambio en urbanización de más del 25 por ciento. La escala de colores pasa de azul a amarillo y a rojos, de acuerdo con el año de urbanización. En la parte inferior del mapa, hay una barra de animación que le permite al usuario explorar el cambio de la urbanización a través del tiempo. Cada cuadro de animación corresponde a un trimestre del año. Los datos para este módulo cubren de 2014 a 2019. El usuario puede hacer *clic* en la barra para pasar al cuadro siguiente o al anterior, de uno en uno, reproducir continuamente hacia adelante o hacia atrás, mover un deslizador para moverse a un cuadro en específico y cambiar la rapidez de los cuadros de animación.

En el panel del lado derecho hay una gráfica superior que muestra con barras el área urbanizada en cada trimestre y con una línea el incremento en la urbanización de un trimestre al otro y la acumulación relativa de urbanización. Como no solemos experimentar que una zona urbanizada se deje al desamparo y la naturaleza la recupere, es de esperarse que este porcentaje se muestre siempre creciente.

En la parte inferior de este panel hay dos gráficas más. En la de la izquierda, se muestra la distribución del porcentaje de urbanización para cada año. Del lado derecho, se muestra una gráfica que combina puntos y barras con un eje angular y radial. En la parte superior, el eje radial muestra los años y el angular muestra los trimestres del año. Esta gráfica es útil para comparar la dinámica entre los mismos trimestres de distintos años. Es particularmente útil para evidenciar que el tercer trimestre de 2019 exhibe una urbanización mucho mayor que cualquier otro periodo (esto también se puede ver en la gráfica de barras, en donde la barra más alta corresponde a este trimestre y año). En la parte inferior de esta gráfica se muestra el acumulado por trimestre.

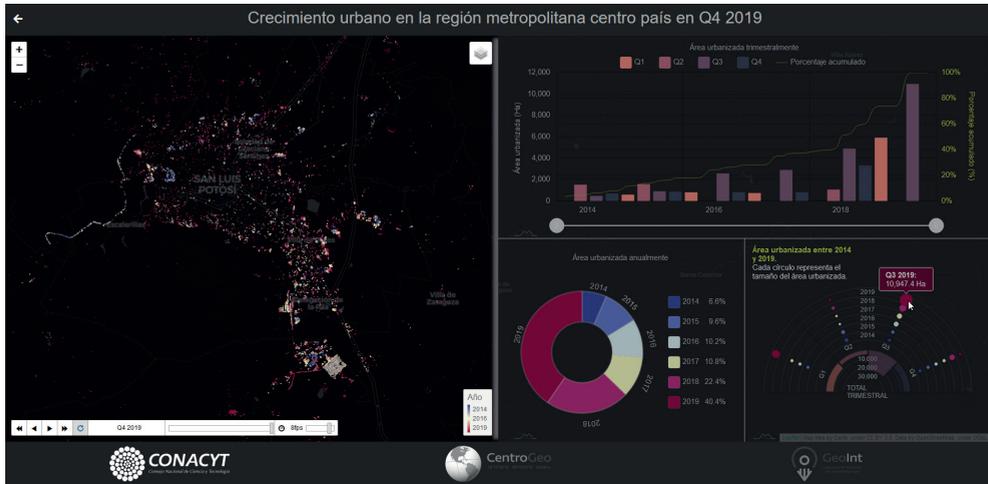


Figura 10. Módulo de exploración de la urbanización en el CMCP

Utilizando las herramientas presentadas en este caso de estudio, desde el análisis de imágenes de sensores remotos hasta la explotación de las capacidades de la analítica geovisual, es relevante aplicar estas disciplinas en el apoyo de los procesos de toma de decisiones. Este caso de estudio abre la puerta a la incorporación de estas técnicas al estudio y delimitación de nuevas regiones urbanas o periurbanas que sufren presión urbana debido a la expansión no necesariamente controlada de otras regiones aledañas. También, deja ver que sería de gran utilidad para determinar nuevas áreas geoestadísticas básicas necesarias y requeridas en los levantamientos censales. Al mismo tiempo, si se incluyeran capas específicas, permitiría identificar regiones que, debido a la evolución urbana que muestran, requieran de cierta infraestructura y equipamiento urbano como agua, electricidad, escuelas, hospitales, etcétera. La ventaja de incorporar este enfoque al estudio del cambio y la expansión urbana, es que ayudaría a hacerlo mucho más rápido y expedito, en comparación a tener que hacerlo únicamente en campo.

Referencias y Bibliografía

- Andrienko, G., Andrienko, N., Jankowski, P., Keim, D., Kraak, M.J., MacEachren, A. y Wrobel, S. (2007). "Geovisual analytics for spatial decision support: Setting the research agenda", en *International Journal of Geographical Information Science*, núm. 21(8), pp. 839–857.
- Andrienko, G., Andrienko, N., Demsar, U., Dransch, D., Dykes, J., Fabrikant, S. I., y Tominski, C. (2010). "Space, time and visual analytics": en *International Journal of Geographical Information Science*, núm. 24(10), pp. 1577–1600.
- Cairo, A. (2020). *How Charts Lie: Getting Smarter about Visual Information*. W. W. Norton & Company, Nueva York, EUA.
- Dykes, J., MacEachren, A. y Kraak, M.-J. (2005). *Exploring Geovisualization*. Elsevier. San Diego, CA, EUA.
- Flowing data. (2019). *Choosing your charts*. Disponible en <<https://flowingdata.com/2019/06/13/process-44/>>.
- Heer, J., Bostock, M. y Ogievetsky, V. (2010). "A Tour through the Visualization Zoo. A survey of powerful visualization techniques, from the obvious to the obscure": en *Queue* 8, 5, pp. 20–30.
- Kandogan, E. y Engelke, U. (2016) "Agile Visual Analytics in Data Science Systems", en *IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*. Sydney, NSW, Australia, pp. 1512-1519.
- Padilla, L.M., Creem-Regehr, S.H., Hegarty, M. y Stefanucci, J.K. (2018). "Decision making with visualizations: a cognitive framework across disciplines", en *Cogn. Research* núm. 3, pp. 29.

- Puszynski, A. (2019). "These are the best JavaScript chart libraries for 2019", en *Free Code Camp*. Disponible en <<https://www.freecodecamp.org/news/these-are-the-best-javascript-chart-libraries-for-2019-29782f5e1dc2/>>.
- Robinson, A. (2017). "Geovisual Analytics", en *Geographic Information Science & Technology Body of Knowledge*.
- Simon, H. A. (1960). *The new science of management decision*. Harper & Brothers, Nueva York, EUA.
- Thomas, J. J. y Cook, K. A. (2005). *Illuminating the Path: The Research and Development Agenda for Visual Analytics*. IEEE PRESS, LOS ALAMITOS, CA, EUA.
- Török Z.G., Török Á. (2019). *Cognitive Data Visualization. A New Field with a Long History*. En Klempous R., Nikodem J., Baranyi P. (eds) *Cognitive Infocommunications, Theory and Applications. Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, vol 13. Springer, Cham.
- Tufte, E. (1983). *The Visual Display of Quantitative Information*. Graphics Press, Cheshire, CT, EUA.
- Ware, C. (2008). *Visual Thinking for Design*. Morgan Kaufmann Series in Interactive Technologies, Elsevier. Burlington, MA, EUA.
- Yamazaki, D., Trigg, M. A. e Ikeshima, D. (2015). "Development of a global ~90m water body map using multi-temporal Landsat images", en *Remote Sensing of Environment*, núm. 171, pp. 337-351.

VII. Servicios de información en web de procesamiento de imágenes satelitales sobre cuerpos de agua y huella urbana

Amílcar Morales Gamas

Mario Ledesma Arreola

Introducción

El desarrollo del internet, como una plataforma común de contacto e interacción entre las actividades que desempeñan los seres humanos, ha detonado la adopción del medio digital, desde el cual se desarrollan una gran cantidad de aplicaciones que utilizan este medio en el que la combinación de datos, analítica y conocimiento necesarios puede incidir hacia mecanismos más efectivos de transferencia de conocimiento y toma de decisiones mejor informadas.

Lo anterior no habría sido posible sin el incremento en las capacidades de cómputo, tanto en los equipos personales, como en las capacidades instaladas en los centros de datos e incluso en la nube de datos en internet, que en los últimos años ha experimentado un crecimiento significativo con respecto a las capacidades de procesamiento de grandes volúmenes de información, impulsados por la aparición de procesadores más veloces con mayor número de núcleos, mayor capacidad de almacenamiento y memoria, lo cual permite realizar tareas de procesamiento intensivas en cómputo en menos tiempo y con mejores algoritmos.

La teledetección satelital se ha convertido en una herramienta fundamental para la observación de la tierra y la identificación de muchos fenómenos físicos que ocurren en la atmósfera y en el territorio a diferentes escalas, con la capacidad de manejar series temporales en las observaciones, el manejo de datos espectrales y radiométricos, además de la posibilidad de aplicarles diferentes tratamientos a la información de las imágenes, para la exploración de diferentes tipos de rasgos.

La disponibilidad de los datos satelitales de baja y media resolución, a escala mundial, son de gran utilidad para realizar estudios regionales y se ha incrementado en los últimos años, incentivado por la posibilidad de descargar la información de manera gratuita y con la capacidad de realizar procesamientos y transformaciones sobre imágenes en cualquier aplicación o ejercicio de detección de rasgos en el territorio.

Los servicios de información en web para procesamiento a demanda de imágenes se han visto favorecidos por la confluencia de las tecnologías mencionadas: adopción de internet, incremento en las capacidades de cómputo, percepción remota y datos abiertos, ya que la integración de estos factores permiten construir aplicaciones intensivas en cómputo, basados en recursos abiertos.

Impacto de las políticas de datos abiertos

La publicación y adopción de los datos abiertos ha ganado terreno en el mundo; México no ha sido la excepción, con la aparición de diversos portales, en diferentes niveles de gobierno, que brindan a la ciudadanía la oportunidad de descargar y utilizar esos datos con diferentes propósitos.

En el espectro de los datos geoespaciales, también se han desarrollado iniciativas nacionales, las cuales han jugado un importante papel en la distribución de información, mayormente en formato vectorial a la ciudadanía. A nivel internacional se ha observado un incremento significativo en la cantidad de recursos disponibles sobre información proveniente de imágenes de satélite, incluso al manejar series de tiempo; algunos de los ejemplos más significativos son los sensores Sentinel de la Agencia Espacial Europea (ESA), Landsat del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) o instrumentos como MODIS y VIIRS de la Administración de Aeronáutica y el Espacio de los Estados Unidos (NASA).

El resultado de esta política de datos abiertos, liderada por las agencias mencionadas, ha detonado en la apertura a los datos generados por diferentes constelaciones de satélites, tanto ópticos como de radar, lo cual ha permitido posicionar a la teledetección como una herramienta imprescindible para la observación de la tierra, que involucra cada vez a un número mayor de disciplinas del conocimiento, especialistas, entes de gobierno y ciudadanos e interesados en todos los niveles de la sociedad.

Resulta imprescindible aprovechar este volumen masivo de datos satelitales, en beneficio de la sociedad, que aporta soluciones digitales para mejorar el bienestar de las familias, así como información útil, novedosa y actualizada dirigida a los tomadores de decisiones y al público en general.

La capacidad de explorar los datos provenientes de los sensores satelitales, junto con el acceso a series temporales que datan de varios años, abre un panorama extenso para realizar actividades de investigación y de-

sarrollo tecnológico novedosas, que permitan el monitoreo, la percepción remota y el procesamiento digital de imágenes integradas, que reflejen la dinámica espacial y temporal de los fenómenos que ocurren en el territorio.

En general, estos datos son proporcionados en formatos abiertos y apegados a estándares, y se combinan con herramientas de código abierto para la instrumentación de servicios de información desarrollados para internet, los cuales favorecen la utilización de estos recursos para realizar analítica, procesamiento, construcción de indicadores e incluso desarrollar herramientas y aplicaciones basadas en la explotación de estos datos, en combinación con otras fuentes de información relacionadas, tendientes a ayudar en la solución de problemáticas complejas que afectan a nuestra sociedad; al ser tecnologías de acceso y cobertura global, es posible desarrollar soluciones locales, al tomar en cuenta las necesidades específicas del entorno inmediato, sin perder de vista las relaciones con el resto del territorio. Esta evolución tecnológica, de datos abiertos y conocimiento, posibilita la generación de conocimiento local, para crear las políticas de desarrollo sostenible en un futuro inmediato.

Servicios de información en web de procesamiento de imágenes

Es un conjunto de funcionalidades integrado en una plataforma tecnológica, cuyo principal rol es proveer servicios en línea de procesamiento de imágenes de radar y ópticas en series espacio temporales a demanda de los usuarios, quienes seleccionan de manera interactiva el área de trabajo, los filtros, los parámetros, las proyecciones y el tipo de formato de los datos ráster a obtener. Posteriormente, los usuarios descargan los archivos resultantes, los cuales se presentan como información georreferenciada, lo cual permite elaborar sus propios mapas e incluso combinarlos con otras capas de información geoespacial, para realizar actividades de diversa índole, como visualización, análisis, investigación, monitoreo o uti-

lizarlas como insumo para la construcción de otros aplicativos.

El modelo de construcción de estos servicios de información representa un avance en términos de procesamiento a demanda, determinado por las necesidades del usuario, quien interactúa con una plataforma que realiza la gestión del trabajo solicitado y efectúa una serie de procesos automatizados, desde el inicio de la actividad hasta la generación del producto final.

La actividad que demanda mayor cantidad de recursos computacionales, principalmente de procesadores y memoria, es la de procesamiento, la cual se realiza en los servidores dedicados de la infraestructura tecnológica, lo cual libera al usuario de la necesidad de utilizar equipos de cómputo de alta gama o de última generación. Asimismo, se evita el uso de aplicaciones especializadas en el procesamiento de esta información e incluso de la programación de muchas actividades.

Actualmente, en la era de la información, uno de los retos más importantes es el aprovechar adecuadamente la gran cantidad de información a la que se tiene acceso; otro reto es que el procesamiento y la gestión de las imágenes satelitales demandan una gran cantidad de recursos de cómputo, de manera que frecuentemente estos recursos son insuficientes para los actores vinculados a esta actividad. En este sentido, esta herramienta brinda la oportunidad de aprovechar eficientemente los datos, al combinar las capacidades de procesamiento para facilitar el proceso de interpretación de las imágenes.

La generación de aplicaciones en internet, así como de servicios de procesamiento de imágenes en web, requiere investigación tecnológica en el desarrollo de técnicas y algoritmos de procesamiento de imágenes, desde la descarga hasta la generación del producto final de cada medición e innovación tecnológica, e implementar un mecanismo automático que enlaza las diferentes componentes funcionales del aplicativo, para mantener el acervo de mediciones actualizado, gestionar el almacenamiento y el con-

trol de los trabajos que se generan a petición de los usuarios.

El acceso universal, libre y gratuito que provee esta plataforma, tendrá un impacto significativo en la apropiación social del conocimiento por parte de ciudadanos, investigadores, instituciones y tomadores de decisiones, quienes pueden realizar actividades de análisis y generación de conocimiento, a partir de los productos que genera el servicio en línea.

Estos servicios de información facilitan el acceso, el procesamiento y la interpretación de la información satelital, para realizar análisis de la información que garantizan resultados confiables, en periodos de tiempo cortos, al asegurar la explotación adecuada de los datos, en beneficio de investigadores y tomadores de decisiones.

Casos de estudio

I. Servicio en línea de preprocesamiento de imágenes y delineación de máscaras binarias de cuerpos de agua continentales en la Cuenca Grijalva



⟨<https://geoint.centrogeo.edu.mx/procesamiento/>⟩.

Es una aplicación en línea, a partir de imágenes de radar de la cuenca Grijalva, que genera servicios de información geoespacial en formato de imágenes preprocesadas y máscaras de cuerpos de agua continentales, con herramientas de selección de filtros con sus respectivos parámetros. La herramienta automatiza el proceso de generación de imágenes a solicitud de los usuarios, es gratuita, está desarrollada con herramientas de software libre y utiliza como insumo principal las imágenes de satélite de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés).

Zona de estudio

La cuenca del río Grijalva tiene su origen en las inmediaciones de Guatemala y Chiapas; cruza por la zona norte de Chiapas y continúa hacia las zonas bajas de Tabasco, para desembocar en el Golfo de México. En términos de caudal hídrico, conjuntamente con la cuenca Usumacinta, constituyen los sistemas hídricos más importantes del territorio mexicano. Ver ilustración 1.

Para esta región, el caso de estudio tiene como objetivo primordial identificar la dinámica del comportamiento de los cuerpos de agua; para conseguir este propósito es necesario contar con información de manera permanente durante todo el año.



Ilustración 1. Delimitación de la zona de estudio de la cuenca Grijalva

Fuente de información

La región de estudio tiene la particularidad de registrar precipitaciones, por encima de la media nacional; durante el periodo estacional de lluvias, el cielo tiene un alto porcentaje de nubosidad, por lo que se decidió utilizar como fuente de datos el sensor Sentinel-1 de la ESA. Este sensor proporciona información, independientemente de las condiciones atmosféricas, ya que al poseer un sensor activo de microondas, penetran las capas de nube, neblina y lluvia, a través de ondas de radio, al adquirir datos de la superficie terrestre sin contratiempos, los cuales son de acceso gratuito y libre.

Sentinel-1 es un sensor tipo SAR (Synthetic Aperture Radar), trabaja con la banda C que opera a una frecuencia de 5.405 GHz., admite el funcionamiento en polarización dual (HH + HV, VV + VH). ESA-Playload realiza tomas cada seis días de la misma región de la tierra, se utilizan imágenes de tipo

GRD (Ground Range Detected), las cuales presentan un ajuste en los valores de reflectancia con respecto al terreno (ESA_GRD, 2021), que propicia mayor uniformidad en el tamaño del píxel recabado (ESA_); de igual manera, tienen resolución espacial media de 10x10m (ESA-GRD Resolutions, ESA, 2021). La vida mínima planeada es de siete años y se espera que opere hasta 12 años (ESA-Mission-Objectives, 2021); adicionalmente cuenta con acervo histórico, desde su lanzamiento en abril de 2014 (ESA-Mission Summary, 2021).

Características y funcionalidades del servicio

El servicio de preprocesamiento de imágenes se caracteriza por ser una aplicación web abierta, contiene una interfaz amigable y funciona a través de un sistema de *tickets*. Inicia su funcionamiento mediante la solicitud de credenciales de acceso, gestiona las solicitudes de acceso y administra la recepción de solicitudes y entrega de productos.

Una vez realizada la solicitud por parte del usuario, la aplicación realiza el preprocesamiento de imágenes de satélite de la cuenca del Grijalva, obtiene máscaras binarias y entrega imágenes como resultado de manera asíncrona.

La aplicación realiza la administración y consulta de trabajos solicitados desde una interfaz de administrador; asimismo, gestiona la creación, el estatus y la consulta de solicitudes personalizadas para cada usuario. Los productos generados por este servicio son: imágenes de radar preprocesadas y la generación de máscaras binarias de cuerpos de agua.

Procedimiento general de uso del servicio

En la plataforma de procesamiento de cuerpos de agua es posible procesar un acervo de imágenes Sentinel-1, mediante el trazo de un cuadrángulo para delimitar un área de interés dentro de la zona de estudio de la cuenca Grijalva. Posteriormente, se debe seleccionar una fecha deseada (dispo-

nibilidad de 2016 a 2020); como siguiente paso, se elegirá aplicar de uno a dos tipos de filtros, así como sus parámetros. Los filtros disponibles para que el usuario realice operaciones de procesamiento son: boxcar, frost, median, gamma map, lee, refined lee, lee sigma e idan.

El servicio de información de procesamiento de imágenes de la cuenca Grijalva implementa dos operaciones disponibles para el usuario: preprocesamiento de imágenes o la creación de una máscara binaria de cuerpos de agua continentales.

El preprocesamiento realiza correcciones de órbita y de ruido; geolocaliza y realiza correcciones, con respecto a la topografía del terreno, y, por último, aplica el o los filtros que el usuario elija. En el caso del procedimiento de creación de máscara binaria de cuerpos de agua continentales, se realiza el preprocesamiento descrito así como un proceso adicional, el cual consiste en identificar, de manera adaptativa, el límite entre los cuerpos de agua y el resto de la superficie terrestre.

Ejercicios de uso

Se presentan dos ejercicios de manejo de esta plataforma, mediante los cuales se muestra el potencial de uso y aplicación del servicio de procesamiento. El primer ejemplo corresponde a la opción de preprocesamiento, en donde el resultado se utiliza para identificar humedales y otros rasgos del territorio en el área de los pantanos de Centla; en el segundo se muestra la creación de la máscara binaria de cuerpos de agua, mediante la cual se identifica la variabilidad de las áreas de agua superficiales en los alrededores de Villahermosa y lo compara con dos fechas.

Aplicación del resultado de un preprocesamiento para identificar humedales

En la ilustración 2 se muestra la interfaz de la plataforma, en donde el usuario realiza la solicitud de preprocesamiento; la operación básica con la

aplicación requiere poca interacción, la cual se resume en la delimitación del área de interés, especificar los filtros a aplicar, así como los parámetros de cada uno, el formato ráster de salida, el sistema de proyección del archivo de salida y, por último, el tipo de producto a recibir. Finalmente, se elige preprocesamiento como el tipo de producto a realizar.

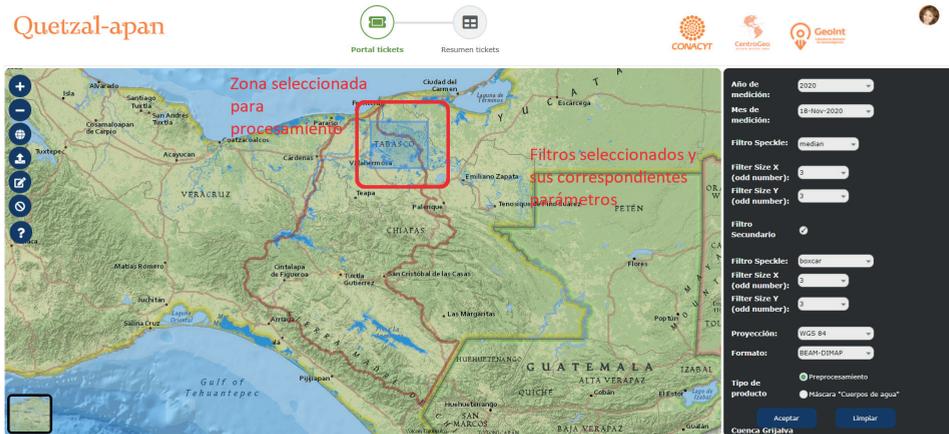


Ilustración 2. Interfaz gráfica del usuario de la aplicación

Una vez terminado el preprocesamiento, la aplicación envía un correo al usuario con un *link* de descarga del producto final, la cual es una imagen comprimida, que se debe de descomprimir y abrir para su visualización y análisis con cualquier software de manejo de información geoespacial que soporte formato ráster.

El resultado del ejercicio anterior es una imagen que permite identificar distintos tipos de características del terreno; en este caso, se obtuvieron tres categorías correspondientes a cuerpos de agua, humedales y suelo, como se muestra en la ilustración 3. La zona que se seleccionó para este ejercicio es la reserva de la biosfera de Pantanos de Centla.

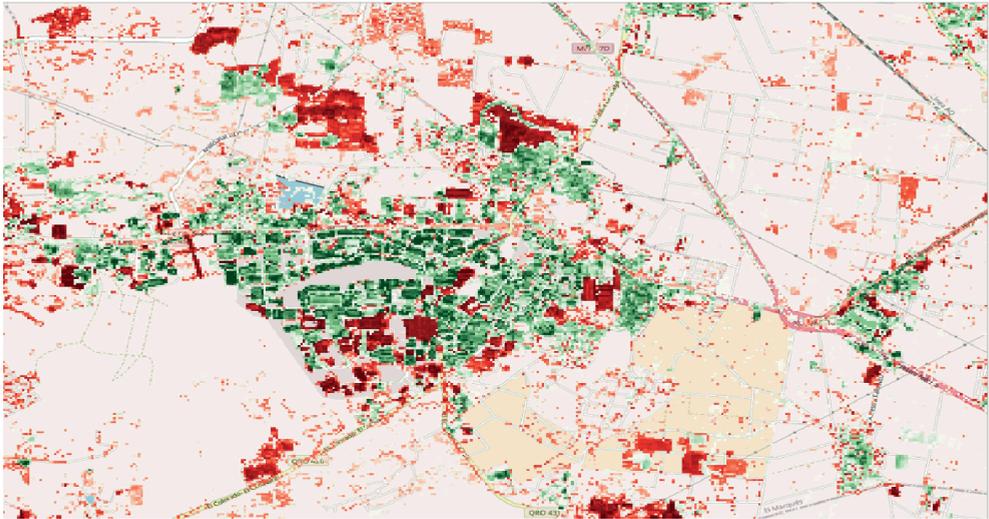


Ilustración 3. El resultado de un preprocesamiento trabajado y clasificado, donde se resalta la diferencia entre varios elementos del paisaje: el tono azul es agua, el café representa el suelo y el rojo corresponde a humedales

Identificación de variabilidad de los cuerpos de agua, entre dos fechas, por medio de la máscara binaria

En este ejercicio se compara la diferencia entre dos periodos de tiempo, para obtener las máscaras binarias de cuerpos de agua en la zona de estudio seleccionada, la cual corresponde a la ciudad de Villahermosa y sus inmediaciones, con el propósito de realizar un análisis sobre los datos resultantes del servicio de procesamiento e identificar la variabilidad temporal de los cuerpos de agua en la zona seleccionada.

A continuación se presenta la pantalla de selección múltiple de la aplicación, la cual permite seleccionar fechas, filtros, tipo de proyección y formato de las imágenes resultantes.

La primera fecha corresponde al 29 de septiembre de 2020, y la segun-

da al 9 de noviembre del mismo año. En ambos casos se eligió como tipo de producto la máscara de “Cuerpos de Agua”. Se eligen los mismos filtros para ambas fechas, para realizar un comparativo consistente.

Una vez terminado el proceso, se descargan los resultados y se realiza el análisis de la información resultante, la cual se clasifica y tematiza para hacer la comparación e identificar la variabilidad del fenómeno entre estas dos fechas.

The image shows a dark-themed user interface for processing parameters. It is divided into two main sections. The left section contains the following controls: 'Año de medición:' with a dropdown set to '2020'; 'Mes de medición:' with a dropdown set to '18-Nov-2020'; 'Filtro Speckle:' with a dropdown set to 'lee'; 'Filter Size X (odd number):' with a dropdown set to '3'; 'Filter Size Y (odd number):' with a dropdown set to '3'; 'Estimate Equivalent Number of Looks Number of Looks' with a checked checkbox; and 'Number of Looks:' with a slider set to '1.0'. The right section contains: 'Filtro Secundario' with a checked checkbox; 'Filtro Speckle:' with a dropdown set to 'median'; 'Filter Size X (odd number):' with a dropdown set to '3'; 'Filter Size Y (odd number):' with a dropdown set to '3'; 'Proyección:' with a dropdown set to 'WGS 84'; 'Formato:' with a dropdown set to 'BEAM-DIMAP'; 'Tipo de producto' with two radio buttons, 'Preprocesamiento' (selected) and 'Máscara "Cuerpos de agua"'; and two buttons, 'Aceptar' and 'Limpiar'. At the bottom left of the right section, there is a map outline of 'Cuenca Grijalva'.

Ilustración 4. Interfaz de parámetros de procesamiento

En la ilustración 5 se visualiza la variabilidad de los cuerpos de agua, resultado del análisis realizado durante el ejercicio anterior. Los polígonos en color azul claro corresponden a los datos del mes de septiembre de 2020; y los de color azul oscuro al mes de noviembre del mismo año. La diferencia observada en el resultado se explica, porque durante este periodo se presentaron lluvias atípicas, lo que creó una cantidad importante de áreas con inundaciones, que de otra manera no hubieran ocurrido.

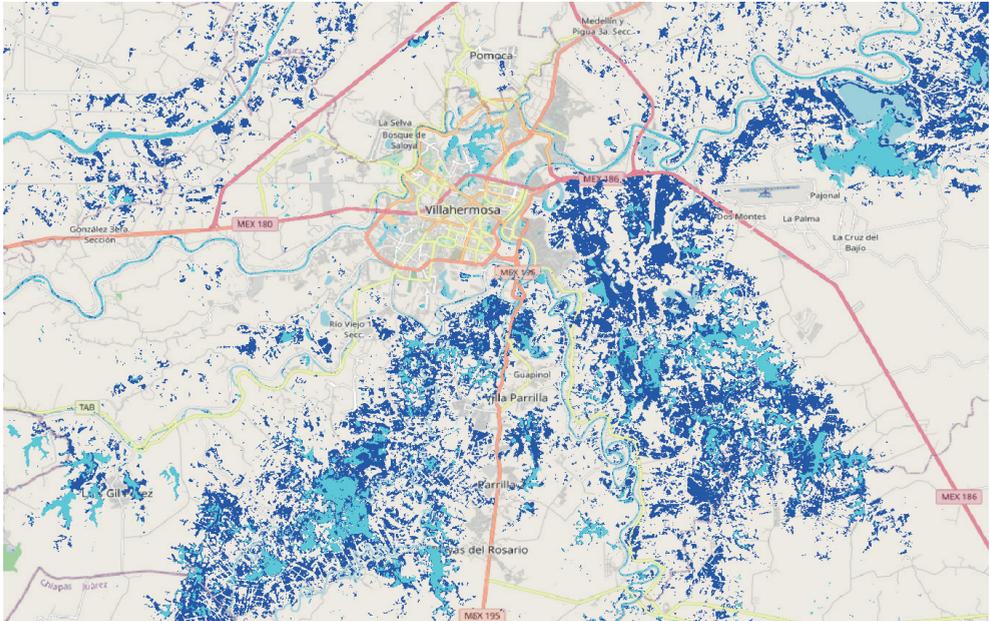


Ilustración 5. Variabilidad de los cuerpos de agua, al usar dos imágenes, resultado del procesamiento de máscara binaria de cuerpos de agua. El azul oscuro corresponde a noviembre, mientras que el azul claro corresponde al mes de septiembre.

II. Servicio en línea de procesamiento de imágenes Landsat para detección de zonas urbanas en el corredor metropolitano centro-país de México (CMCP)



<https://geoint.centrogeo.edu.mx/procesamiento/>

Es una plataforma tecnológica en internet que provee el servicio en línea de procesamiento de imágenes ópticas, para detección de zonas urbanas en la región centro-país, a demanda de los usuarios. Esta herramienta automatiza el proceso de generación de imágenes ópticas, es gratuita y abierta, está desarrollada con herramientas de software libre y utiliza como insumo principal las imágenes del satélite Landsat-8, operado por la NASA y por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés).

Zona de estudio

El área de estudio se acotó al corredor metropolitano centro-país, que abarca algunas ciudades de las entidades de Querétaro, Guanajuato, San Luis Potosí, Aguascalientes, Jalisco y Zacatecas. El propósito fue analizar la dinámica del crecimiento urbano en observaciones periódicas trimestrales, del 2014 al 2020.

Fuente de información

Una herramienta que nos proporciona información histórica para el estudio de este fenómeno son los satélites de tipo óptico, que permiten clasificar distintos tipos de cobertura terrestre (Smith *et al.*, 2003). Una manera

de poder asegurar consistencia en la identificación de la dinámica de crecimiento urbano es mediante el uso de una sola fuente de información, en este caso Landsat 8 (Rees et al., 2003).

El sensor Landsat 8 es operado por el USGS, cuenta con 11 bandas (cuatro visibles, dos infrarrojos cercanos, una pancromática, dos infrarrojos de onda corta y dos térmicas TIR), con un periodo de revisita de cada 16 días. La resolución espacial es de 15 metros, para la banda pancromática, 100 para las térmicas y 30 para las visibles e infrarrojas (USGS_specs).

Este sensor cuenta con dos ventajas importantes, una es de acceso libre y otra es la cantidad de escenas disponibles en un trimestre. Adicionalmente, se tiene disponibilidad de Landsat 8 desde marzo del 2013 (nivel L1 OLI/TIRS C2) y puede recurrirse al acervo histórico a partir del Landsat 5 desde finales del 2011 (earthexplorer, USGS, 2021).

Características y funcionalidades del servicio

La plataforma de servicio en línea de procesamiento de imágenes Landsat es neutra de navegadores y sistemas operativos, abierta y gratuita, y funciona a través de un sistema de *tickets*. Inicia su funcionamiento a través de la solicitud de credenciales de acceso mediante una interfaz amigable, en donde el usuario debe darse de alta para interactuar.

La aplicación realiza validaciones de usuario, gestiona las interacciones y solicitudes del usuario; posteriormente, realiza el procesamiento de imágenes ópticas y las solicitudes de procesamiento se convierten en un sistema de trabajos. Los resultados del procesamiento se entregan en formato ráster.

Se gestiona el proceso de inicio-procesamiento-finalización de cada trabajo y genera notificaciones vía correo electrónico para informar al usuario sobre el resultado de cada tarea. Administra y consulta trabajos realizados por cada usuario desde la interfaz de administrador. Realiza la gestión

de inicio, estatus y consulta de trabajos de forma personalizada para cada usuario.

Procedimiento general de uso del servicio

El usuario debe elegir un área de interés dentro de la zona de estudio (en este caso el CMCP), mediante la herramienta de dibujo del servicio en línea; una vez elegida el área de estudio, se procede a seleccionar los parámetros de procesamiento:

Trimestre a procesar

Este proceso realiza la selección de las imágenes correspondientes al periodo en cuestión, filtra las de menor cantidad de nubes y realiza la integración de un solo mosaico con las mejores escenas disponibles.

Porcentaje de urbanización

Se realiza mediante una serie de procesos que permiten identificar y diferenciar distintos tipos de características en el terreno; en concreto, diferencian entre lo que es medio urbano y lo que no es.

Radianza

Aquí lo que se diferencia es la cantidad de luz emitida en las noches, principalmente a factores antropogénicos, como el medio construido; es una medida de la cantidad de luz que puede emitirse en la superficie terrestre, en este caso las zonas urbanizadas.

Cerradura espacial

Este procedimiento consiste en homogeneizar la información en un contexto cercano de cada pixel, trata de armonizar o hacer más homogéneos los datos.

Ejercicio de uso

A continuación se presenta un ejercicio de identificación de la dinámica de desarrollo urbano en la zona de la ciudad de Querétaro; en específico, en la zona conocida como El Marqués.

Procesamiento de imágenes en la plataforma de monitoreo de ciudades

Para este ejercicio se eligieron dos periodos en la ciudad de Querétaro: el primero correspondiente al primer trimestre de 2014 y el segundo al cuarto trimestre de 2020; cada uno de los periodos seleccionados se procesan con los mismos parámetros, para asegurar la homogeneidad en los resultados, los cuales se refieren al porcentaje de suelo urbano y la radianza luminosa; es decir, la cantidad de luz nocturna y el filtro de cerradura (homogeneización del porcentaje de suelo urbano).

Una vez concluido el procesamiento de los dos periodos en la plataforma, se descargan las capas correspondientes, se descomprimen y, mediante el uso de cualquier software de manejo de información geoespacial, se procede a comparar la variabilidad entre estas capas. Para que la variabilidad sea comparable, se emplea el mismo número de clases y de umbrales de clase en cada capa; para visualizar la diferencia entre ambas mediciones, se eligen dos rampas de tonos: una rampa verde, que corresponde a la medición del primer trimestre de 2014, y una de color rojo, para

el cuarto trimestre de 2020.

Las rampas de colores, por intensidad o tono, inician en un tono suave del color y paulatinamente suben el tono o la intensidad del color, hasta llegar a un color intenso. La ilustración 6 muestra la rampa de color en tonos de rojo.



Ilustración 6. Rampa de tonos. A mayor intensidad del color, se incrementa el porcentaje de medio construido.

En las imágenes resultantes, la intensidad de la rampa de colores de claro a oscuro representa el incremento de los porcentajes de urbanización, los claros representan bajo porcentaje de urbanización y los más intensos el mayor porcentaje de urbanización en el terreno; mientras más intenso el tono del color, mayor porcentaje de urbanización.

Como resultado del análisis de la huella urbana entre los dos periodos de tiempo utilizados, se observa un incremento en la extensión de la urbanización en la zona de estudio; además de la diferencia en intensidad de los tonos de color entre las imágenes resultantes, es indicativo directo de que hay mayor porcentaje urbano en esos pixeles, lo que quiere decir que hay mayor cantidad de medio construido en ese pixel de lo que había en el periodo anterior. Esta variabilidad se aprecia en la ilustración 7.

Las capas se clasifican con los mismos criterios y se contrastan al compararse la variabilidad en extensión y densidad del medio construido.

Propuesta de un modelo para la construcción de servicios de información en web de procesamiento de imágenes satelitales

Durante el análisis de los elementos constructivos de los servicios de información, para el procesamiento de imágenes satelitales desarrollados para los dos casos de estudio, se encuentra una gran cantidad de componentes, cuyo funcionamiento es muy similar, lo que da pauta para proponer un modelo de construcción de otros servicios de procesamiento de imágenes, dedicados para la detección de muchos otros rasgos en la atmósfera y en el territorio así como su dinámica espacio temporal. Algunos ejemplos de otras aplicaciones pueden ser la detección de incendios o de partículas contaminantes, la vegetación, la deforestación, etcétera.

Aunque el tratamiento de imágenes de radar que se ha efectuado con datos del satélite Sentinel-1, y el correspondiente a imágenes ópticas con Landsat-8, son completamente diferentes por la naturaleza de la información, el procesamiento que requieren y la algorítmica que se aplica, la cual es función directa del tipo de rasgo del territorio que se detecta: los cuerpos de agua continentales en la cuenca Grijalva y la huella urbana en la zona-centro del país. Es importante señalar que estas operaciones se encuentran insertas dentro de los módulos de procesamiento en ambas plataformas y producen un resultado similar. En los módulos de procesamiento se aplican correcciones, filtros, parámetros y formatos a demanda de los trabajos generados por los usuarios de las aplicaciones, y se da seguimiento automático a los trabajos hasta que se termina la actividad, por lo que el recurso está disponible para descarga.

Dentro de las características que se podrían replicar en la construcción de otras plataformas de este tipo, es que sean abiertos y neutrales, en cuanto al sistema operativo y navegador, así como el módulo de gestión de usuarios, el cual se encarga de ejecutar las operaciones personalizadas que realiza cada usuario en el sitio y realiza notificaciones vía correo electrónico para informar cuando se ha completado una solicitud; el mó-

dulo de administración del sitio realiza un monitoreo de la actividad de los usuarios, de los trabajos por realizar y de los terminados, la gestión de los usuarios de la plataforma, así como del módulo de control interno que es responsable de la organización y coordinación de las actividades entre el sistema operativo, la base de datos y el servidor dedicado al procesamiento de la información geoespacial.

También se cuenta con la capacidad de realizar adiciones en funcionalidad, desarrollo de nuevos módulos, ampliación de opciones de procesamiento e incluso la creación de nuevas plataformas de procesamiento de imágenes.

La experiencia acumulada en el desarrollo de estos módulos representa una base de conocimiento importante en desarrollo tecnológico y sustentan la posibilidad de construir otros sitios similares, con el propósito de socializar el uso y procesamiento de imágenes de satélite para tomadores de decisiones, investigadores y el público en general, con el fin de aprovechar las capacidades de análisis espacial y procesamiento de imágenes que brindan los servicios de información en web.

Referencias

- Booth, David (2004). *Web Services Architecture - W3C Working Group Note*, MIT, ERCIM, KEIO.
- Erl, Thomas (2016). *Service-Oriented Architecture: Analysis & Design for Services and Microservices*.
- earthexplorer_usgs. Disponible en <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>.
- ESA_wiki. Disponible en <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-1-sar-wiki>>.
- ESA-Mission Summary. Disponible en <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview/mission-summary>>.
- ESA-Mission-Objectives. Disponible en <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/mission-objectives>>.
- ESA-GRD RESOLUTIONS, ESA, 2021. DISPONIBLE EN <[HTTPS://SENTINEL.ESA.INT/WEB/SENTINEL/TECHNICAL-GUIDES/SENTINEL-1-SAR/PRODUCTS-ALGORITHMS/LEVEL-1-ALGORITHMS/GROUND-RANGE-DETECTED/IW](https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/ground-range-detected/iw)>.
- ESA_GRD; ESA, 2021. Disponible en <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/ground-range-detected>>. ESA-Playload. Disponible en <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>>.
- Inegi-Landsat. Disponible en <<https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/>>.
- Ferris, C. y Joel Farrell (2003). "What Are Web Services?", en *Communications of the ACM*, núm. 6, pp. 31.
- Fletcher K. (2012). "ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services", ESA-SP-1322/1, Publisher ESA Communications.
- USGS_specs. Disponible en <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites?-qt-news_science_products=0#qt-news_science_products>.

- Loveland, Thomas R. y James R. Irons (2016). "Landsat 8: The plans, the reality, and the legacy", en *Remote Sensing of Environment*. Volumen 185, pp. 1-6.
- Smith, J.H., Stehman, S.V., Wickham, J.D. y Yang, L. (2003). "Effects of landscape characteristics on land-cover class accuracy", en *Remote Sensing of Environment*, núm 84, pp. 342-49.
- Pal, Kamalendu (2018). "Ontology-Based Web Service Architecture for Retail Supply Chain Management", en *Procedia Computer Science*, volumen 130, pp. 985-990
- Rees, W.G., Williams, M. y Vitebsky, P. (2003), "Mapping land cover change in a reindeer, herding area of the Russian Arctic using Landsat TM and ETMp imagery and indigenous knowledge", en *Remote Sensing of Environment*, núm. 85, pp. 441W3C-webService. Disponible en
- <https://lists.w3.org/Archives/Public/www-ws-arch/2002Sep/att-0212/HKsContribution.triangle.htm>.
- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/ground-range-detected>.

Autores

Alejandra A. López Caloca

Es doctora en Tratamiento digital de imágenes y señales, por la UNAM, en 2007. Actualmente es investigadora titular y docente en el posgrado de Ciencias de la información Geoespacial , y docente en el Programa de especialidad en geomática, en CentroGeo. Trabaja en líneas de investigación básica y aplicada, relacionadas con fusión de datos e imágenes; sistemas dinámicos; análisis espacio-temporal; detección de cambios; clasificadores digitales y percepción remota.

Dr. Felipe Omar Tapia Silva

Profesor-investigador titular. Laboratorio de Geomática Aplicada a Recursos Naturales. Departamento de Hidrobiología, División Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa.

José Luis Silván Cárdenas

Doctor en Ciencias de Información Geográfica por la Universidad de Texas. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2012. Es coautor de más de 60 publicaciones en temas de percepción remota, procesamiento digital de imágenes y modelación geoespacial de procesos.

Juan Carlos Valdiviezo Navarro

Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias en la especialidad de Óptica, por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 2012. Actualmente es Investigador Catedrático de CONACYT adscrito a CentoGeo. Sus líneas de investigación son: procesamiento y análisis de imágenes, aplicaciones de percepción remota y reconocimiento de patrones

Adán Salazar Garibay

Doctor en Informática en Tiempo Real, Robótica y Automatización de la École des Mines de Paris en el Centro de Matemáticas Aplicadas (CMA) y el INRIA de Sophia Antipolis, Francia. Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica y Maestría en Ingeniería Eléctrica por parte de la Universidad de Guanajuato. Actualmente desarrolla investigación en el área de Percepción Remota (PR) con imágenes satelitales provenientes del proyecto Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), SPOT y Landsat.

Elvia Martínez Viveros

Ph. D. en Social Systems Sciences, University of Pennsylvania; M.Sc. en Investigación de Operaciones, London School of Economics and Political Sciences; y Actuario, Facultad de Ciencias UNAM.

Es Profesora Investigadora Titular C en el CentroGeo desde 2003. Actualmente es Coordinadora académica y es docente en la Maestría en Planeación Espacial, donde coordina y desarrolla proyectos de investigación y vinculación.

Yezmín Calvillo Saldaña

Maestría en Geomática por el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, 2013

Técnico Titular B en CentroGeo desde 2013

Área de especialización: Estudios Territoriales y Urbanos

⟨ycalvillo@centrogeo.edu.mx⟩.

José Luis López Gonzaga

Especialidad en Geomática por el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, 2006

Técnico Titular C en CentroGeo desde 2010

Área de especialización: Estudios Territoriales y Urbanos

⟨jlopez@centrogeo.edu.mx⟩.

Diego Quintino Silva

Maestría en Planeación Espacial por el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, 2020

Área de especialización: Geoprocesamiento y estudios territoriales

⟨dquintino@centrogeo.edu.mx⟩.

Amilcar Morales Gamas

Profesor investigador en el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Maestro en Ciencias Computacionales, Ingeniero Industrial en Electrónica. Profesor de la especialidad en Geomática en CentroGeo, especialista en desarrollo tecnológico en GeoWeb, sistemas geoespaciales de seguridad pública, catastro, detección y monitoreo espacio temporal con sensores remotos, arquitecturas de servidores geoespaciales, integración de aplicaciones geoespaciales en Internet, diseño implementación y administración de bases de datos geoespaciales

Mario Ledesma Arreola

Especialista en Geomática, con amplia experiencia en proyectos relacionados con información geoespacial, transferencia de conocimientos. análisis geoespacial, creación de bases de datos geoespaciales, infraestructuras y sistemas de información y plataformas en web; sus líneas de investigación son: bases de datos geoespaciales, infraestructuras de datos geoespaciales, aplicaciones geoespaciales móviles, Geoweb.

