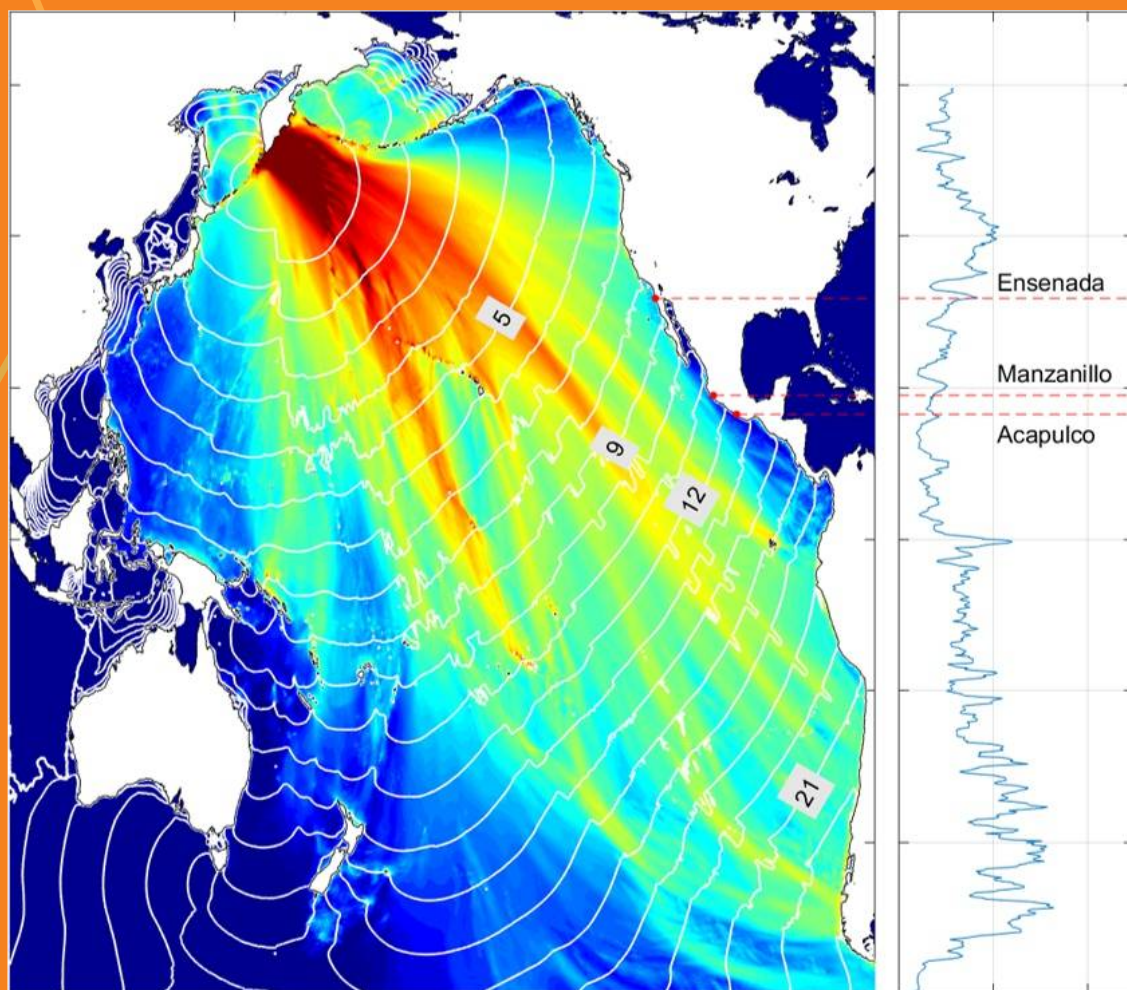


geos



GEOS se publica dos veces al año patrocinada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y editada conjuntamente por la UGM y el CICESE.

UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C.
Mesa Directiva 2024-2025

Dr. José Luis Macías Vázquez
Instituto de Geofísica, UNAM
Presidente

Dr. Américo González Esparza
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidente

Dr. Mario González Escobar
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Tesorero

Dr. Antonio Pola Villaseñor
ENES Morelia
Secretario General

Dra. Lucía Capra Pedol
Centro de Geociencias, UNAM
Secretaria de Investigación

Dra. Avith Mendoza Ponce
IIGERCC, UNICACH
Secretaria de Difusión

Dr. Óscar Castro Artola
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretario de Educación

Dra. Elva Escobar
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM
Secretaria de Vinculación

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Avith Mendoza Ponce
avith.mendoza@unicach.mx
UNICACH

Comité Editorial

Harald Böhnelt, UNAM
Noel Carbajal Pérez, IPICT
Carlos Flores Luna, CICESE
Efraín Gómez Arias, CICESE
Felipe Escalona, UAZ

Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez
Angel Daniel Peralta Castro
Sergio Manuel Arregui Ojeda
María Cristina Álvarez Astorga

GEOS, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana (UGM), se edita conjuntamente por la UGM y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) bajo el patrocinio del CICESE. Se publica dos veces al año, contiene artículos originales, artículos de divulgación, notas cortas, aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM. Las instrucciones para los autores se encuentran al final de cada número y en <http://www.ugm.org.mx/geos.html>

GEOS (ISSN 0186-1891) se edita en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

Dirigir toda correspondencia a:
Editorial GEOS
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
ldelgado@cicese.mx
Tel. en Ensenada B.C.: (646)175-0500, Ext. 26060

Título: GEOS

Periodicidad: semestral

ISSN: 0186-1891

Editado en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carret. Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

EDITORIAL

- El precario equilibrio climático** ... 213

INVESTIGACIÓN

- Análisis de la tectónica y sedimentación en cuencas transtensionales del límite entre las placas pacífico y norteamérica: Estudio sísmico de reflexión en el norte del Golfo de California** ... 215

Mario González-Escobar, Cristian Alejandro Gallegos-Castillo, Sergio Manuel Arregui-Ojeda, Edgar Agustín Mastache-Román, Carlos Simón Reyes-Martínez

DIVULGACIÓN

- ¡Hola! ¿Tú que cuencas? Yo, las compartidas entre México y EEUU: la XXVII Olimpiada Estatal de Ciencias de la Tierra** ... 233

Enrique Gómez Treviño

REPORTE

- Comparación del balance radiativo suelo-atmósfera en un sitio urbano y uno rural de la ciudad de Puebla** ... 269

J. Adrián Álvarez Pérez, Raquel Elisa Hernández Parra, Adalberto Tejeda Martínez, Gabriel Balderas Romero, Juan Pablo Báez Vázquez

- Observaciones del Tsunami de Kamchatka del 29 de julio, 2025, en la costa occidental de México** ... 283

Modesto Ortiz Figueroa, Laura G. Ortiz Huerta, Gabriel Echeagaray Collantes, Norma Angelica Ramírez Mondragón

NOTA

- El reloj de Sol del majestuoso convento de Santo Domingo de Guzmán, Oaxaca y la ciencia novohispana en el siglo XVII** ... 289

J. O. Campos-Enríquez, J. L. Noria-Sánchez

- Plataforma virtual para evaluar la vulnerabilidad sísmica: ciencia, tecnología e innovación al servicio del Perú** ... 295

Leandro Rodríguez Valverde

Continuación

CUENTO

- Corazón de cenote** ... 307
Claudia Jocelyn Ramírez Ramírez

COMUNICACIONES

- POLITICA EDITORIAL** ... 311

El precario equilibrio climático

Un documento de la última semana de 2025 resalta algunos avances a nivel mundial en los ámbitos natural y social. Sobre el ambiente natural destacan la tasa de crecimiento de la capacidad de energía renovable y la recuperación forestal. En ese trabajo se informa que actualmente la energía eólica, solar y otras fuentes renovables, superaron al carbón como fuente de electricidad a nivel mundial. También se menciona que en el Reino Unido el carbón, como fuente de energía, casi ha desaparecido y que la energía eólica alcanza hasta un tercio de la demanda. También se hace la observación de que existen sectores, como el alimentario, donde los combustibles fósiles muestran una tendencia alcista, mientras que en el transporte y en la energía eléctrica hay intentos sostenidos de “descarbonización”, aunque todavía son insuficientes. La ONU reporta que al conjunto de la cadena alimentaria agroindustrial se debe casi el 40 por ciento de los gases de efecto invernadero a nivel global, principalmente por la deforestación y cambio de suelo, especialmente para la ganadería y monocultivos. Además, la misma cadena está íntimamente ligada a la industria petroquímica a través de los plásticos y la producción de fertilizantes nitrogenados sintéticos, a la que habría que agregar otros derivados como los plaguicidas, herbicidas, etcétera.

En el tema forestal, es conocida la función de los bosques que, junto con los océanos y la tierra, tienen una gran capacidad de absorción de carbono (cerca del 50 por ciento). De acuerdo con la información de la ONU, las tasas anuales de deforestación global han disminuido hasta cerca del 40 por ciento en los últimos 10 años y, una considerable proporción de los bosques, está bajo planes de gestión a largo plazo para lograr su recuperación, aunque aún están bajo presión de las industrias agrícola, maderera y pecuaria. Desafortunadamente, en estos tiempos, las reglamentaciones orientadas hacia la conservación y la protección al medio ambiente están muy amenazadas, como lo demuestra la disminución en las regulaciones de la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency) de E.U.A., o el muy reciente retiro de los principales empresarios brasileños de la “Moratoria de la Soya”, después de casi 20 años, a través de la cual se busca detener la pérdida de la selva de la Amazonia.

Es de la mayor importancia insistir ante las autoridades de todos los niveles, desde las plataformas académicas y organizaciones civiles, en la necesidad de atender las recomendaciones dictadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) con el fin de tomar medidas legales efectivas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Esto se debe a que, hasta el momento, los pronósticos de las instancias de expertos se han cumplido, pues las áreas con anomalías térmicas son cada vez más extensas. Los mapas de anomalías extremas muestran que el norte de México, norte y sur de Estados Unidos, gran parte de Europa y norte de África (máximos

en la zona del Mediterráneo), así como amplias zonas de Sudamérica y la Antártida, son regiones donde el aumento de temperatura ha estado acompañado de calores extremos y lluvias intensas. México, en particular, ha registrado los niveles más bajos en sus sistemas de captación de agua de lluvia, los cuales fueron “salvados” por lluvias extremas asociadas con tormentas tropicales. Además, las inundaciones producidas por estos eventos evidenciaron la poca cultura en la población que, al deshacerse de su basura, tapa los sistemas de drenaje facilitando las inundaciones. Esto no solo demuestra la falta de una conciencia ambiental, también demuestra el pésimo manejo de la basura en México, sobre todo de plásticos que, no sobra decirlo, su producción sigue fomentándose por las transnacionales petroleras.

Los problemas derivados del cambio climático son múltiples y posiblemente, uno de los más desatendidos, es el del aumento del nivel del mar debido al deshielo de los casquetes polares y los glaciares. Además de la afectación de la flora y la fauna costera y marina de aguas poco profundas, así como la contaminación de acuíferos, entre otros menos evidentes, millones de personas y bienes materiales están amenazados por inundaciones. Este ha sido un tema de preocupación desde hace tiempo pero, su aceleración en los últimos años y el deshielo, que ha alcanzado un punto “irreversible”, define a este fenómeno complejo como una de las grandes amenazas para la sociedad. Varios países están invirtiendo grandes cantidades de recursos en investigación científica y obras civiles para adaptarse al Cambio Climático, con perspectivas dudosas por tratarse de un fenómeno global. Ante esta perspectiva, cabe preguntarse si a lo largo de los más de 11 mil kilómetros de costa en México se han logrado avances en el estudio de este inminente evento.

Análisis de la Tectónica y Sedimentación en Cuencas Transtensionales del Límite entre las Placas Pacífico y Norteamérica: Estudio Sísmico de Reflexión en el Norte del Golfo de California

Mario González-Escobar*, Cristian Alejandro Gallegos-Castillo, Sergio Manuel Arregui-Ojeda y Edgar Agustín Mastache-Román, Carlos Simón Reyes Martínez
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
*e-mail: mgonzale@cicese.mx

Resumen

El Golfo de California representa un entorno natural ideal para estudiar y comprender varios procesos geológicos responsables de la transformación y formación de nuestro planeta. Perfiles sísmicos de reflexión en dos dimensiones revelan un espesor de sedimentos de 7 a más de 10 kilómetros, provenientes principalmente del Río Colorado. Estos han rellenado cuencas como Wagner, Consag y Delfín, delimitadas por fallas activas. La Cuenca Wagner, formada por dos subcuencas asimétricas, está influenciada por una falla de bajo ángulo al norte y fallas oblicuas al sur, convergiendo en la Falla Wagner, que conecta con la falla transformante Cerro Prieto en el delta del Río Colorado. Las cuencas del norte del golfo destacan por su geometría compleja, están caracterizadas por subcuencas extensionales con dirección norte-sur vinculadas por fallas transformantes, como el Canal de Ballenas en el sur y Cerro Prieto en el norte. Fallas activas al oeste de la Falla Tepoca marcan el límite oriental del rift, mientras que en zonas como la Isla Tiburón, hay cuencas marginales con basamento acústico frágil, indicando corteza continental bajo gruesos sedimentos. Cuencas abandonadas, como Tepoca y Peñasco, separadas por estructuras elevadas tipo *horst*, completan este dinámico paisaje tectónico. Los esfuerzos tectónicos transversales generan amplias zonas de deformación a lo largo de la región. En conjunto, estos procesos brindan una visión crucial para comprender la dinámica de la tectónica de placas y la evolución geológica de la región.

Palabras clave: Golfo de California, sísmica de reflexión, cuencas sedimentarias, tectónica.

The Gulf of California is a unique natural environment, ideal for studying and understanding the geological processes responsible for the transformation and formation of our planet. In its northern sector, tectonic and sedimentary features provide key insights into its evolution. Two-dimensional reflection seismic profiles reveal a sedimentary thickness of 7 to more than 10 kilometers, primarily composed of sediments from the Colorado River. These have filled basins such as Wagner, Consag, and Delfín, bounded by active faults. The Wagner Basin, consisting of two asymmetrical sub-basins, is influenced by a low-angle fault in the north and oblique faults in the south, converging at the Wagner Fault, which connects to the Cerro Prieto transform fault. The northern Gulf basins stand out for their complex geometry, with north-south extensional sub-basins linked by transform faults, such as the Ballenas Channel and Cerro Prieto. Transverse tectonic stresses generate distributed deformations throughout the region. Active faults west of the Tepoca Fault mark the eastern boundary of the rift. At the same time, areas like Tiburón Island contain marginal basins with weak acoustic basement, indicating continental crust beneath thick sediment deposits. Abandoned basins, such as Tepoca and Peñasco, separated by elevated structures, complete this dynamic tectonic landscape.

Keywords: Gulf of California, reflection seismic, sedimentary basins, tectonics

Introducción

El Golfo de California y la Depresión Salton (Figura 1) ofrecen un entorno ideal para estudiar el desarrollo de cuencas a lo largo de un límite de placas oblicuo-divergente (Dorsey y Umhoefer, 2012). Durante el Cenozoico Tardío, se formaron cuencas transtensionales en el límite de las placas Pacífico y Norteamérica, con un cinturón a lo largo del golfo de 50-60 km de ancho que cambia, de cuencas de expansión de tipo oceánica en el sur, con fallas transformantes perpendiculares, a cuencas oblicuas en el norte, las cuales contienen una potente sucesión de sedimentos sin desarrollo de corteza de tipo oceánica. Las cuencas marginales en los flancos de la depresión del golfo incluyen cuencas de supradesprendimiento, de terminación de fallas transtensionales y de *rift* ortogonales, siendo estas cuencas: East Mesa, Altar, Adair-Tepoca, Tiburón y Yaqui, que se muestran en la Figura 1.

En la región norte del Golfo de California, el límite de placas se deforma activamente a una velocidad de 51 mm/año (Plattner *et al.*, 2007) y presenta cuencas transtensionales formadas por el movimiento oblicuo entre las placas Pacífico y Norteamérica. Algunas cuencas están inactivas y otras son activas tectónicamente (Figura 1). En el sur del Golfo de California, el límite de placas se caracteriza por una expansión de tipo oceánica conectada por fallas transformantes, mientras que en el norte y el Delta del Colorado, dicho límite incluye la compleja Depresión Salton, una zona de transición entre el sistema transformante continental de San Andrés y el sistema de fallas y dorsales oceánicas al sur (Lomnitz *et al.*, 1970; Axen y Fletcher, 1998; Suárez-Vidal *et al.*, 2008; Wei *et al.*, 2011; Dorsey y Umhoefer, 2012; González-Escobar *et al.*, 2014, entre otros). Es notable a todo lo largo del Golfo de California la intensa actividad sísmica (Figura 2).

En la región norte del golfo se cuenta con datos de sísmica reflexión que, en un principio, fueron propiedad de Petróleos Mexicanos (PEMEX), y posteriormente fueron facilitados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos, los cuales proporcionan información clave sobre las estructuras y características físicas del subsuelo. Esta información es esencial para comprender la evolución tectónica de las cuencas sedimentarias y su entorno. En ese sentido, los datos de sísmica de reflexión en dos dimensiones (2D) son una herramienta valiosa para cartografiar y caracterizar las estructuras y procesos tectónicos a los que se asocian.

Las cuencas del Golfo de California han sido caracterizadas morfológicamente, principalmente mediante estudios geofísicos, aunque aún se carece de detalles en algunos aspectos, como el de estudios sobre tomografías sísmicas o métodos geofísicos como el magnetotelúrico, que nos permitan visualizar en 3D a profundidades mayores a 5 km con más detalle (Persaud *et al.*, 2003; Sutherland, 2012; Aragón-Areola y Martín-Barajas, 2007; Lizarralde *et al.*, 2007; González-Escobar *et al.*, 2009; Mar-Hernández *et al.*, 2012, Martín-Barajas *et al.*, 2020). La distribución de las cuencas transtensionales se debe al movimiento oblicuo entre las placas Pacífico y Norteamérica. Durante los últimos 8-12 millones de años, la corteza ha experimentado una variedad de estilos de deformación que varía entre extensional y transtensional e influyen la geometría, subsidencia y patrones de relleno de las cuencas. Este trabajo revisa aspectos de las cuencas sedimentarias del norte del Golfo de California, analizando la geometría de sus estructuras, así como los rasgos tectónicos de su entorno.

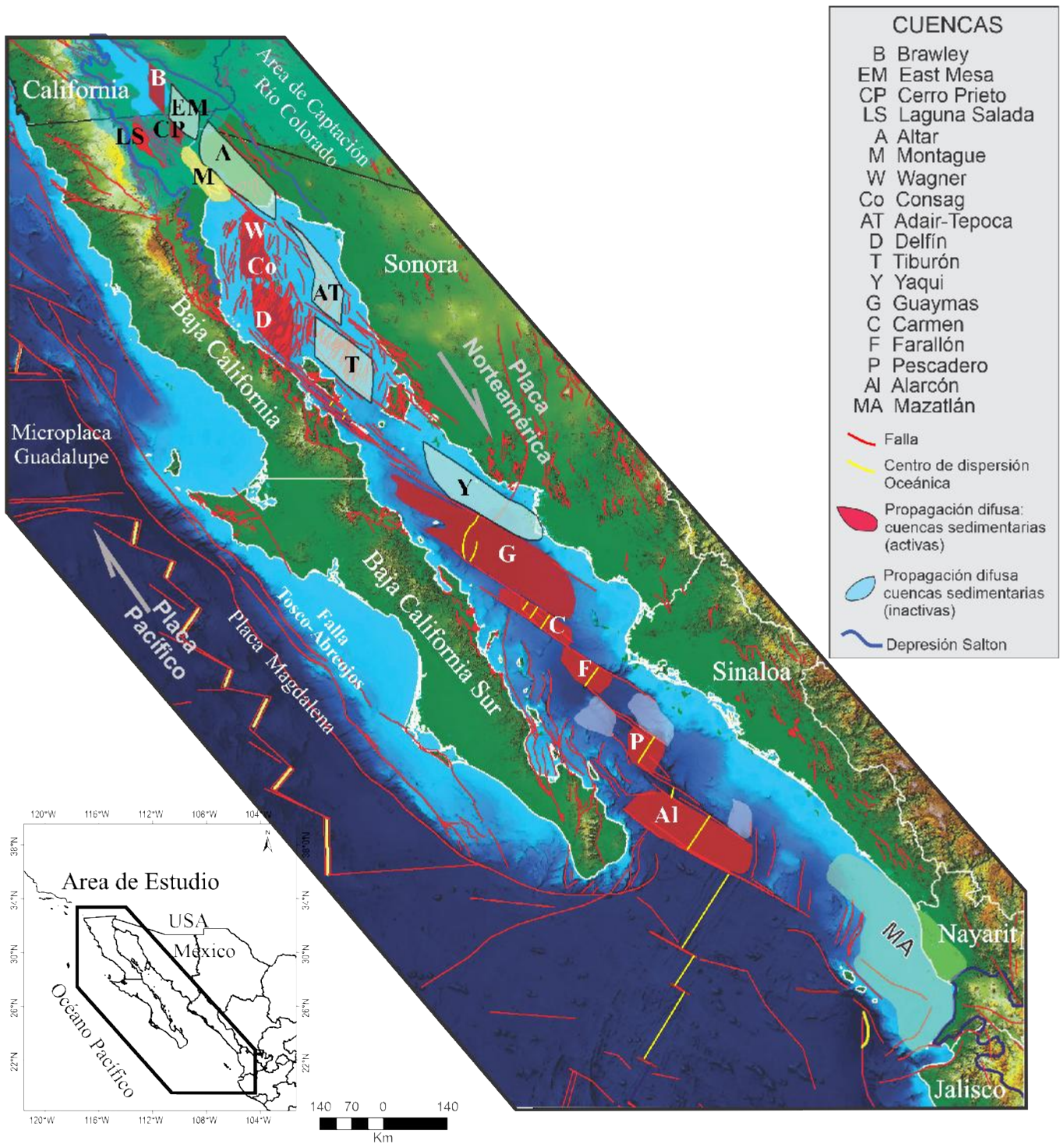


Figura 1. Tectónica y cuencas del Golfo de California, México y la Depresión Salton, CA, EUA. Polígonos rojos y azules indican áreas de expansión difusa, incluyendo cuencas sedimentarias activas e inactivas. Las líneas amarillas representan fallas de tipo pull-apart. Mapa modificado a partir de Dorsey y Umhoefer, 2012; Chanes-Martínez *et al.*, 2014; van Wijk *et al.*, 2017; Umhoefer *et al.*, 2018; Sánchez-Barra *et al.*, 2022; González-Escobar *et al.*, 2024.

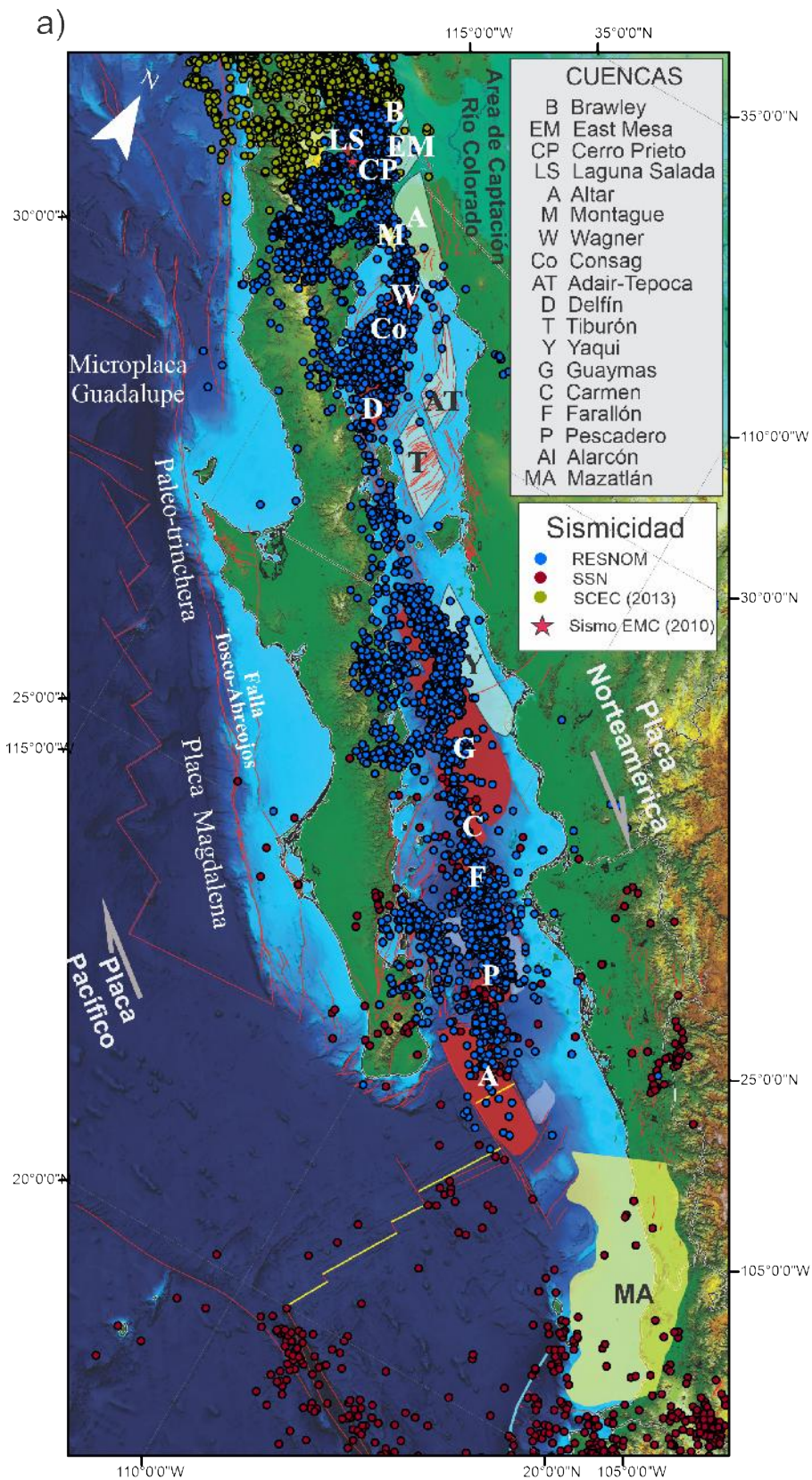


Figura 2. a) Similar a Figura 1 e incluye la sismicidad. Actividad sísmica en la región del Golfo de California.

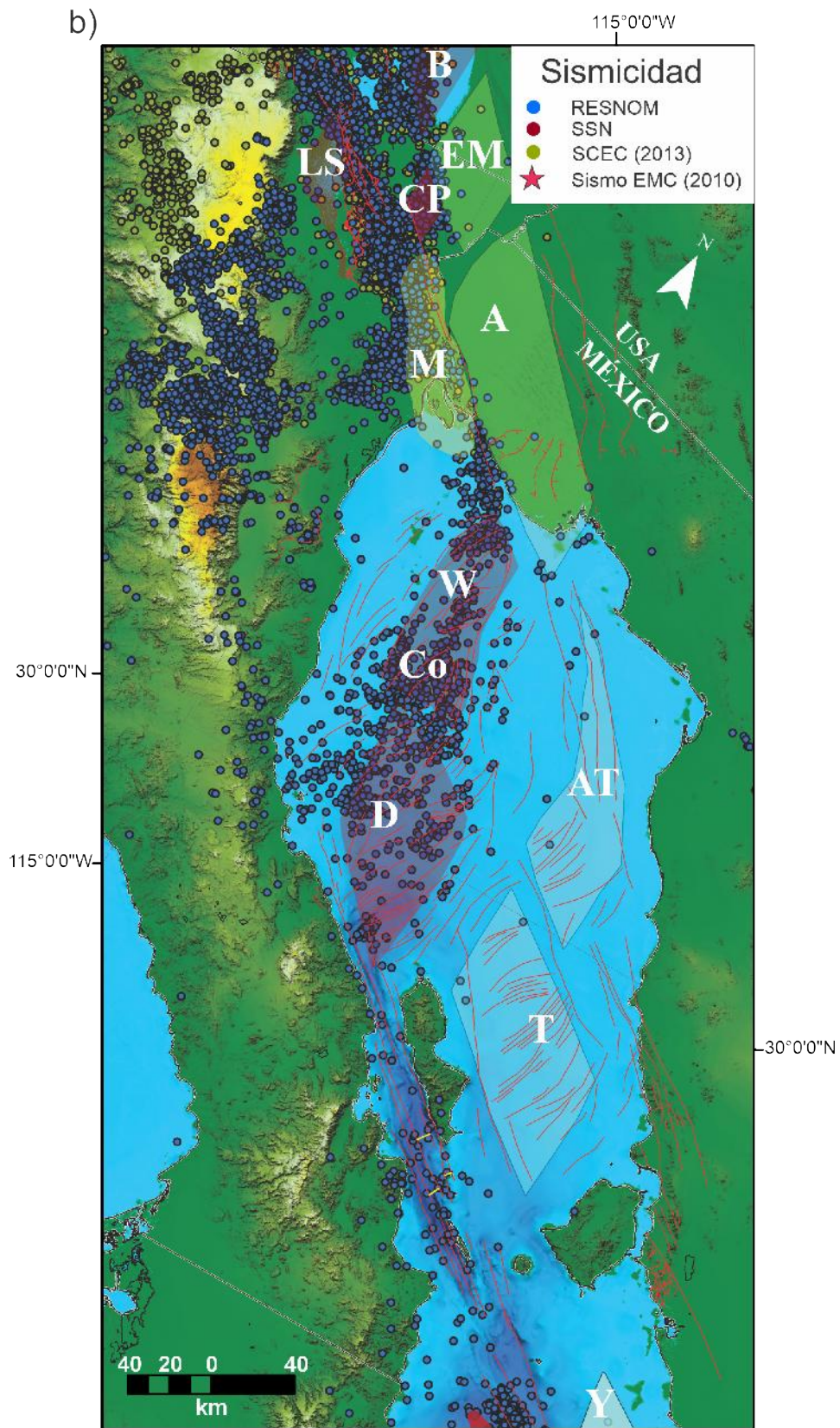


Figura 2. b) Similar a Figura 1 e incluye la sismicidad. Acercamiento de la actividad sísmica en el norte del Golfo de California (área de estudio). Líneas rojas—Fallas.

Sismicidad en el Golfo de California

Se elaboró un catálogo unificado de más de 7,000 sismos registrados en el Golfo de California durante el periodo 1900-2022, integrando datos de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el Statewide California Earthquake Center (SCEC-2013) y el International Seismological Centre (ISC), en ese orden de prioridad (Figura 2). La base de datos del ISC abarca el periodo 1964-2022 y la de RESNOM (2017), de 1987 a 2022. Los sismos presentan magnitudes locales entre 3.0 y 7.2, estando los mayores ($M > 6.8$) en el sur, sobre las fallas de las cuencas Farallón ($M = 6.9$), Carmen ($M = 7.0$) y Guaymas ($M = 7.1$ y $M = 7.0$) (Figura 2). Los datos de RESNOM corresponden a eventos al sur de Salton Sea (E.U.A.) entre 2011 y 2022, incluido el evento de El Mayor-Cucapah de 2010 ($M = 7.2$) (Figura 2).

Se identificaron fallas sísmicamente inactivas en el noreste del Golfo de California y actividad sísmica concentrada en la región central del norte de la península, con profundidades focales predominantes entre 4 y 8 km. Los sismos superficiales (< 4 km) tienden a alinearse a lo largo del eje del Golfo de California y las estimaciones de la profundidad del Moho, basadas en funciones de receptor (Fernández y Pérez-Campos, 2017) son de 35 km en el lado occidental de la península, de 40 km bajo la Sierra de San Pedro Mártir y de 15 km en el margen oriental del golfo.

Entorno tectónico y estructural

La Depresión Salton, en California, E.U.A., marca el límite oblicuo-divergente entre las placas Pacífico y Norteamérica, cuya tasa de deslizamiento es de 43-47 mm/año (Plattner *et al.*, 2007), conectando una red compleja de fallas del sur de California con el Valle de Mexicali (Nicholson *et al.*, 1994; Dixon *et al.*, 2000). Desde hace 12.5 millones de años, la transtensión regional ha separado la península de Baja California de la parte continental de México (Atwater y Stock, 1998; Oskin y Stock, 2003).

Estudios recientes han revelado detalles sobre la arquitectura del *rift* y la composición de la corteza (Aragón-Arreola *et al.*, 2005; González-Fernández *et al.*, 2005; Lizarralde *et al.*, 2007), mientras otros trabajos documentan la respuesta estratigráfica a la deformación cortical (Umhoefer *et al.*, 1994; Dorsey y Umhoefer, 2012).

El movimiento de placas a lo largo del Golfo de California y la Depresión Salton inició hace 6 millones de años (Oskin *et al.*, 2001), pero la cinemática previa aún es tema de debate. Al respecto, existen tres hipótesis principales sobre el inicio del *rift* del Golfo de California. La primera plantea que el *rift* comenzó después de la subducción de la placa Farallón hace 14-12.5 millones de años, cuando la península de Baja California comenzó a moverse con la placa del Pacífico. Se estima que el deslizamiento entre las placas del Pacífico y Norteamérica desde hace 12 millones de años es de 600 km, lo que sugiere un cierre completo del Golfo de California. Aunque la cizalla lateral solo permite entre 270 y 300 km de desplazamiento, el resto ocurre en el margen del golfo, en Sonora y Sinaloa. La segunda hipótesis, de Stock y Hodges (1989), propone dos etapas en el proceso: la primera es la partición lateral entre las placas y la segunda es la formación de un sistema transformante y cuencas pull-apart a partir de 3-4 millones de años. La tercera hipótesis sostiene que el *rift* comenzó mucho antes, entre 27 y 15 millones de años, con un adelgazamiento litosférico previo y transtensión iniciada a los 12.5 millones de años.

Las cuencas del Golfo de California se dividen en axiales y marginales. Las axiales del norte son someras (< 500 m) con geometrías romboédricas y sin corteza oceánica, mientras que las del sur desarrollan dorsales de tipo oceánico de aguas profundas (2000–3000 m) (Figura 1). En la Cuenca Guaymas, en la zona central del golfo, se combina la sedimentación moderada y profundidades intermedias de alrededor de 1600 m. Las cuencas marginales, como la Depresión

Salton, se caracterizan por estar en aguas someras o encontrarse en ambiente terrestre. La interpretación de dominios genéticos de la corteza se ha logrado a través de perfiles sísmicos y batimétricos. En el norte, en cuencas como Delfín, Consag y Wagner, las cortezas están adelgazadas y definen la transición entre composiciones de tipo continental hacia tipo oceánica. (Persaud *et al.*, 2003; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; González-Escobar *et al.*, 2024). Las cuencas orientales adyacentes a Sonora son tectónicamente inactivas y su base es de corteza de tipo continental.

Base de datos.

Se emplearon bases de datos de sísmica de reflexión 2D adquiridas por PEMEX y el proyecto Ulloa89 (Francisco de Ulloa es el nombre del buque oceanográfico del CICESE en ese tiempo). La base de datos de PEMEX abarca la totalidad del norte del Golfo de California y cuenta con un tiempo de registro de 6 segundos, mientras que la del proyecto Ulloa89, de alta resolución, se centra en detalles más específicos, y someros (< 1km de profundidad). Ambas bases de datos fueron utilizadas en otros estudios (Persaud *et al.*, 2003; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; González-Escobar *et al.*, 2009, 2014, 2024; Mar-Hernández *et al.*, 2012, Martín-Barajas *et al.*, 2020, entre otros). Sin embargo, ninguno de estos trabajos ha integrado la información completa de todo el norte del golfo (Figura 3).

Interpretación

En esta sección se analizan por separado las cuencas activas con alta densidad de epicentros (Figura 4) y las cuencas inactivas que se encuentran cerca de las costas de Sonora (Figura 5).

El perfil 5052 de la Figura 4a muestra una serie de cuencas, las cuales contienen subcuencas separadas por altos estructurales posiblemente formados en corteza continental inferior. Lo anterior no necesariamente implica corteza metamórfica.

Sin embargo, la corteza continental inferior pudo haber experimentado procesos metamórficos debido a presiones y temperaturas altas que son características de esas profundidades. Al norte, en la plataforma continental de la península se observa una cuenca abandonada que corresponde a la Cuenca Salina, cuya anchura es de 20 km. Un alto estructural separa la Cuenca Wagner de la Cuenca Consag, la cual presenta una subsidencia mayor en su parte norte. Hacia el sur, la Cuenca Superior Delfín incluye dos subcuencas asimétricas (Delfín Superior Norte y Delfín Superior Sur), delimitadas por fallas normales con orientación NE.

El perfil 5049 (Figura 4b) es perpendicular al perfil anterior y a la orientación hacia el NW del Golfo de California. Se orienta WSW-ENE atravesando la Cuenca Consag, la cual muestra un relleno en forma de cuña que está controlado por fallas normales en sus márgenes. Un reflector profundo sugiere intrusiones magmáticas asociadas a la formación de nueva corteza oceánica. Al este, la Falla Tepoca delimita el margen oriental con un basamento fallado alto, mientras que remanentes de la Cuenca Peñasco, cizallados por fallas N-S, incluyen la Falla Peñasco, de tipo transcurrente, que representa la extensión hacia el SE de la Falla Cerro Prieto. Respecto al sector frente a las costas de Baja California, en la región de San Felipe-Puertecitos, se encuentran varias fallas geológicas, siendo la Falla Percebe una falla de rumbo que es la más dominante en la zona. En esta región, el basamento acústico es somero, profundizándose mar adentro.

El perfil 5035 (Figura 4c) se localiza en la parte más meridional de la Cuenca Wagner, donde su depocentro, presenta reflectores de gran amplitud y una base en forma de domo interpretada como corteza oceánica nueva, ubicada debajo del depocentro más profundo que termina hacia el este en la Falla Wagner. El perfil sísmico corta transversalmente la Cuenca Wagner y la zona de cizalla inactiva (?) del sector oriental del golfo. Hacia el este, una sucesión sedimentaria potente se acuña hacia el continente y está cortada por

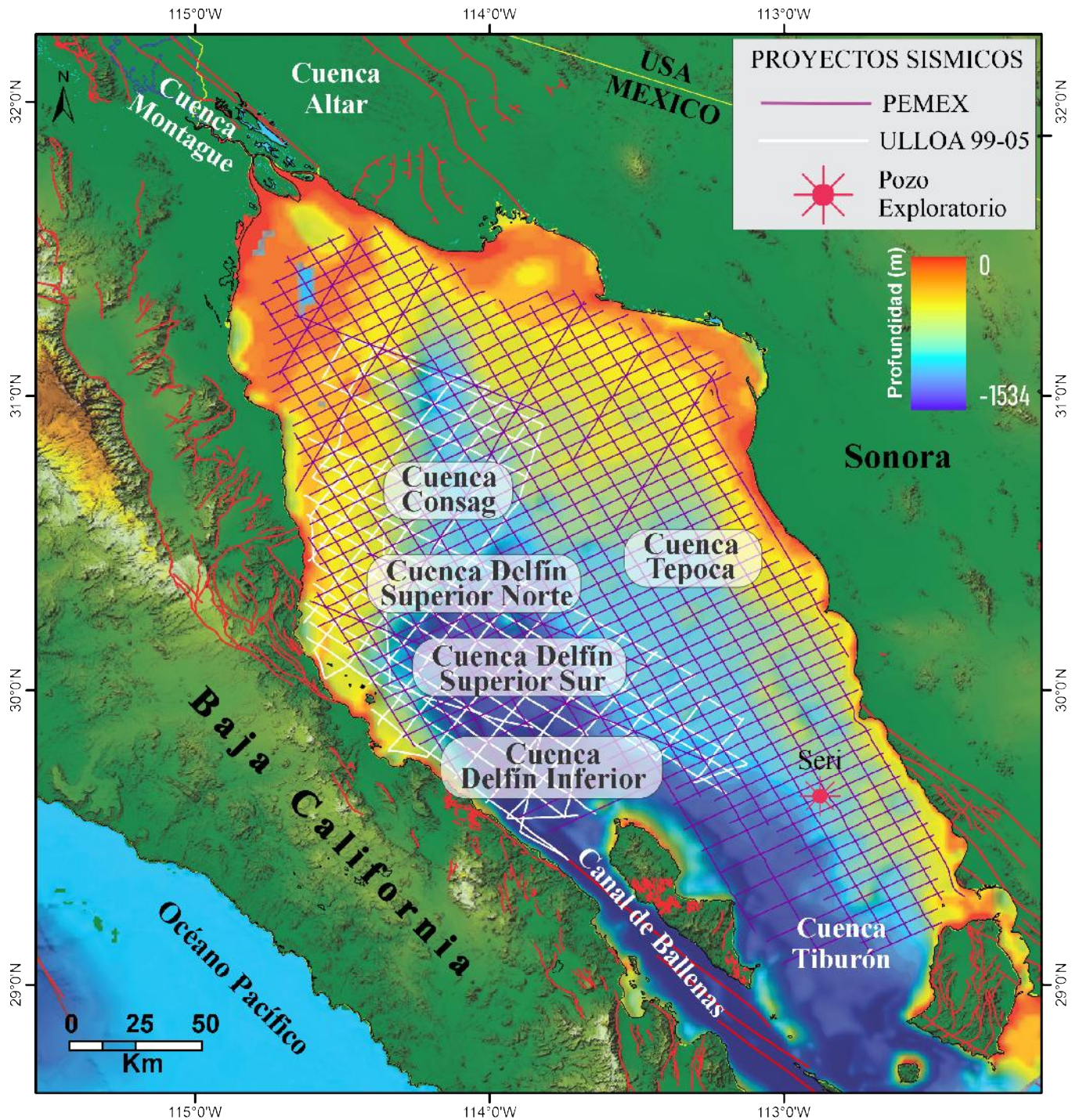


Figura 3. Interpretación estructural a partir de mapas batimétricos y perfiles de refracción sísmica (cuadrícula). Los datos sísmicos de PEMEX son de 48 canales y registran 6 segundos de TWTT—Tiempo doble de viaje (s) (líneas moradas). Las líneas sísmicas de alta resolución Ulloa89 son de 48 canales y registran 2 segundos de TWTT (líneas blancas). Los datos sísmicos de Ulloa89 son de poca penetración y muestran la sedimentación reciente y las fallas activas en detalle. La correlación y ubicación de fallas se definen con estos datos.

una serie de fallas de rumbo NE. Dicha secuencia termina abruptamente en la Falla Peñasco, que es transcurrente derecha. Esta falla produce un desplazamiento de basamento de ~1,5 km de profundidad. Hacia el este de la misma falla, las fallas Adair y Amado definen un graben simétrico y se interpretan como fallas transcurrentes inactivas.

En la Figura 5 se analizan tres perfiles que atraviesan la Cuenca Tiburón en el margen oriental del golfo.

El perfil 5032, orientado NW-SE, paralelo a la costa de Sonora, inicia en el extremo norte del golfo. En esa zona corta oblicuamente la Falla Cerro Prieto la cual está marcada por una caída de 2s del basamento acústico. Los bloques estructurales en la Cuenca Tepoca están controlados por la zona de Falla Tepoca y otras fallas del mismo sistema estructural. El perfil 5024 (Figura 5b), paralelo al anterior, inicia en la Cuenca Tepoca y ofrece una buena definición de la Cuenca Tiburón.

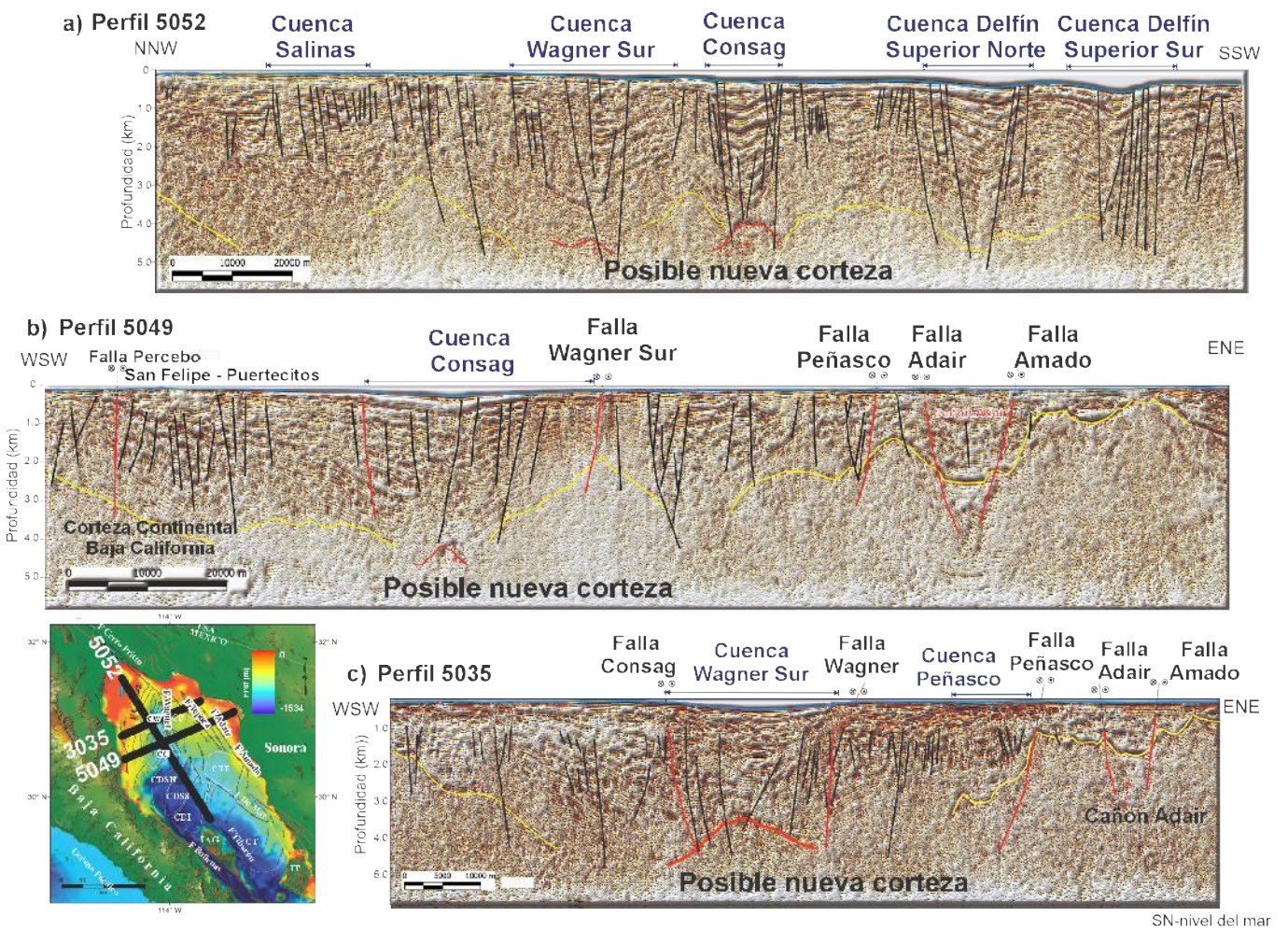


Figura 4. Mapa índice del norte del golfo y tres perfiles sísmicos a través de las cuencas activas. En los perfiles, la línea azul representa el nivel del mar, la línea amarilla—basamento acústico y la línea roja— posible nueva corteza. Las líneas negras y rojas indican fallas, siendo las rojas las estructuras dominantes. Cuencas: CW—Wagner, CC—Consag, CDSN—Delfín Superior Norte, CDSS—Delfín Superior Sur, CDI—Delfín Inferior, CT—Tiburón, CTE—Tepoca.

Dichas cuencas están separadas por un alto en el basamento de una corteza continental adelgazada. La Falla Desemboque (dirección NE-Fig. 5b) corta el basamento en el margen SSE de la Cuenca Tiburón, a la que se asocia una significativa subsidencia.

Finalmente, el perfil 5113 (Figura 5c) muestra fallas normales que controlan la subsidencia en la Cuenca

Tiburón. El pozo Seri, de 4.2 km de profundidad termina en sedimentos sobre el basamento a ~4 km de profundidad. La Falla Tiburón, transcurrente derecha, presenta deformación activa, evidenciada por rasgos que alcanzan el fondo marino y sismicidad que coincide con un montículo volcánico reciente.

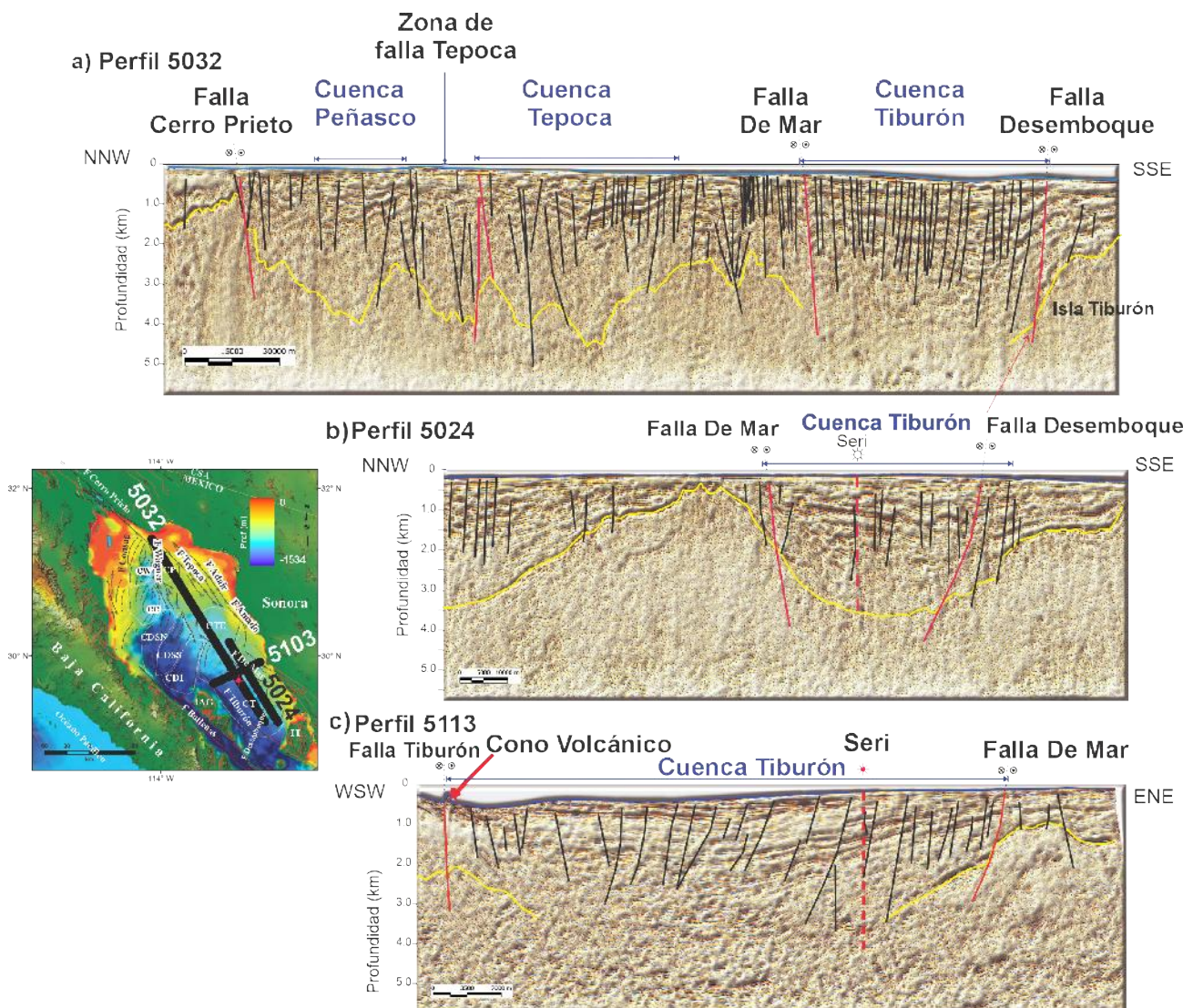


Figura 5. Mapa índice de tres perfiles sísmicos ubicados sobre la Cuenca del Tiburón. En los perfiles la línea amarilla se asocia al basamento acústico. Seri—Pozo Exploratorio (4,200 m de profundidad). Las líneas negras y rojas son fallas, siendo las rojas las dominantes. Cuencas: CW—Wagner, CC—Consag, CDSN—Delfín Superior Norte, CDSS—Delfín Superior Sur, CDI—Delfín Inferior, CT—Tiburón, CTE—Tepoca.

Resultados

La interpretación de los perfiles sísmicos revela que la batimetría somera alcanza profundidades de ~200 m (Figura 6a). El espesor sedimentario oscila entre ~7.0 km y más de 10 km, principalmente por aporte del Río Colorado (González-Fernández *et al.*, 2005; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; González-Escobar *et al.*, 2009, 2014; Mar-Hernández *et al.*, 2012). Las cuencas Wagner, Consag y Delfín Superior e Inferior tienen depocentros sepultados y están vinculadas a las fallas transformantes del Canal de Ballenas al sur y Cerro Prieto al norte (Lonsdale, 1989; Fenby y Gastil, 1991; Persaud *et al.*, 2003). La deformación transcurrente en el Canal de Ballenas genera una red compleja con aspecto de cola de caballo que define a las cuencas Delfín Norte y Sur.

La Cuenca Wagner está formada por dos subcuencas cuyos depocentros asimétricos se orientan NNE-SSW. La subcuenca norte, sin expresión batimétrica clara, está delimitada por la Falla Consag en el NW y la Falla Wagner en el este, mientras que la subcuenca sur de ~12-15 km de ancho está delimitada por fallas normales en el NW y la Falla Wagner en el E. La base de la corteza en la zona norte del golfo se sitúa entre 15 y 20 km de profundidad, la cual puede estar constituida por rocas metamórficas con intrusiones basálticas, o rocas graníticas diluidas, lo que significa que es una corteza que originalmente estaba formada por rocas graníticas que ha sufrido alteraciones que han modificado su composición mineralógica, empobreciéndola en algunos de sus componentes originales, o bien mezclándola con otros materiales. Este tipo de alteraciones son comunes en zonas donde la corteza ha estado sujeta a procesos de metamorfismo, erosión o actividad magmática (González-Fernández *et al.*, 2005; Fuis *et al.*, 1984).

Al W de la Falla Tepoca, las fallas activas tienen expresión en la batimetría del fondo marino (Figura 6a). Hacia el oriente de la misma zona

de falla, la subsidencia de las cuencas marinas disminuyó o cesó hace ~2-3 Ma con la migración de actividad tectónica hacia la península de Baja California (Aragón-Arreola *et al.*, 2005; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007). Entre las cuencas abandonadas, la mayor es la Cuenca Tiburón. Las fallas activas al oeste de la región de la Falla Tepoca también delimitan el *rift* moderno que desarrolla formas no romboidales como se ha estado suponiendo, con subcuencas múltiples (Figura 6). Los depocentros de las cuencas Wagner, Consag, Delfín Superior e Inferior están sepultados y no tienen expresión batimétrica clara (Fenby y Gastil, 1991; Persaud *et al.*, 2003), al igual que la subcuenca norte de la Cuenca Wagner, mientras que la subcuenca sur de ~12-15 km de ancho conecta con la Falla Wagner al NE. La deformación transcurrente en el Canal de Ballenas genera una red compleja con aspecto de cola de caballo que define a las cuencas Delfín Norte y Sur. La Cuenca Delfín Superior tiene entre cuatro y cinco depocentros asimétricos, mientras que la Cuenca Delfín Inferior es más joven y tiene un *rift* simétrico orientado al NE paralelo al alto Ángel de la Guarda definido por una falla normal con movimiento de bloque de techo hacia el NW (Figura 6).

Hacia el E, la inactiva Cuenca Tiburón tiene depocentros orientados al NE definidos por fallas normales de bajo ángulo, limitadas por las fallas Tiburón al oeste y De Mar en el este. El basamento de esta cuenca es continental y está cubierto por >6-7 km de sedimentos (González-Fernández *et al.*, 2005; Mar-Hernández *et al.*, 2012). La Falla Tiburón es activa localmente y captura una pequeña parte de la deformación de las placas Pacífico-Norteamérica. Las cuencas relictas del margen oriental, como Tiburón, Tepoca, Peñasco y Altar, están separadas por altos estructurales definidos por el desplazamiento de la Isla Ángel de la Guarda y la zona de Falla Amado. Estas cuencas, formadas en la etapa inicial del *rifting*, contienen restos de corteza continental hiperextendida observados como altos en intracuenca (Figuras 4-6).

Magmatismo activo se observa en la Cuenca Delfín Inferior, en el margen peninsular (fallas Volcanes y Ballenas), y a este pueden estar asociados los

respiraderos hidrotermales de las cuencas Delfín Superior, Consag y Wagner (González-Escobar *et al.*, 2014; Figura 6).

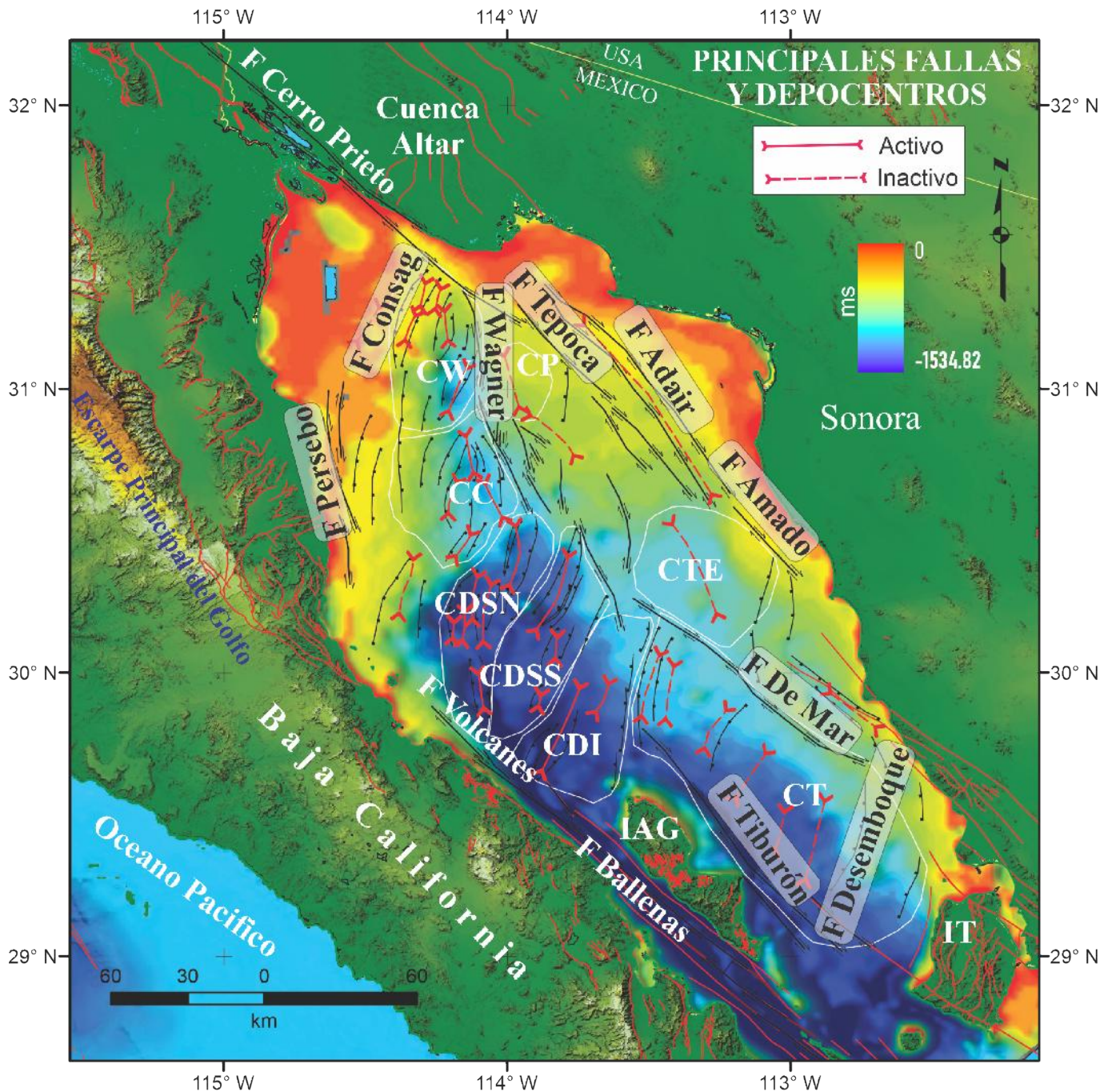


Figura 6. a). Mapa estructural del norte del Golfo de California mostrando las fallas principales. Algunas fallas cortan el basamento y producen varias cuencas menores cuyos depocentros se representan con líneas en rojo. Las líneas discontinuas rojas indican depocentros abandonados ubicados principalmente en el lado oriental del *rift*. Los contornos blancos delimitan cada una de las cuencas.

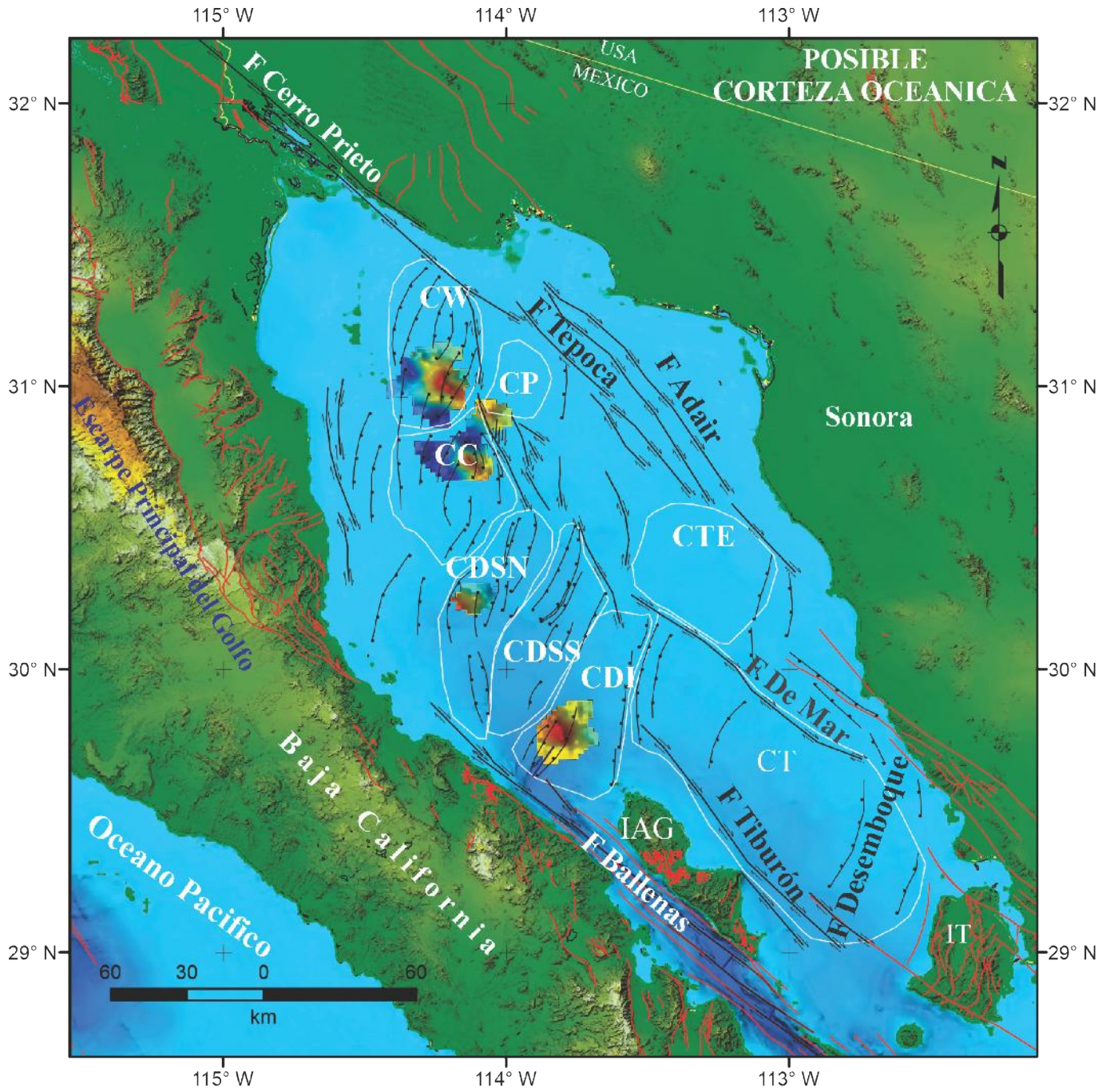


Figura 6. b) Mapa estructural con fallas activas que cortan el fondo marino. Se muestran los sitios en donde se observa evidencia de nueva corteza oceánica y que en su mayoría son *rifts* activos (sectores de color diferente al azul). Los reflectores profundos en forma de domo y de alta amplitud se interpretan como intrusiones magmáticas debajo de los depocentros (Mar-Hernández *et al.*, 2012; González-Escobar *et al.*, 2014). Cuencas: CW—Wagner Norte, CC—Consag, CDSN—Delfín Superior Norte, CDSS—Delfín Superior Sur, CDI—Delfín Inferior, CT—Tiburón. Islas: IAG—Ángel de la Guarda, IT—Tiburón.

Discusión

El Río Colorado ha llenado las cuencas de la Depresión Salton y el norte del Golfo de California con un volumen de sedimentos estimado entre 2.2 y $3.4 \times 10^5 \text{ km}^3$ (Dorsey y Umhoefer, 2012). Estos depósitos han formado una corteza transicional durante los últimos 5-6 Ma, evitando posiblemente la extrusión de derrames basálticos que caracterizan a una corteza oceánica (Fuis *et al.*, 1984). En el norte del Golfo, las cuencas Wagner, Consag, Delfín Superior Norte y Sur, así como Delfín Inferior, presentan espesores de sedimentos de hasta 10 km, provenientes del Río Colorado (Moore y Curry 1982). Los ejes de las cuencas muestran una geometría vinculada a las fallas transformantes paralelas Ballenas en el sur y Cerro Prieto en el norte. La deformación transcurrente del Canal de Ballenas crea una red compleja en las cuencas Delfín, mientras que la subsidencia se ha desplazado hacia el margen occidental (Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007). La Cuenca Tiburón, con un basamento mal definido entre las fallas de Tiburón y De Mar (Figura 6), presenta depocentros orientados al NE bajo más de 6 km de sedimentos (González-Fernández *et al.*, 2005).

Las fallas activas son dominantes hacia el oeste de la zona de Falla Tepoca, mientras que las cuencas marginales del margen oriental, como Tiburón, Tepoca, Peñasco y Altar, corresponden a remanentes tectónicos separados por altos estructurales (Figura 6) y son tectónicamente inactivas. La Cuenca Altar tiene importantes implicaciones tectónicas respecto a las cuencas localizadas en el norte del Golfo de California, debido a su relación con el proceso de extensión continental y la interacción tectónica en la región. En particular, la Cuenca Altar es parte de una estructura extensional que ha sido influenciada por la misma dinámica que afecta al Golfo de California, en donde el estiramiento de la corteza continental ha dado lugar a la formación de cuencas y la separación de bloques tectónicos y que actualmente se considera tectónicamente inactiva. Por otro lado, las cuencas Wagner, Consag y Delfín son activas y desarrollan subcuencas asimétricas.

Conclusiones

La reinterpretación de los perfiles sísmicos de reflexión 2D de PEMEX y Ulloa89 aportan información relevante sobre la actividad de las principales cuencas del norte del Golfo de California, en donde el tirante de agua es de hasta 200 m, sin considerar Canal de Ballenas que tiene profundidades de alrededor de 1500 m. Con espesores sedimentarios mayores a 7 km, los sedimentos del Río Colorado son los materiales más abundantes en el relleno de las cuencas Wagner, Consag y Delfín Superior Norte y Sur, así como Delfín Inferior, las cuales exhiben geometrías extensionales en dirección norte-sur, vinculadas a las fallas transformantes del Canal de Ballenas al sur y Cerro Prieto al norte. La deformación transcurrente en el Canal de Ballenas genera una red compleja con aspecto de cola de caballo que define a las cuencas Delfín Inferior y Superior (norte y sur).

Las fallas activas de la zona de Falla Tepoca marcan el límite oriental del *rift* moderno, mientras que cuencas marginales en la Isla Tiburón y el noreste de Sonora evidencian actividad tectónica y sedimentaria del Mioceno Tardío (12-6 Ma). Depocentros asimétricos y estructuras de bloques tipo *horst*, como el alto Ángel de la Guarda y la Cuenca Tiburón, están formados por corteza continental.

Agradecimientos

Agradecemos a la Comisión Nacional de Hidrocarburos y a PEMEX por brindarnos el acceso a los datos sísmicos de reflexión. A los estudiantes de posgrado que, a lo largo de los años, han participado activamente en la región con sus tesis, apoyados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, cuya invaluable ayuda financiera ha sido esencial para la realización de sus proyectos. Al Dr. Arturo Martín-Barajas por su constante participación en los proyectos y sus valiosos aportes al conocimiento del norte del Golfo de California. A Halliburton/Landmark, OpendTect,

GeoMapApp y Google Earth Pro por permitirnos utilizar sus softwares a través de los Programas de Grants Universitarios/CICESE. Queremos expresar nuestro agradecimiento a Luis Delgado y Felipe Escalona por su minuciosa revisión y valiosas sugerencias, las cuales han enriquecido y mejorado significativamente este manuscrito.

Referencias

- Aragón-Arreola, M., Morandi, M., Martín-Barajas, A., Delgado-Argote, L., González-Fernández, A. (2005). Structure of the *rift* basins in the central Gulf of California: kinematic implications for oblique rifting. *Tectonophysics*, 409, 19–38.
- Aragón-Arreola, M., Martín-Barajas, A. (2007). Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico. *Geology*, 35, 571–574.
- Atwater, T., Stock, J.M. (1998). Pacific North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: An update: *International Geology Review*, 40, 375–402.
- Axen, G., Fletcher, J.M. (1998). Late Miocene-Pleistocene extensional faulting, northern Gulf of California, Mexico and Salton Trough, California. *International Geology Review*, 40, 217–244.
- Chanes-Martínez, J.J., González-Escobar, M., Suárez-Vidal, F., Gallardo-Mata, G.C. (2014). Structural Geometry of a Sector of the River Delta, Baja California, Mexico, Based on Seismic Reflections, 2014, *Pure and Applied Geophysics*, 171, 1107-1127, Doi: 10.1007/s00024-013-0729-z.
- Dixon, T., Farina, C. De Mets, Suarez Vidal, F., J. Fletcher, J., Márquez-Azua, B., Miller, M., Sánchez, O., Umhoefer, P. (2000). New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Myr to present, II: Tectonic implications for Baja and Alta California, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3961–3964.
- Dorsey, R.J., Umhoefer, P.J. (2012). Influence of sediment input and plate-motion obliquity on basin development along an active oblique-divergent plate boundary: Gulf of California and Salton Trough, in Cathy Busby and Antonio Azor (ed.), *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*, Blackwell Publishing Ltd, 209-225.
- Fenby S.S., Gastil, R.G. Cartographers. (1991). *Geologic-tectonic map of the Gulf of California and surrounding areas*. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists.
- Fernández, A., Pérez-Campos, X. (2017). Lithosphere thickness in the Gulf of California region, *Tectonophysics*, 719, doi: 10.1016/j.tecto.2017.06.016
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., Solari, L. (2013). Late Oligocene to middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: the beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere* 9 (5), 1161–1200. <https://doi.org/10.1130/GES00925.1>.
- Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G. (2007). Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent Sediment Input and Plate-Motion Obliquity 223 areas. *Geological Society of America Bulletin*, 119, 1313–1336.

- Fuis, G. S., Bauer, K., Goldman, M. R., Ryberg, T., Langenheim, V. E., Scheirer, D. S., Rymer, M. J., Stock, J. M., Hole, J. A., Catchings, R. D., (1984). Subsurface geometry of the San Andreas fault in southern California: Results from the Salton Seismic Imaging Project (SSIP) and strong ground-motion expectations, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 107, 1642–1662.
- Gans, P. B. (1997). Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora: Implications for the Tectonic evolution of northwest Mexico. *Tectonics*, 16 (3), 388–408.
- González-Escobar, M., Reyes-Martínez, C.S., Gallegos-Castillo, C.A., Arregui-Ojeda, Sergio, M. Masache-Román, Edgar A. (2024). Basin Style Variation Along a Transform Fault: Southern Colorado River Delta, Baja California, México. *Pure and Applied Geophysics*. (2024). <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03561-6>.
- González-Escobar, M., Suárez-Vidal, F., Sojo-Amézquita, A., Gallardo-Mata C.G., Martín-Barajas, A. (2014). Consag Basin: northern Gulf of California, evidence of generation of new crust, based on seismic reflection data, *International Geology Review*, 56:11, 1315-1331, DOI:10.1080/00206814.2014.941023
- González-Escobar, M., Aguilar-Campos, C., Suárez-Vidal, F. Martín-Barajas, A. (2009). Geometry of the Wagner basin, upper Gulf of California based on seismic reflections, *International Geology Review*, 51:2, 133-144, DOI: <https://doi.org/10.1080/00206810802615124>.
- González-Fernández, A., Danobeitia, J. J., Delgado-Argote, L., Michaud, F., Cordoba, D., Bartolome, R. (2005). Mode of extension and rifting history of upper Tiburon and upper Delfin basins, northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 110, 1–17.
- Lizarralde, D., Axen, G.J., Brown, H.E., Fletcher, J.M., Antonio González-Fernández, A., Harding, A.J., Holbrook, W.S., Kent, G.M., Paramo, P., Sutherland, F., Umhoefer, P.J. (2007). Variation in styles of rifting in the Gulf of California. *Nature*, 448, 466–469.
- Lonsdale, P. (1989). Geology and tectonic history of the Gulf of California, in Winterer, E.L., Hussong, D., and Decker, R.W., eds., *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*, vol. N Boulder, CO, Geological Society of America, *Geology of North America*, 499–522.
- Lomnitz, C., Allen, C., Brune, J., Thatcher, W. (1970). Sismicidad y tectónica de la región norte del Golfo de California, México, resultados preliminares. *Geofísica Internacional* 10(2), 37-48.
- Mar-Hernández, E., González-Escobar, M., Martín-Barajas, A. (2012). Tectonic framework of Tiburon Basin, Gulf of California, from seismic reflection evidence, *International Geology Review*, 54:11, 1271-1283, DOI: 10.1080/00206814.2011.636988.
- Martín-Barajas, A., González-Escobar, M., Pacheco, M., Mastache, A., Gallegos-Castillo, C., Mendoza-Borunda, R., Arregui, S. (2020). Sedimentary basin thickness, architecture and evolution in the Gulf of California. In: *The thermal evolution of rifting and the transition to passive margins in the area of Gulf of California*, Phase 1 Report, Ensenada, México, División Ciencias de la Tierra, CICESE, 85 p.

- Moore D. G., Curray, J. R. (1982). Geologic and tectonic history of the Gulf of California, Initial Reports DSDP, 64:m Washington (U.S. Govt. Printing Office), p. 1279-1294.
- Nicholson, C., Sorlien, C. C., Atwater, T., Crowell, J. C., Luyendyk, B. P. (1994). Microplate capture, rotation of the Western Transverse Ranges, and initiation of the San Andreas transform as a low-angle fault system, *Geology*, 22, 491–495.
- Oskin, M., Stock, J., Martín-Barajas, A. (2001). Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California. *Geology*, 29, 459–462.
- Oskin, M., Stock, J.M. (2003). Marine incursion synchronous with plate-boundary localization in the Gulf of California. *Geology*, 31, 23–26.
- Persaud, P., Stock, J. M., Steckler, M. S., Martín-Barajas, A., Diebold, J. B., González-Fernández, A., Mountain, G. S. (2003). Active deformation and shallow structure of the Wagner, Consag, and Delfín Basins, northern Gulf of California, México, *J. Geophys. Res.*, 108(B7), 2355, doi:10.1029/2002JB001937.
- Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T.H., LaFemina, P., Sella, G.F., Fletcher, J., Suarez-Vidal, F. (2007). New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophys. J. Int.*, 170, 1373–1380. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03494.
- RESNOM (2017). Red Sísmica del Noroeste de México, Departamento de Sismología CICESE, todos los derechos reservados 2013 - 2017. doi.org/10.7914/SN/BC.
- Sánchez-Barra, A.C., González-Escobar, M., Ferrari, L. (2022). Subsurface structure of the Mazatlán basin, southeastern Gulf of California, Mexico, from seismic reflection and well data, *Tectonophysics*, Volume 838, doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229505.
- SCEC (2013). Southern California Earthquake Center. Caltech. Dataset. doi: 10.7909/C3WD3xH1.
- Spencer, J.E., Normark, W.R. (1979). Tosco-Abrejos fault zone: A Neogene transform plate boundary within the Pacific margin of south Baja California, Mexico. *Geology*, 7, 554–557.
- Stock, J. M., Hodges, K. V. (1989). Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate. *Tectonics*, 8, 99–115. https://doi.org/10.1029/TC008i001p00099.
- Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., Navarrete-Zamarripa, L.M., Ramírez, J., Glowacka, E. (2008). Shape and dimensions of the Cerro Prieto pull-apart basin, Mexicali, Baja California, México, based on the regional seismic record and surface structures. *Int. Geol. Rev.* 50, 636–649. https://doi.org/10.2747/0020-6814.50.7. 636.
- Sutherland, F.H., 2006, Continental rifting across the southern Gulf of California [Ph.D. thesis]: San Diego, University of California, 189 p.
- Sutherland, F.H., Kent, G.M., Harding, A.J., Umhoefer, P.J., Driscoll, N.W., Lizarralde, D., Fletcher, J.M., Axen, G.J., Holbrook, W.S., González-Fernández, A., Lonsdale, P. (2012) *Geosphere* August 2012; v. 8; no. 4; p. 752–770; doi:10.1130/GES00770.1.

Umhoefer, P.J., M.H. Darin, S.E. K. Bennett, L.A. Skinner, R. J. Dorsey, E. Oskin (2018). Breaching of strike-slip faults and successive flooding of pull-apart basins to form the Gulf of California seaway from ca. 8-6 ma. *Geology*, 46, 8.

Umhoefer, P.J., Dorsey, R.J., Renne, P.R. (1994). Tectonics of the Pliocene Loreto basin, Baja California Sur, Mexico, and evolution of the Gulf of California. *Geology*, 22, 649–652.

van Wijk, J., Axen, G., Abera, A. (2017). Initiation, evolution and extinction of pull-apart basin: Implications for opening of the Gulf of California. *Tectonophysics*, 719-720, p. 37-50. doi: 10.1016/j.tecto.2017.04.019.

Wei, S., Fielding, E., Leprince, S., Sladen, A., Avouac, J.-P., Helmberger, D., R. Chu, M. Simons, K. Hudnut, T., Herring R. (2011). Superficial simplicity of the 2010 El Mayor–Cucapah earthquake of Baja California in Mexico. *Nat. Geosci.* 4 (9), 615–618. <https://doi.org/10.1038/ngeo121>.

Manuscrito recibido: 17 enero 2025

Recepción del manuscrito corregido: 12 marzo 2025

Manuscrito aceptado: 18 marzo 2025

¡Hola! ¿Tú qué cuencas? Yo, las compartidas entre México y EEUU: la XXVII Olimpiada Estatal de Ciencias de la Tierra

Enrique Gómez Treviño

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Geofísica aplicada.

Carretera Ensenada – Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México.

egomez@cicese.mx

Presentación

Una cuenca es un territorio cuyas aguas desembocan todas en un mismo río, lago o mar. El agua de lluvia fluye por gravedad de las partes altas siguiendo cauces existentes o formando nuevos. Se llaman cuencas hidrográficas si solo se consideran las aguas superficiales, y cuencas hidrológicas si también se incluyen las aguas subterráneas. En esta versión de las olimpiadas trataremos sobre cuencas hidrográficas y en particular sobre las tres internacionales entre México y EEUU que son las cuencas de los ríos Tijuana, Colorado y Bravo. La Figura 1 muestra la geografía de las tres cuencas así como la portada y una fotografía sobre el tratado de 1944 entre los dos países.

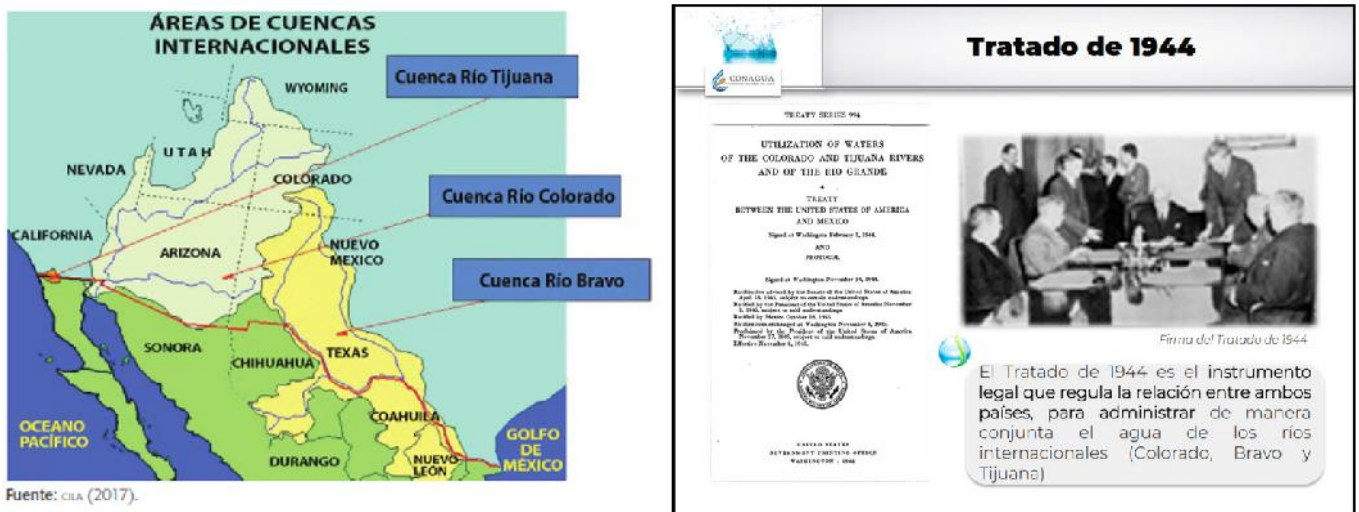


Figura 1. 1. Las tres cuencas internacionales entre México y EEUU, y portada y fotografía del Tratado de Límites y Aguas entre los dos países.

El tratado de límites y aguas de 1944 entre México y los EEUU establece las asignaciones de agua de uno a otro país. EEUU le asigna a México del río Colorado y México a EEUU del río Bravo. Los habitantes de Baja California dependemos en gran medida, cerca del 100 %, del agua del río Colorado cuyo cauce está casi en su totalidad en EEUU. Físicamente no dependemos del agua del Río Bravo, aunque de cierta manera hay un lazo a través de la diplomacia del agua. La Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) se reúne periódicamente para resolver los problemas que siguen surgiendo por sequías y contaminación.

Parte del agua asignada a México del río Colorado se sube por La Rumorosa para cubrir total o parcialmente las necesidades de Tijuana, Tecate, Rosarito y Ensenada. Son 6,000 litros por segundo, a todas horas y todos los días. Parece mucha agua porque una hora tiene miles de segundos y un día muchísimos más. Habría que calcular cuánto le toca a cada persona para saber si es mucha o poca. Por otro lado, subir esa cantidad de agua a La Rumorosa debe costar una fortuna, y de hecho así es, como se verá en una nota periodística más abajo sobre los recibos de la CFE. Sin embargo, no necesitamos saber el monto de los recibos, se puede calcular la energía utilizando la fórmula que aprendieron en sus clases de física para la energía potencial. La

Figura 2 muestra un esquema del acueducto y del resto de la infraestructura para llevar el agua hasta Tijuana,

El objetivo de la olimpiada es familiarizarse con hechos y sucesos, pasados y presentes, lejanos y cercanos que explican nuestra realidad actual en relación con el agua que utilizamos en Baja California. También, acercarnos con nuestros propios cálculos al tamaño de los retos con los que hay que lidiar para que llegue agua a nuestra casa y esté disponible las 24 horas. Las noticias en los medios de comunicación por lo general se limitan a transmitir los números que dio alguna autoridad, sin dimensionarlos o compararlos con otros para hacerlos más accesibles.

Se abordarán aspectos sobre la cantidad anual de lluvia o precipitación anual acumulada y las diferentes unidades de medición como: milímetros, pulgadas y litros por metro cuadrado. También volúmenes totales de agua, presas y sus capacidades de almacenamiento, así como cálculo de caudales. Se podrá utilizar calculadora, pero se recomienda practicar a papel y lápiz operaciones con potencias de diez así como conversión de unidades. Por ejemplo: de acres-pies a metros cúbicos, o de metros por segundo a kilómetros por hora.

PARTICIPACIÓN Y PREMIACIONES

Participaron en el evento 100 estudiantes provenientes de 13 planteles de Ensenada, Mexicali y Tijuana, Baja California. Los estudiantes César Alexander Guzmán Cejas, Dominick Santiago Gómez Palacios y José Alejandro Macías Ramírez, alumnos del plantel Tijuana Siglo XXI del Colegio de Bachilleres (COBACH) ganaron el primero, segundo y tercer lugar, respectivamente, asesorados por la profesora Gabriela de la Selva Rubio, del mismo plantel. Además de su diploma respectivo, los alumnos y la profesora recibieron un incentivo económico, en la ceremonia presidida por Enrique Gómez Treviño, coordinador de la Olimpiada, y Mario González Escobar, tesorero de la UGM.

Palabras clave: Cuencas transfronterizas; Tratado de 1944; Olimpiada de Ciencias de la Tierra.

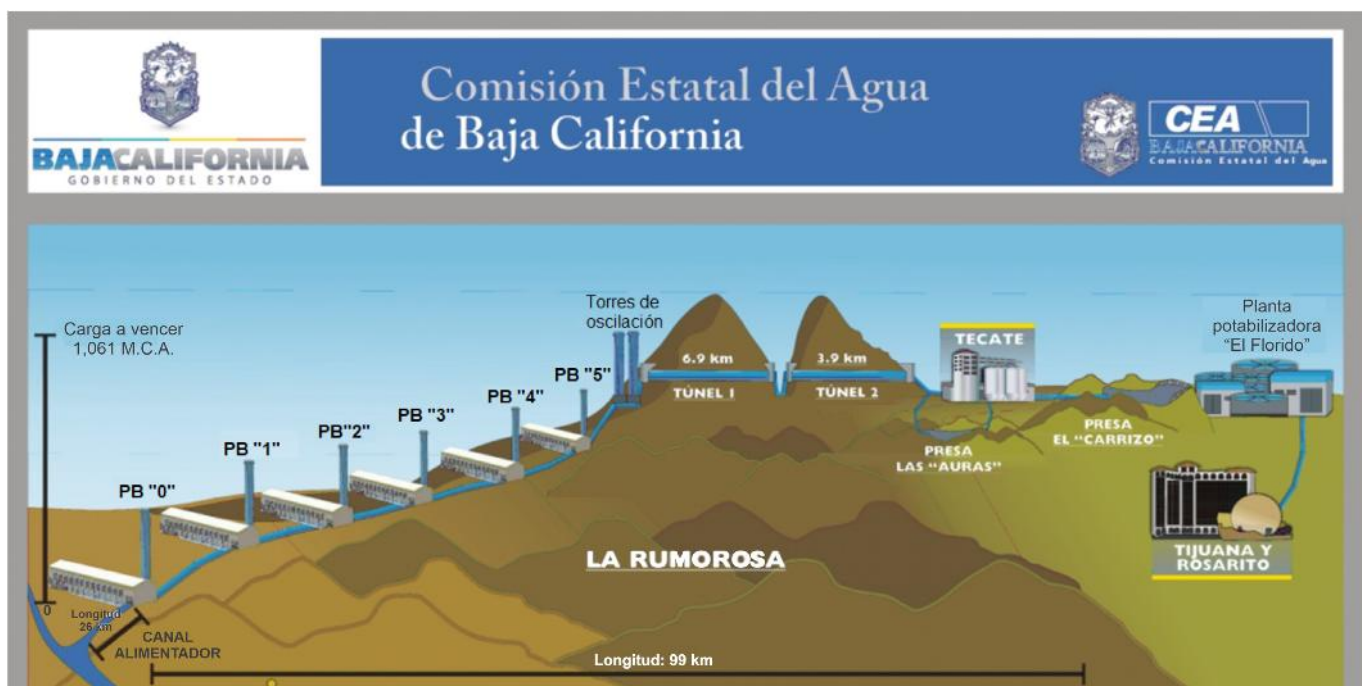


Figura 2. Perfil del acueducto Colorado-Tijuana. La altura a vencer es $\approx 1,000$ metros y la distancia a cubrir ≈ 100 kilómetros.

Guía para la XXVII Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California. Un evento CICESE-Unión Geofísica Mexicana
Viernes 4 de abril de 2025.
Salón de usos múltiples del CICESE.
Ensenada, Baja California.

NOTAS PERIODÍSTICAS CON NÚMEROS GIGANTESCOS

Los que no somos especialistas, por lo general nos sentimos perdidos por los números gigantes que se manejan en el tema del agua. He aquí unos ejemplos:

NOTA # 1. MARTES, 7 DE ENERO, 2025. SIPSE. COM. El gobierno de México recurrirá a la presa El Cuchillo, la principal fuente de abastecimiento de agua para el área metropolitana de Monterrey, para saldar parte del adeudo de agua que el país mantiene con Estados Unidos. Se contempla extraer 150 millones de metros cúbicos (Mm³) de agua.

COMENTARIO. Aquí la cuestión es saber cuánto es 150 Mm³ con respecto a la deuda. También, si es mucha o poca agua para una presa relativamente pequeña. Algo grave debe estar pasando porque el Río San Juan que alimenta a la presa no está incluido en el tratado, están otros pero no el San Juan. La siguiente nota explica un poco la anterior.

NOTA # 2. SÁBADO, 19 DE OCTUBRE DE 2024. El Heraldo de Chihuahua. Hace cuatro años, durante el conflicto por el pago de agua a Estados Unidos, la presa La Boquilla estaba al 31% de su capacidad. La extracción planeada la reduciría al 18%, lo que motivó la defensa del agua y la toma de la presa, que dejó como saldo una persona muerta, varios lesionados y detenidos. Actualmente la presa está al 15% de su capacidad.

COMENTARIO. Esta nota es mucho más clara que la anterior porque utiliza porcentajes, algo a lo que mucha gente ya está acostumbrada. Queda perfectamente claro que la presa La Boquilla no puede ni debe utilizarse en estos momentos para

abonar a la deuda de agua a EEUU. Va otra nota en la que utilizan Mm³.

NOTA # 3. DOMINGO, 26 DE JUNIO, 2022. El Economista. El estado de Baja California enfrenta la sequía más severa de los últimos 22 años; la principal fuente de abasto de Mexicali, Tijuana y Rosarito es el Río Colorado, de donde este año habrá una reducción de 99 millones de metros cúbicos (Mm³).

COMENTARIO. Este tipo de reducción está contemplada en el tratado con EEUU en tiempos de sequía, y no es para abonar a la deuda de agua, el Colorado se negocia aparte. Para entender qué significan tantos millones necesitamos compararlos con lo que se recibe cada año del río Colorado. Veamos ahora una nota en inglés de una agencia de EEUU.

NOTA # 4. MARTES, 20 DE FEBRERO, 2024. By Leah Sarnoff, ABC NEWS. Over the last five years, 100 billion gallons of untreated sewage, industrial waste and urban runoff have been dumped into the Tijuana River, according to the International Boundary and Water Commission.

COMENTARIO. La nota se refiere a la parte canalizada del río Tijuana cuyas aguas cruzan la frontera hacia EEUU. La parte no canalizada del río aguas arriba se almacena en la presa Abelardo L. Rodríguez. Para entender mejor estas cantidades sería conveniente convertirlas a unidades más familiares. Veamos una nota en la que se manejan cantidades por habitante por día.

NOTA # 5. LUNES, 19 DE FEBRERO, 2024. La Jornada, Tijuana, Baja California. De acuerdo a la OMS, una persona requiere de 100 litros diarios para satisfacer sus necesidades. En México, el consumo por habitante ronda los 360 litros por habitante y en el otro extremo de la cifra estaría Nigeria, con un promedio de consumo de 10 litros al día por habitante, sostuvo José Carmelo Zavala Álvarez, director del Centro de Innovación y Gestión Ambiental (CIGA). En el consumo regional, el condado de San Diego utiliza alrededor de 600 litros al día por habitante, mientras que Mexicali ronda el promedio nacional de 360 litros

al día, y la ciudad de Tijuana es de 200 litros por habitante al día. “El mayor consumo de agua en casa se da en el baño, ya que el mueble sanitario gasta en promedio 6 litros por descarga, la regadera de 12 a 34 litros por minuto, el lavabo 12 litros por minuto”.

COMENTARIO. Esta nota no habla de problemas, es más bien informativa. Los Mm^3 por año que requiere una ciudad se reducen a cantidades que manejamos todos los días. Faltó decir que la factura viene en metros cúbicos por mes, y que el metro cúbico se cobra entre 20 y 40 pesos según la ciudad y el consumo. Vean el recibo de su casa.

NOTA # 6. DOMINGO, 14 DE ENERO DE 2024. EL SOL DE TIJUANA. Los municipios de Tecate, Tijuana, Playas de Rosarito y algunas partes de Ensenada, son abastecidos con agua que es trasladada desde Mexicali mediante el acueducto Río Colorado. Amador Barragán mencionó que en el último mes el pago (por energía eléctrica) fue de aproximadamente 70 millones de pesos, cuando en años anteriores este era aproximadamente entre los 300 a 350 millones de pesos. Esto fue posible tras llegar a un acuerdo con la CFE de cambiar la tarifa de la energía eléctrica como suministro básico, explicó.

COMENTARIO. En este caso el asunto de interés sería el costo por metro cúbico. En otras palabras, cuánto de lo que se cobra en el recibo por metro cúbico es para pagar la electricidad para subirlo por La Rumorosa. Por último una nota con errores en las unidades de volumen.

NOTA # 7. SÁBADO, 8 de FEBRERO. 2020. MILENIO. ¿Por qué México debe pagar agua a Estados Unidos? Aunque la deuda de 220 millones de milímetros cúbicos (mm^3) de agua que México debe pagar a Estados Unidos en octubre próximo obedece a un déficit de los últimos 5 años, en realidad la entrega del líquido tiene su origen en el tratado entre ambas naciones para mantener la paz, tras la guerra México-Estados Unidos por la disputa del territorio texano hace 172 años. Del Río Colorado, Estados Unidos dota a México de mil 850 millones de metros cúbicos de agua cada año; mientras que del Río Bravo a Estados Unidos, México realiza entregas de agua en ciclos

de cinco años, en un promedio mínimo anual de 432 milímetros cúbicos. Pero en 2019, nuestro país tuvo un déficit de 220 mm^3 , adicionales a los 432 milímetros correspondientes que debe entregar a más tardar en octubre próximo.

COMENTARIO. No es raro que se presenten en los medios de comunicación estos errores que solo aumentan la confusión con los números muy grandes. ¿Notaron el error? Se podría argüir que solo se trata del error de utilizar m en lugar de M. O sea, que quisieron escribir 220 Mm^3 pero escribieron 220 mm^3 , un simple cambio de mayúscula por minúscula. Pero no, dos veces se dice explícitamente milímetros cúbicos. La gente de Chihuahua estaría feliz de que fuera cierto que se deben 220 millones de milímetros cúbicos. ¿Cuántos litros son 220 millones de milímetros cúbicos?

CONCEPTOS BÁSICOS

La parte izquierda de la Figura 3 muestra un esquema simplificado de una cuenca hidrográfica. Las líneas punteadas delimitan la cuenca y se conocen como parteaguas en el sentido que parten en dos a la lluvia que cae en sus alrededores. La que cae en la cuenca termina en el río, y la que cae al otro lado termina en otro río. El parteaguas que divide las cuencas de los ríos Bravo y Colorado es un ejemplo espectacular; agua que cae unos metros aparte puede terminar separada por miles de kilómetros de distancia, dependiendo de si cae a uno u otro lado del parteaguas que comparten. Por otro lado, la cuenca del Río Tijuana no comparte nada con las otras dos, aunque con el acueducto ahora está conectada con la del Colorado.

Por lo general, una cuenca tiene sub-cuencas y micro-cuencas como se muestra en la parte derecha de la Figura 3. Sus ríos o arroyos son afluentes que descargan sus aguas en el río principal, y en su conjunto forman un patrón dendrítico (?). Dendrítico: que tiene forma de dendrita. Nos quedamos en las mismas. Dendrita: del gr. *déndron* que significa árbol. Entendido: el río principal es el tronco y los ríos y arroyos afluentes son las ramas. De las tres cuencas la del Río Tijuana es la más dendrítica, o más bella

diría el poeta; las otras dos parecen árboles deformados.

Todos vivimos en una cuenca, aunque no siempre estemos conscientes de ello. En las ciudades se puede apreciar que el agua prefiere unas calles más que otras y que las de más abajo concentran los mayores flujos. Por lo general el agua se sigue hasta un arroyo o río y termina en el mar, pero puede también suceder que se acumule en una zona baja sin salida causando inundaciones. Esto también sucede en la naturaleza. De hecho, es uno de los cuatro tipos de cuencas que existen. La Figura 4 explica cada uno de los cuatro tipos con ejemplos en diferentes estados del país.

No toda el agua que cae en una cuenca termina en el río, la mayor parte se evapora tanto directamente del suelo o a través de las plantas, en lo que llaman evapotranspiración. Otra parte se infiltra al subsuelo y se acumula como agua subterránea en los acuíferos. Lo que termina en los ríos es alrededor del 20 %. La cantidad de agua en un río se puede calcular multiplicando el área de su cuenca por la cantidad de lluvia o precipitación y considerando el factor de escurrimiento de 0.2 que corresponde al 20 %.

EL PESO DE LA HISTORIA

Tanto el río Bravo como el río Colorado, y también el Río Tijuana, estaban totalmente en territorio de la Nueva España como se ilustra en la Figura 5. Esta frontera fue ratificada en el México independiente en 1832 por EEUU en el tratado de Adams-Onís. La frontera norte estaba en parte definida por los ríos Arkansas, Rojo y Sabino como se muestra en la Figura 6. Tres años después, en 1835, Texas se declara independiente fijando su frontera sur en el Río Nueces que está unos 200 km al norte del Bravo a la altura de la ciudad de Corpus Christi. Durante los siguientes 13 años, hasta 1848, los ríos Tijuana, Bravo y Colorado seguían totalmente en territorio mexicano.

Derivado de la guerra con EEUU la frontera se corrió hacia el sur hasta el Río Bravo con el tratado de Guadalupe-Hidalgo de 1848, y se extendió además el territorio de EEUU hacia el oeste hasta California. En el tratado, Sonora llegaba hasta el Río Gila, más o menos 200 km al norte de la frontera actual. Sin embargo, esto cambió con el tratado de la venta de La Mesilla en 1853 con lo que se estableció la frontera actual. El nombre mismo de La Mesilla sugiere que se trata de un territorio pequeño. Sin embargo, se puede apreciar a simple vista que La Mesilla, la

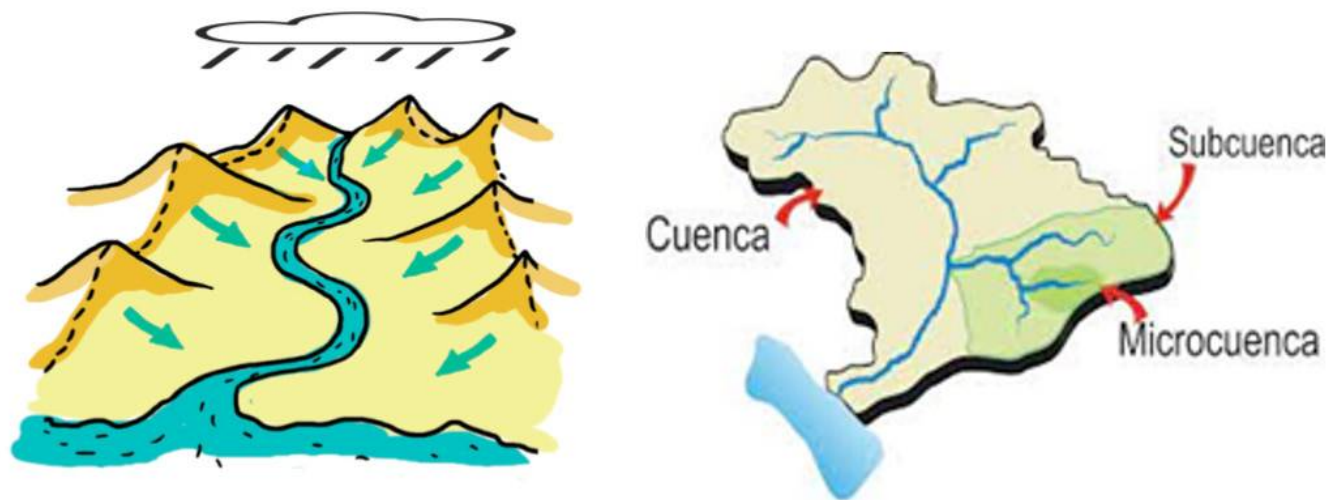


Figura 3. Elementos básicos de las cuencas.

https://es.wikipedia.org/wiki/Cuenca_hidrogr%C3%A1fica

<https://i.pinimg.com/1200x/84/02/72/8402722f91b012fa8633ceec3ee46c77.jpg>

Tipos de cuencas

Una cuenca hidrológica es un territorio rodeado de zonas altas, como montes, cerros o montañas y donde ocurren todos los procesos del ciclo hidrológico.

Revisión técnica: Alfonso Gutiérrez

CUENCA CERRADA O ENDORREICA
Sus aguas desembocan en lagos, lagunas o salares, que no tienen comunicación fluvial al mar. Un ejemplo es:
• La cuenca del lago de Pátzcuaro, en el estado de Michoacán, México.

CUENCA ABIERTA O EXORREICA
Su cauce principal y sus tributarios son los elementos que permiten que el agua transite por ellos y descarguen sus aguas al mar. Un ejemplo es:
• La cuenca del río Papaloapan, en los estados de Veracruz y Oaxaca, México.

CUENCA ARREICA
Los escurrimientos no llegan a un río ni a un cuerpo de agua de importancia. Son frecuentes en áreas del desierto, como en el Sahara, por ejemplo.

Existe una sola cuenca arreica en México, que podríamos denominar Península de Yucatán, pues toda la península es muy plana y no hay cauces superficiales bien definidos.

CUENCA CRIPTORREICA
Los escurrimientos son exclusivamente subterráneos. Un ejemplo se tiene de nuevo en la península de Yucatán, México, pues al no tener cauces superficiales definidos, sus cuencas se definen por sus escurrimientos subsuperficiales y subterráneos, con sus decenas de cenotes. Este tipo de cuenca está presente en suelos cársticos, conformados por rocas carbonatadas solubles en agua.

MEDIO AMBIENTE | IMTA

gob.mx/imta

Figura 4. Los diferentes tipos de cuencas.

región entre el río Gila y la frontera actual, tiene un área mayor a la del estado de Baja California.

¿Cómo es que Baja California se salvó de quedar aislada por tierra del resto de México? Se estuvo muy cerca. La clave es el punto donde el Río Gila desemboca en el Río Colorado. Este punto se defendió a toda costa como inamovible en la nueva frontera y así quedó finalmente. Sin embargo, los negociadores mexicanos al parecer

no pudieron evitar que tanto al este como al oeste la frontera quedara más al sur. Noten que las dos líneas rectas trazada desde ese punto tienen inclinaciones hacia México. De hecho, la recta hacia Sonora inicia un poco más al sur y lo hace sobre el río Colorado. Esto hizo que el río se convirtiera en frontera entre EEUU y México como lo es el Río Bravo, pero solo por 27 kilómetros.

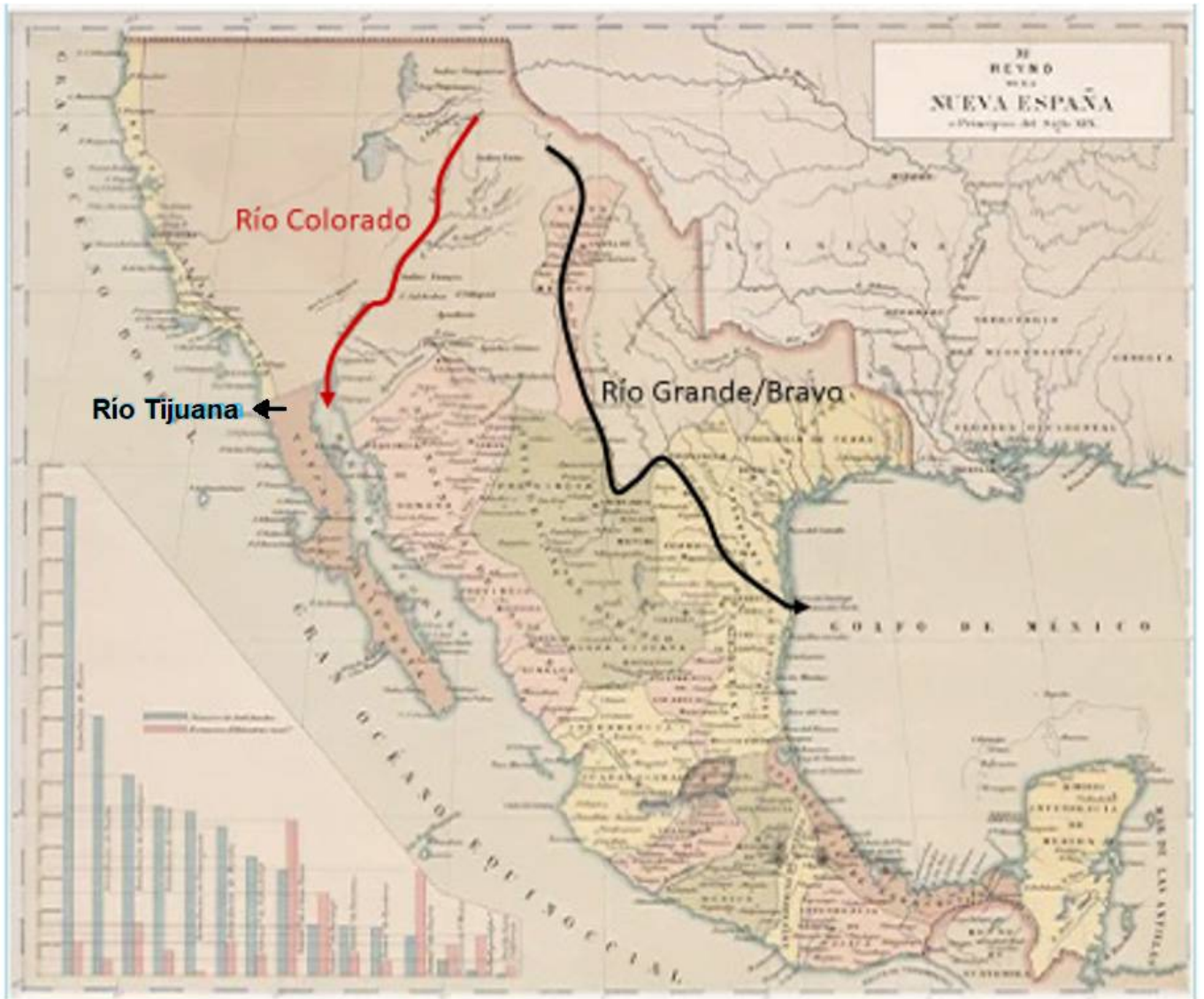


Figura 5. Mapa de la Nueva España con los ríos Tijuana, Bravo y Colorado completamente dentro de su territorio. https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Reyno_de_la_Nueva_Espa%C3%B1a_%28Siglo_XIX%29.JPG

El tratado de 1848 también establece que la línea recta hacia el puerto de San Diego terminará a una legua marina (5.5 km) al sur de la parte más meridional (sur) del puerto, lo cual corresponde a la actual Tijuana. La versión popular de que la frontera original estaba más al norte, en la calle Division Street en National City, al parecer no tiene fundamento más allá del nombre de la calle. De hecho, en muchas ciudades de EEUU existen calles con el mismo nombre.

ORDENAMIENTO DE LOS RÍOS EN CATEGORÍAS

Vamos a explorar una forma de ordenar los ríos en categorías que es similar al de los huracanes; pero no es oficial, no existe y no lo encontrarán en ninguna parte. Y no es que esté mal, solo que es demasiado simple. Sin embargo, sí que es útil y práctico como verán.

En la Figura 7 se muestra un mapa de los continentes indicando con colores la cantidad de lluvia que se acumula en un año. En realidad, se trata del promedio de muchos años para compensar las variaciones que hay de año en año. En el mar también llueve pero los datos no se muestran en el mapa. Los lugares donde la lluvia acumulada anual es de más de 1000 milímetros (mm) están en verde oscuro, y donde llueve menos de 224 mm están en rojo. En gris claro están los lugares con menos de 24 mm como el desierto del Sahara donde casi no llueve en todo un año. La península de Baja California está en rojo en las zonas con menos de 224 mm, así como la parte central de EEUU y Canadá y el norte de México.

En el mapa se incluye la localización y caudal de cuatro ríos famosos. Estos son: Nilo, Ganges, Misisipi y Amazonas. El caudal del Nilo se puede escribir como $2.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. Podríamos decir que el Nilo es de categoría 3. El caudal del Ganges se puede escribir como $1.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ y le correspondería la categoría 4. Para el Misisipi se puede escribir $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ y su categoría sería también de 4. Finalmente, para el Amazonas $2.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$ lo cual correspondería a una categoría de 5. Noten que al hacer ceros a partir de la tercera cifra se pierde exactitud, pero no cambia el exponente y por lo tanto tampoco

la categoría. Se podría incluso redondear a una sola cifra diferente de cero y la categoría sería la misma. Por ejemplo, para el Nilo $2.8 \times 10^3 \approx 3 \times 10^3$ y para el Amazonas $2.2 \times 10^5 \approx 2 \times 10^5$. A simple vista y sin hacer cálculos podemos ver que el Amazonas es más o menos 100 veces más caudaloso que el Nilo. Se puede incluso ser más preciso diciendo que es $2/3$ de 100 veces.

La Figura 8 sitúa en un mapa pluvial de América del Norte a los tres ríos del tratado de aguas entre EEUU y México. Los tres se encuentran en las regiones donde llueve menos en ambos países, y sin embargo los ríos Colorado y Bravo pueden muy bien ser considerados caudalosos con 6×10^2 y $3 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. La explicación está en que sus cuencas tienen áreas muy grandes como lo veremos más adelante. Ambos ríos son de categoría dos, siendo el Colorado el doble de caudaloso que el Bravo. Por su parte, el Río Tijuana es categoría cero porque $1.2 = 1.2 \times 10^0 \text{ m}^3/\text{s}$. Un metro cúbico por segundo parecería que es muy poco si lo comparamos con los cientos del caudal de los otros dos ríos. Veamos cuántos metros cúbicos se acumularían en un día. Un día tiene $60 \times 60 \times 24 \text{ s} = 86,400 \text{ s}$. Tendríamos entonces 86,400 metros cúbicos al día. Si consideramos que por habitante se requieren 200 litros al día, tendremos que 5 personas requieren 1,000 litros o bien 1 metro cúbico. Los 86,400 metros cúbicos alcanzarían para $86,400 \times 5 = 432,000$ habitantes, que es más o menos la población de Ensenada.

En este punto es conveniente explicar las unidades de mm en que se mide la precipitación. En algunos noticieros utilizan litros (l) por metro cuadrado (m^2) lo cual es más intuitivo. En realidad numéricamente son iguales. La razón l/m^2 se puede escribir equivalentemente de otra manera. Un litro equivale al volumen de un cubo de 10 cm de lado, o sea $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$. Esto se puede escribir como $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$, o bien 0.001 m^3 . En otras palabras, un litro es la milésima parte de un metro cúbico. Por lo tanto tenemos que $\text{l}/\text{m}^2 = (0.001 \text{ m}^3)/\text{m}^2 = 0.001 \text{ m} = 1 \text{ mm}$. Cuando escuchemos tantos litros por metro cuadrado podemos pensarlo en milímetros, o viceversa. Esto nos lleva a que, para

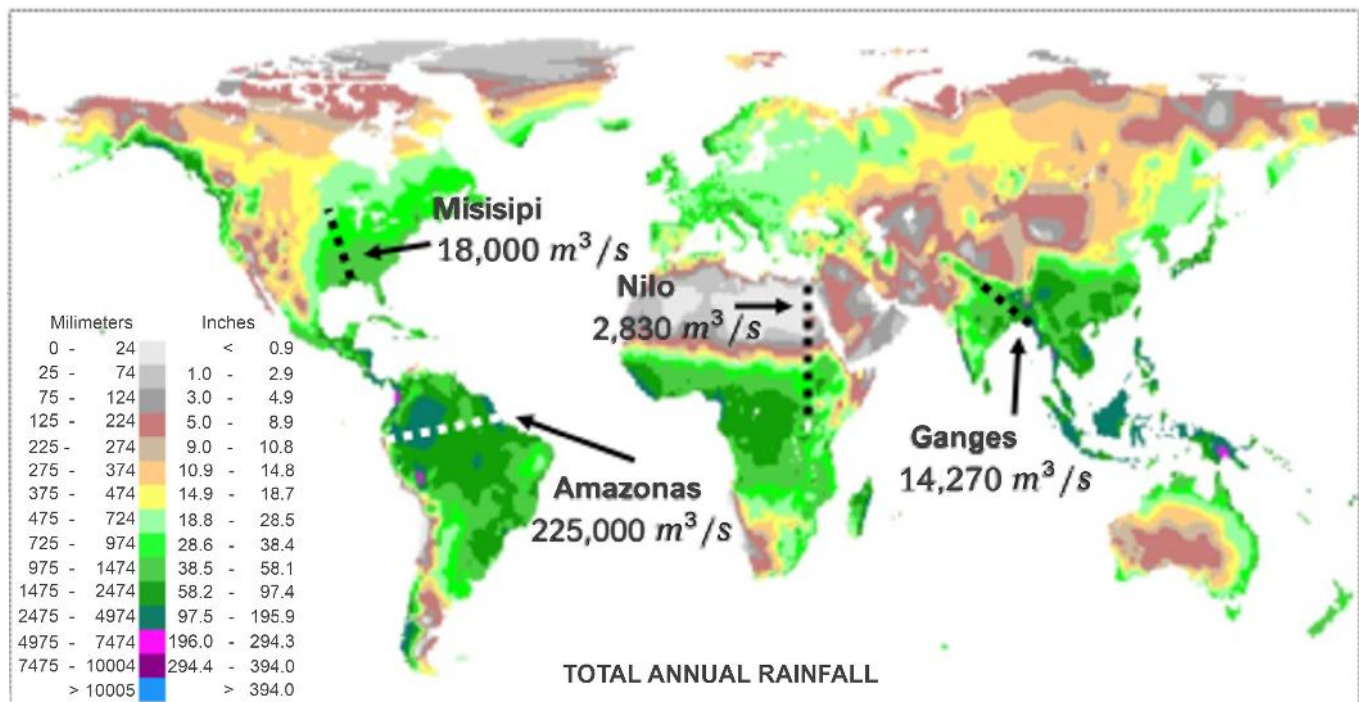


Figura 7. Mapa de la precipitación anual media en los diferentes continentes. Se muestra la localización y el caudal de cuatro ríos famosos. <https://gustavorivero.com/wp-content/uploads/2018/05/lluvias-mapamundi-de-la-pluviosidad.jpg>

medir la precipitación podemos utilizar cualquier recipiente con paredes paralelas sin importar su área, desde un vaso de cocina a un balde de 20 litros, la altura del agua será la misma. ¿O no? Es para pensarlo o experimentarlo con una regadera. Cuando se utilizan pulgadas hay que recordar que 1 pulgada = 25.4 milímetros.

EL RÍO QUE NO PUDO SER NI SERÁ

Para ilustrar el cálculo de volúmenes y caudales vamos a imaginar un río fantástico que llamaremos "Río Baja California". La Figura 9 muestra un esquema del estado de Baja California desde el paralelo 28 que delimita su frontera sur hasta la frontera norte con EEUU. Vamos a suponer que la cuenca de este río es todo el estado. El río corre de sur a norte por lo que se supone que el sur es montañoso y poco a poco se llega al nivel del mar en la frontera norte. Necesitamos esta suposición porque el agua fluye por gravedad. También debemos suponer que las costas en ambos lados son montañosas para que la cuenca del río sea todo el estado. En otras palabras, no queremos que el agua de lluvia se nos escape al

mar. En la realidad las partes altas están más o menos a la mitad entre los dos mares, a todo lo largo de la península. No hay espacio para que se formen cuencas grandes.

Para el cálculo necesitamos la superficie del estado, la cual es de 71,450 km². Para la precipitación anual acumulada utilizaremos 130 mm, la cual es un promedio de lo que llueve en la zona costa (250 mm) donde se encuentran Ensenada y Tijuana y el resto del estado donde llueve menos. El volumen del agua de lluvia se obtiene multiplicando el área del estado por el espesor de la precipitación. Hay que considerar que las dos cantidades deben tener las mismas unidades para que el resultado tenga sentido. La superficie del estado se puede escribir como 71,450 km² = 71,450 km × km = 71,450 × 1000m × 1000m = 71,450 × 10³ m × 10³ m = 71,450 × 10⁶ m². La precipitación de 130 mm en metros es 0.130 m. Por lo tanto el volumen acumulado anual de la cuenca es de 71,450 × 10⁶ m² × 0.130 m = 9,288.5 × 10⁶ m³. Considerando que solo el 20 % de este volumen termina en el río tenemos que multiplicar por un factor que lo disminuya

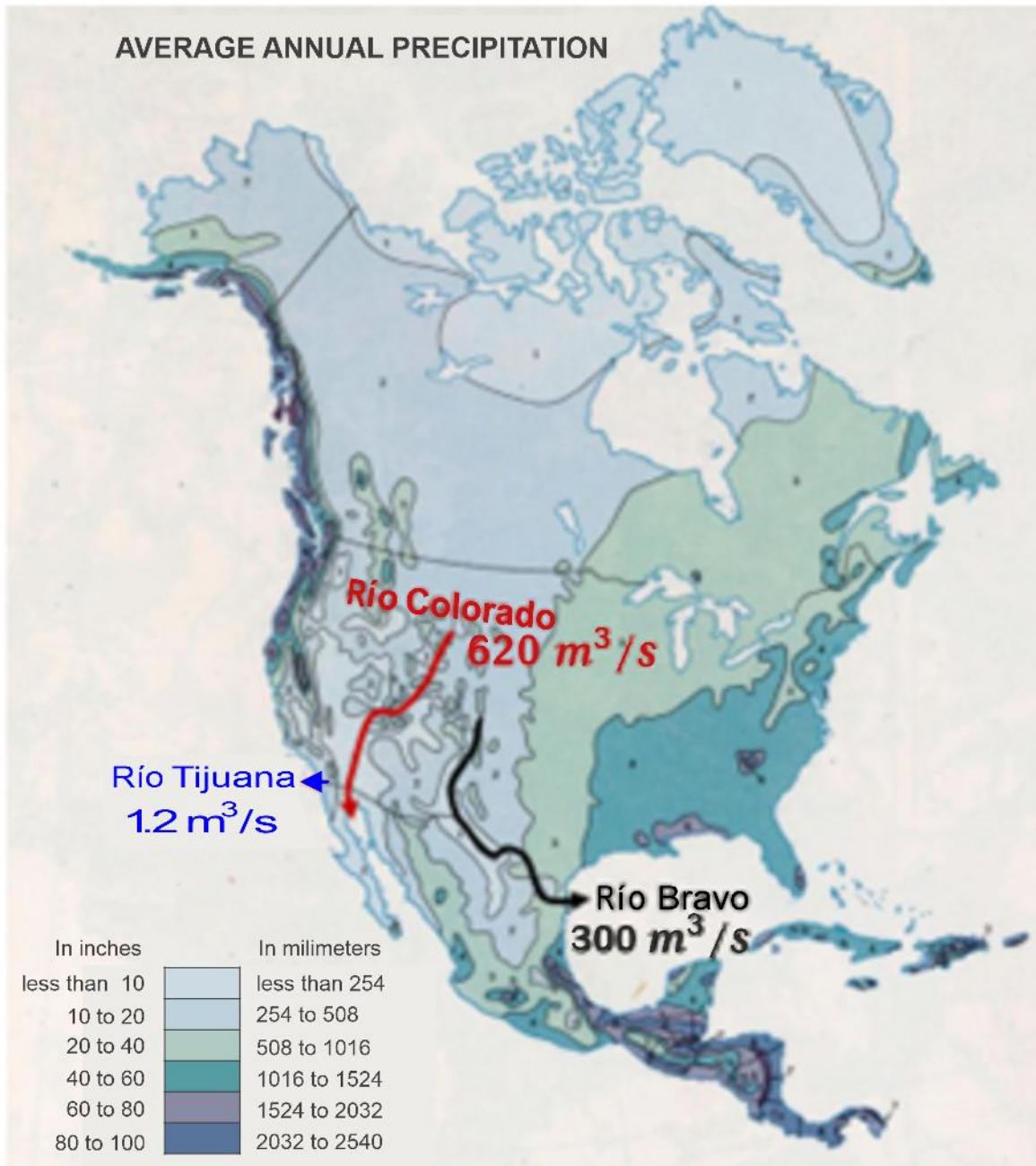


Figura 8. Los tres ríos están en la región donde llueve menos en América del Norte. <https://www.pinterest.com/pin/average-annual-precipitation-map-of-north-america--140807925844939644/>

de acuerdo a este porcentaje. Este factor es $20\% = 20/100 = 0.2$, el cual equivale a la quinta parte porque $0.2 = 1/5$. Multiplicando este factor por el volumen anual de la cuenca tendremos el volumen anual de agua en el río. El resultado es $1,857.7 \times 10^6 \text{ m}^3$. Por lo general a los ríos se les caracteriza por su caudal o gasto en metros cúbicos por segundo (m^3/s). Para calcular el caudal de nuestro río fantástico necesitamos el número de segundos que tiene un año lo cual se puede calcular multiplicando $60 \times 60 \times 24 \times 365 = 31,536,000 \text{ s}$. Esto se puede escribir como $31,536 \times 10^3 \text{ s}$. El caudal es entonces $(1,857.7 \times 10^6 \text{ m}^3) / (31,536 \times 10^3 \text{ s})$.

Realizando las operaciones $(1,857.7/31,536) \times 10^{(6-3)\text{m}^3/\text{s}} = 0.058907 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal es entonces $58.907 \text{ m}^3/\text{s}$. Redondeando a metros cúbicos por segundo tenemos un caudal de $59 \text{ m}^3/\text{s}$.

Es posible llegar más o menos al mismo caudal sin utilizar calculadora. Para eso necesitamos

hacer algunas aproximaciones como suponer que para la superficie del estado podemos utilizar $70,000 \text{ km}^2$ en lugar de $71,450 \text{ km}^2$. De esta manera la superficie en m^2 se puede escribir como $7 \times 10^{10} \text{ m}^2$. Por otra parte 130 mm puede escribirse como $130 \times 10^{-3} \text{ m}$. La multiplicación se puede hacer mentalmente o a lápiz $910 \times 10^7 \text{ m}^3$. Multiplicando ahora por lo que podríamos llamar el factor de escurrimiento de $0.2 = 2 \times 10^{-1}$ resulta $1,820 \times 10^6 \text{ m}^3 \approx 180 \times 10^7 \text{ m}^3$. Por otra parte, el número de segundos en un año es $31,536 \times 10^3 \text{ s} = 3.1536 \times 10^7 \text{ s}$. Despreciando las décimas y demás el número de segundos es aproximadamente $3 \times 10^7 \text{ s}$. Tenemos finalmente que el volumen de agua en el río se puede aproximar como $180 \times 10^7 \text{ m}^3$ y el número de segundos del año como $3 \times 10^7 \text{ s}$. El volumen entre el tiempo nos da un caudal de $60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Es muy útil practicar este tipo de aproximaciones porque se pueden obtener resultados rápidamente sin necesidad de calculadora. Las cantidades que se manejan son gigantescas por lo

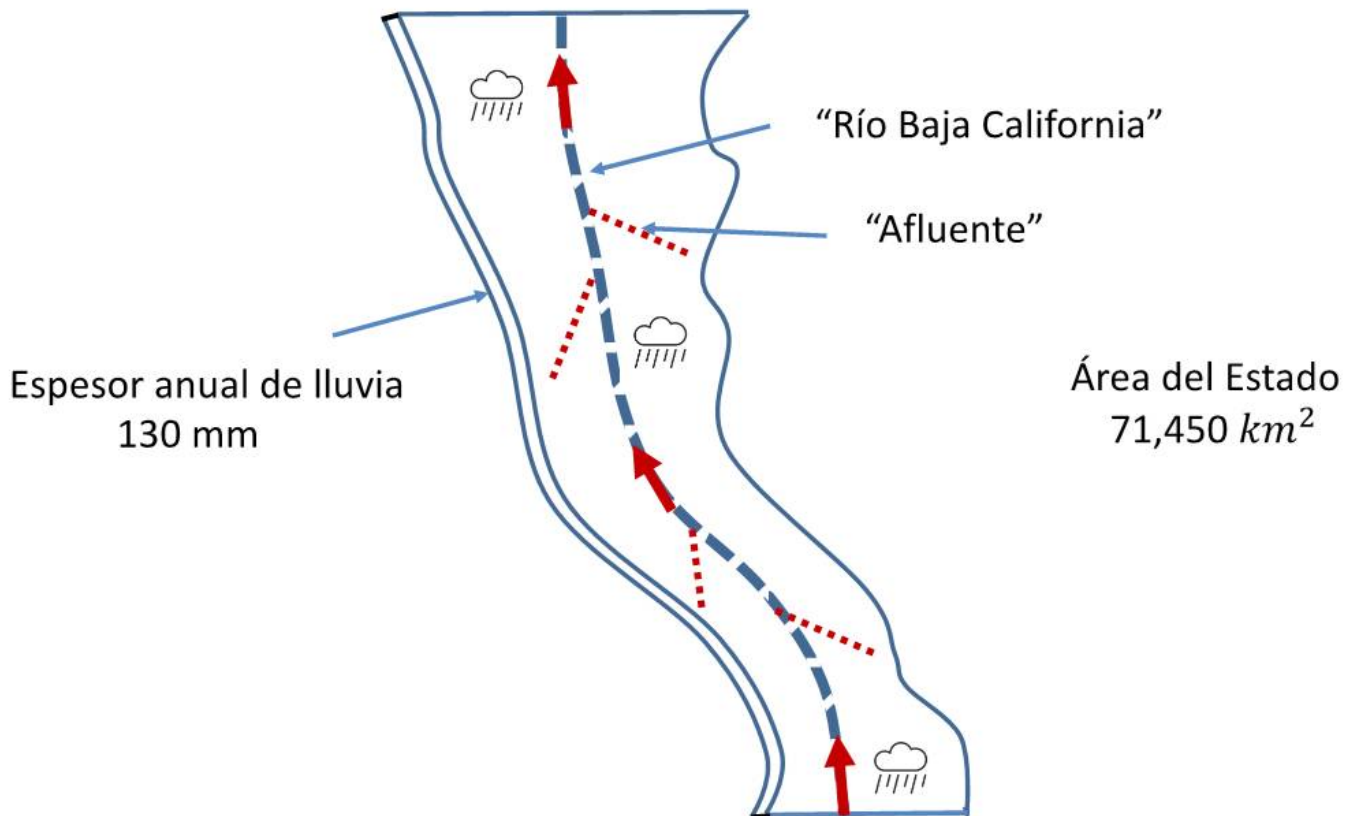


Figura 9. Esquema del río imaginario "Baja California".

que conviene utilizar potencias de diez. Se busca utilizar solo la primera o las primeras dos cifras y todas las demás se pueden suponer que son cero. Veamos en detalle el caso de la superficie del estado: 71,450 km². Este número se puede escribir como (7×10,000+1×1,000+4×100+5×10+0×1) km². Un solo mil no compite con los siete diez mil y menos los 4 cientos y demás. Lo mismo con el número de segundos en un año. En el caso de la precipitación de 130 mm no se aproximó a 100 mm porque tres decenas sí compite con un centenar. Un 30% sería un sacrificio demasiado grande. El cálculo exacto del caudal es de 59 m³/s y el aproximado de 60 m³/s. En cualquier negociación de la CILA se utiliza el mayor número de cifras para que la distribución del agua sea lo más equitativa posible. Sin embargo, los ingenieros de la CILA son expertos en este tipo de aproximaciones para proponer o refutar en cualquier discusión modificaciones al tratado. Depender de la calculadora es demasiado lento, además de que se tiende a cometer errores al introducir cifras y más cifras.

HABLANDO SE ENTIENDE LA GENTE

Después de casi 50 años de reclamaciones y 45 de negociaciones, finalmente en 1944 México y Estados Unidos firmaron un tratado sobre cómo distribuirse las aguas de los ríos internacionales Tijuana, Colorado y Bravo.

Río Tijuana

En el tratado de 1944 se incluye al Río Tijuana porque su cuenca la comparten ambos países como se muestra en la Figura 10. No se dan detalles en el tratado sobre cómo se repartiría el caudal. Tal vez esto se debió a que para ese entonces ya existían presas en sus afluentes para captar el agua a ambos lados de la frontera. En EEUU ya se había construido la presa Morena en 1912 y la presa Barrett en 1923, y en México la presa Abelardo L. Rodríguez en 1936. Las presas en Tecate son más recientes: El Carrizo es de 1978 y Las Auras de 2014. Lo único que quedaba por asignar era el agua que cruza la frontera aguas abajo de la presa Abelardo L. Rodríguez. Se determinó que esa agua se le asignara a Tijuana.

Se puede apreciar que la mayor parte de la cuenca está en México pero termina por desembocar en EEUU. Según el tratado el agua que cruza la frontera es de México. Se podría pensar que EEUU debería compensar de alguna manera esa agua que le llega gratis. Sin embargo, el asunto se complica porque esa agua está contaminada. Tijuana tiene plantas de tratamiento para limpiar el agua de la ciudad, las cuales descargan en el río aguas abajo de la presa Abelardo L. Rodríguez. El problema es que esa agua se combina con aguas residuales de asentamientos irregulares y con escurrimientos de la ciudad. Existe además una planta de tratamiento internacional en la frontera pero el agua no la utiliza ninguno de los dos países. La cuestión es que tratar el agua al nivel de que se pueda comercializar es más económico que desalar agua de mar. En esto se ve una oportunidad: cuesta 5 dólares tratar 1,000 galones del agua del río Tijuana, y 10 dólares tratar también 1,000 galones de agua de mar. Un galón equivale a 3.78 l≈4 l. ¿Cuánto es por metro cúbico?

Río Colorado

La Figura 11 presenta los datos básicos sobre el Río Colorado como el área de su cuenca, su longitud y el escurrimiento anual promedio o volumen anual en unidades de hm³(hectómetros cúbicos). Un hectómetro equivale a 100 metros. Esto es hm = 10² m. Por lo tanto hm³ = hm×hm×hm = 10² m×10² m×10² m = 10⁶m³ = Mm³. El escurrimiento anual promedio de 18,340 hm³ es lo mismo que 18,340 Mm³. En los cálculos para el río fantástico “Baja California” para este volumen encontramos 1,820 Mm³. Esto significa que el volumen anual del río Colorado es aproximadamente 10 veces el de nuestro río inventado.

Para el río “Baja California” calculamos un caudal de 60 m³/s. El caudal del río Colorado sería entonces de 600 m³/s. Podemos calcularlo directamente dividiendo 18,340 Mm³ entre el número de segundos que tiene un año ≈3×10⁷ s. Para hacerlo más fácil escribimos el escurrimiento como ≈ 18×10⁹ m³. A simple vista el resultado de la división es 6×10² m³/s. El río Colorado es entonces un río de categoría 2. El Nilo es 3, el

Misipi 4 y el Amazonas 5. Nuestro río fantástico es categoría 1 y el río Tijuana categoría 0.

La comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) se reúne periódicamente para resolver problemas como el que se plantea en la Figura 11. Si se tiene comprometida más agua de la que provee el río, se tienen que hacer reducciones. Todos los usuarios del río, desde Wyoming hasta Baja California deben disminuir su consumo. El tratado establece que se aplicará el mismo porcentaje a todos los estados. La asignación a México se suministra de forma controlada a lo

largo del año utilizando presas en EEUU. La presa Morelos en Mexicali es una presa para distribuir el agua de riego y no tiene la capacidad para almacenar la asignación anual.

Pensar en volúmenes de miles de millones de metros cúbicos anuales es un reto a la imaginación. Un año es mucho tiempo y por eso se junta muchísima agua. Por otro lado, un metro cúbico es un cubo de un metro de lado y un segundo es lo que nos toma caminar un metro. Estas unidades de metros cúbicos y segundos son más de nuestro tamaño. Pensemos

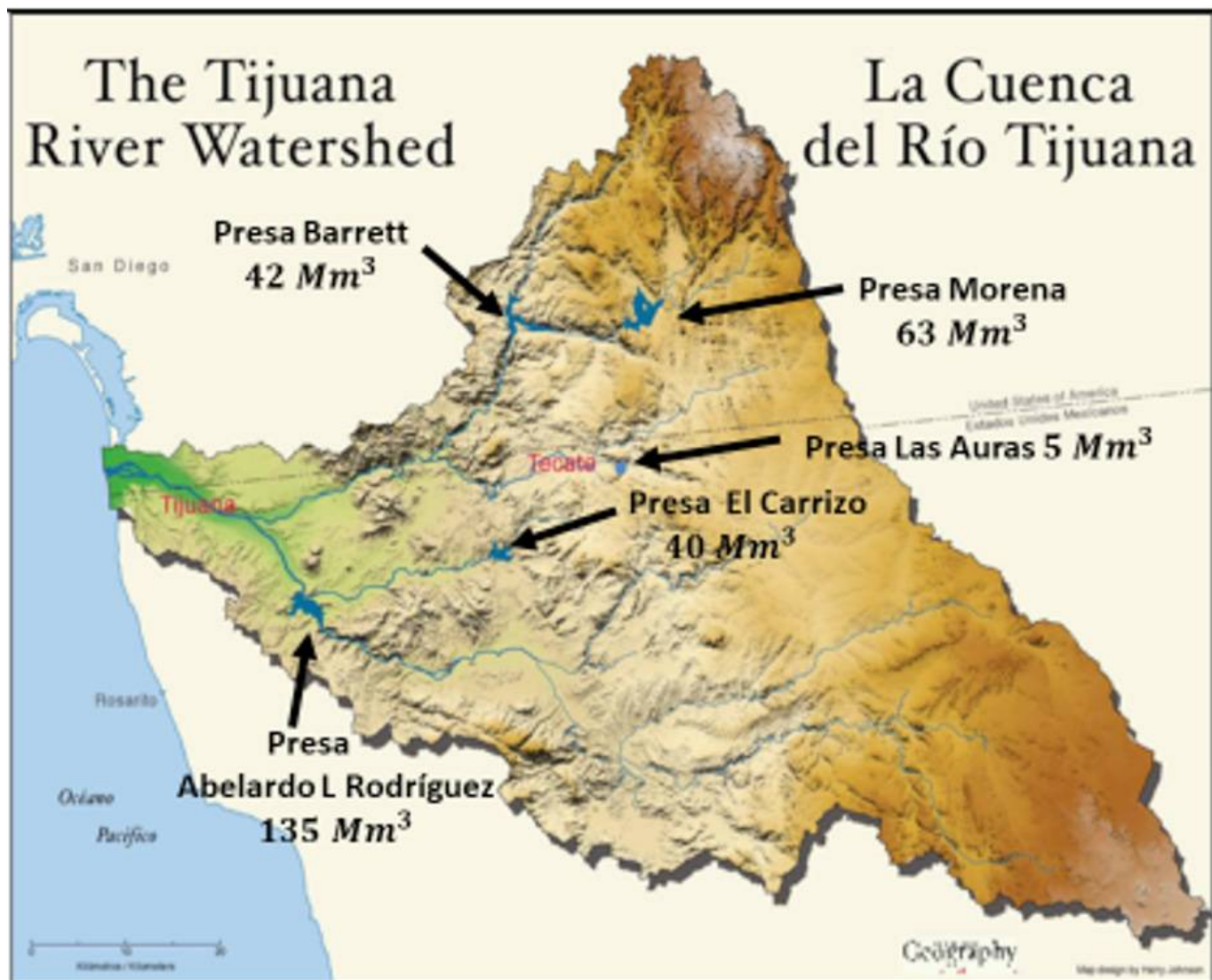


Figura 10. Cuenca del Río Tijuana. <https://trw.sdsu.edu/>

en un río cuyas aguas avanzan a una velocidad de un metro por segundo que es la velocidad de caminar. Si el caudal del río es el de nuestro río fantástico de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ podemos imaginarlo de 60 metros de ancho y uno de profundidad. El agua fluye atravesando un área de $60\text{m}\times 1\text{m}=60 \text{ m}^2$. En un segundo el agua se mueve un metro en la dirección del flujo, por lo que el volumen que cruza esa área es $60\text{m}^2\times 1\text{m}=60\text{m}^3$, pero como este volumen cruza en un segundo, tenemos que el flujo es de $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Equivalentemente podemos imaginar que el río tiene 30 metros de ancho y dos de profundidad. O bien 15 de ancho y 4 de profundidad, más o menos el ancho de una calle y la altura de una casa de dos pisos, respectivamente. La asignación anual a México que se muestra en la Figura 12 se puede expresar como $\approx 18\times 10^8 \text{ m}^3$. El año tiene $\approx 3\times 10^7 \text{ s}$. A simple vista el volumen entre el tiempo nos da $6\times 10^1 \text{ m}^3/\text{s}=60 \text{ m}^3/\text{s}$. La asignación del río Colorado a México es equivalente al caudal de nuestro río fantástico.

Río Bravo

Los datos básicos de la cuenca del río Bravo se presentan en la Figura 13. Se puede observar en el mapa que casi todos los afluentes están en el lado mexicano. En el tratado se establece que ambos países deberán compartir el agua en partes iguales. Ambas partes estaban conscientes de que el agua no era suficiente para satisfacer sus necesidades incluyendo las agrícolas. Para saber cuánta agua les correspondería se sumaron todas las aportaciones anuales al río, las cuales llegaron a un total de $10,000 \text{ Mm}^3$, por lo que les tocarían $5,000 \text{ Mm}^3$ a cada uno. El escurrimiento que se reporta en la Figura 13 es parcial y no se refiere al río en su totalidad. Comparativamente, el caso del río Colorado es mucho más simple que la distribución de las aguas del río Bravo. Técnicamente el problema es mucho más complicado.



Figura 11. Datos básicos de la cuenca del Río Colorado.

La asignación a EEUU también es anual pero no es obligatorio cumplirla año con año, pues puede diferirse hasta por cinco años en tiempos de sequía. Las asignaciones anuales se acumulan como deuda que tendrá que pagarse al final del ciclo de cinco años. Si hay deuda al final del ciclo se puede posponer otros cinco años, pero no más. Hace cinco años, en 2020, se cumplió un segundo ciclo en donde el pago de la deuda era mandatorio, de ahí los problemas en Chihuahua. Siempre se ha cumplido con el compromiso, pero por lo general las asignaciones se retrasan y al final se producen conflictos. En octubre de 2025 se acaba un primer ciclo de cinco años y la deuda se acumula. Por lo pronto, el traspaso desde la presa el Cuchillo es un respiro.

En la Figura 14 se menciona que se le asigna a EEUU una tercera parte del agua que llegue a la corriente principal. Se establece además que esta cantidad no será menor a 432 Mm³ anuales. Esto parece indicar que México comparte solamente la tercera parte del río Bravo en lugar de la mitad. Lo que pasa es que ese tercio es lo que falta para completar el 50 %. Previo al tercio se establece que todo lo que llueve en EEUU se le asigna a ese país. Por su parte México no comparte los ríos Álamo y San Juan. En la práctica la distribución se hace mediante las presas internacionales Falcón (1954) y la Amistad (1969) que se construyeron a lo largo del río Bravo.



Figura 12. Volumen de agua del río Colorado que le corresponde a México.

Veamos a cuantos metros cúbicos por segundo equivalen los millones de metros cúbicos quinquenales (no quincenales) que se entregan a EEUU. La cantidad que se muestra en la Figura 15 se puede escribir como $\approx 21 \times 10^8 \text{ m}^3$. Considerando que un año tiene $\approx 3 \times 10^7 \text{ s}$ y suponiendo que en lugar de pagar en cinco años se hace en un año, el caudal equivalente es $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Pero como es en cinco años la deuda anual es equivalente a $14 \text{ m}^3/\text{s}$. Podemos obtener esta misma cantidad utilizando la deuda que se muestra en la Figura 14 de 431.721 Mm^3 anuales que se puede aproximar como $\approx 43 \times 10^7 \text{ m}^3$. Dividiendo por el número de segundos en el año $\approx 3 \times 10^7 \text{ s}$ nos da $\approx 14 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto confirma que lo que le debemos entregar a EEUU anualmente es el equivalente a un río con caudal de $14 \text{ m}^3/\text{s}$.

La Figura 15 resume cómo se realiza la distribución de las aguas de los ríos Bravo y Colorado entre los dos países. Se mencionan seis ríos cuyas localizaciones se muestran en la Figura 16. El río Conchos en Chihuahua es el más caudaloso con $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Los otros cinco están en el estado de Coahuila y sus caudales son: San Diego 3, San Rodrigo 4, Escondido 2, Salado 10 y Arroyo Las Vacas 1 m^3/s . Como se analizó anteriormente, $1 \text{ m}^3/\text{s}$ parece poco pero alcanza para las necesidades de medio millón de personas. En total los cinco suman $20 \text{ m}^3/\text{s}$, que incluyendo al río Conchos, da un total de $120 \text{ m}^3/\text{s}$.

El tratado no dice que se entregue a EEUU $1/3$ de los $120 \text{ m}^3/\text{s}$ que es el caudal total de los seis ríos. Lo que dice es que se entregue $1/3$ de lo que llegue de esos ríos al cauce principal. Como



Figura 13. Datos básicos de la cuenca del río Bravo

el Conchos y el Salado tienen presas pueden no llevar nada de agua al cauce principal, por eso se establece el mínimo de 14 m³/s. Los otros cuatro ríos suman 10 m³/s, San Diego 3, San Rodrigo 4, Escondido 2 y Arroyo Las Vacas 1 m³/s. Faltan 4 para completar los 14. La inclusión del Conchos es importante porque es el único que está aguas arriba de la presa Amistad. En otras palabras, si se excluye al Conchos la presa Amistad no recibe agua de México. Por su parte, el río Salado descarga aguas arriba de la presa Falcón. Los ríos que están excluidos del tratado son el Álamo y el San Juan, los cuales desembocan aguas abajo de la presa Falcón. Por eso es extraña la nota periodística sobre la presa El Cuchillo.

LO QUE CUESTA SUBIR AGUA POR LA RUMOROSA

En la Figura 2 se mostró un esquema del perfil del acueducto Colorado-Tijuana y de la infraestructura necesaria para su funcionamiento, como las estaciones de bombeo y la presa El Carrizo. La construcción del acueducto se inició en 1975 y empezó a funcionar en una primera etapa en 1982. Se completó en 1985 transportando 4,000 litros por segundo. Actualmente transporta 6,000 litros por segundo. Preguntas del público: 1) Si por persona se consumen 200 litros diarios: ¿Para cuántas personas alcanza esta cantidad de agua? 2) El acueducto descarga en la presa El Carrizo cuya capacidad es de 40 Mm³: ¿Cuánto tiempo duraría el agua de la presa si se suspendiera el



Figura 14. La entrega mínima de agua a EEUU es de ≈432 Mm³ anuales.

flujo del acueducto? 3) ¿A qué velocidad viaja el agua por el acueducto? 4) ¿Cuánta energía se necesita para subir esa cantidad de agua por La Rumorosa?

Un litro de agua tiene una masa de un kilogramo, elevarlo 1000 metros requiere una energía o trabajo que se puede calcular con la fórmula $E=mga$, donde E es la energía, m la masa, g la aceleración de la gravedad y a la altura a la que se eleva la masa. Haremos los cálculos para un litro y después simplemente multiplicamos por el número de litros. La masa $m=1$ kg, la gravedad $g=9.8 \text{ m/s}^2 \cong 10 \text{ m/s}^2$ y la altura $a=1,000$ m. El resultado es $E=10,000$ J (julios). Esta energía es la misma independientemente de qué tan rápido se eleve el litro de agua. Conviene suponer que el tiempo de subida sea de un segundo porque

el caudal o gasto del acueducto es en litros por segundo. La potencia o energía por unidad de tiempo viene dada como $P=E/t=(10,000 \text{ J})/(1 \text{ s})=10,000 \text{ W}$ (vatios). Conviene utilizar $1 \text{ kW}=1,000 \text{ W}$ por lo que la potencia que se requiere para elevar un litro en un segundo es 10 kW . Como por el acueducto suben 6,000 litros en un segundo la potencia total es de $60,000 \text{ kW}=60 \text{ MW}$, donde M significa mega o millón. El cálculo que hacemos aquí no toma en cuenta que también se requiere energía para mover horizontalmente el agua para vencer la fricción con la tubería.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) cobra la energía que utilizamos, o sea la potencia multiplicada por el tiempo. Un horno eléctrico de cocina que utilice $1,000 \text{ W}$ o equivalentemente 1


DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL RÍO BRAVO			
	Cantidad Anual Mm ³	Cantidad Quinquenal Mm ³	Tributarios
2/3 partes			
Asignaciones a México 		4, 317 210 000	Río Conchos Río San Diego Río San Rodrigo Río Escondido Río Salado Arroyo de Las Vacas
1/3 parte			
Asignaciones a Estados Unidos 		2, 158, 605 000	Río Conchos Río San Diego Río San Rodrigo Río Escondido Río Salado Arroyo de Las Vacas
DISTRIBUCIÓN DE LAS AGUAS DE LA CUENCA DEL RÍO COLORADO			
Asignaciones a México 		1, 850 234 000	

Figura 15. Tributarios del río Bravo cuyas aguas se comparten con EEUU y la distribución de las aguas de la cuenca del río Colorado.

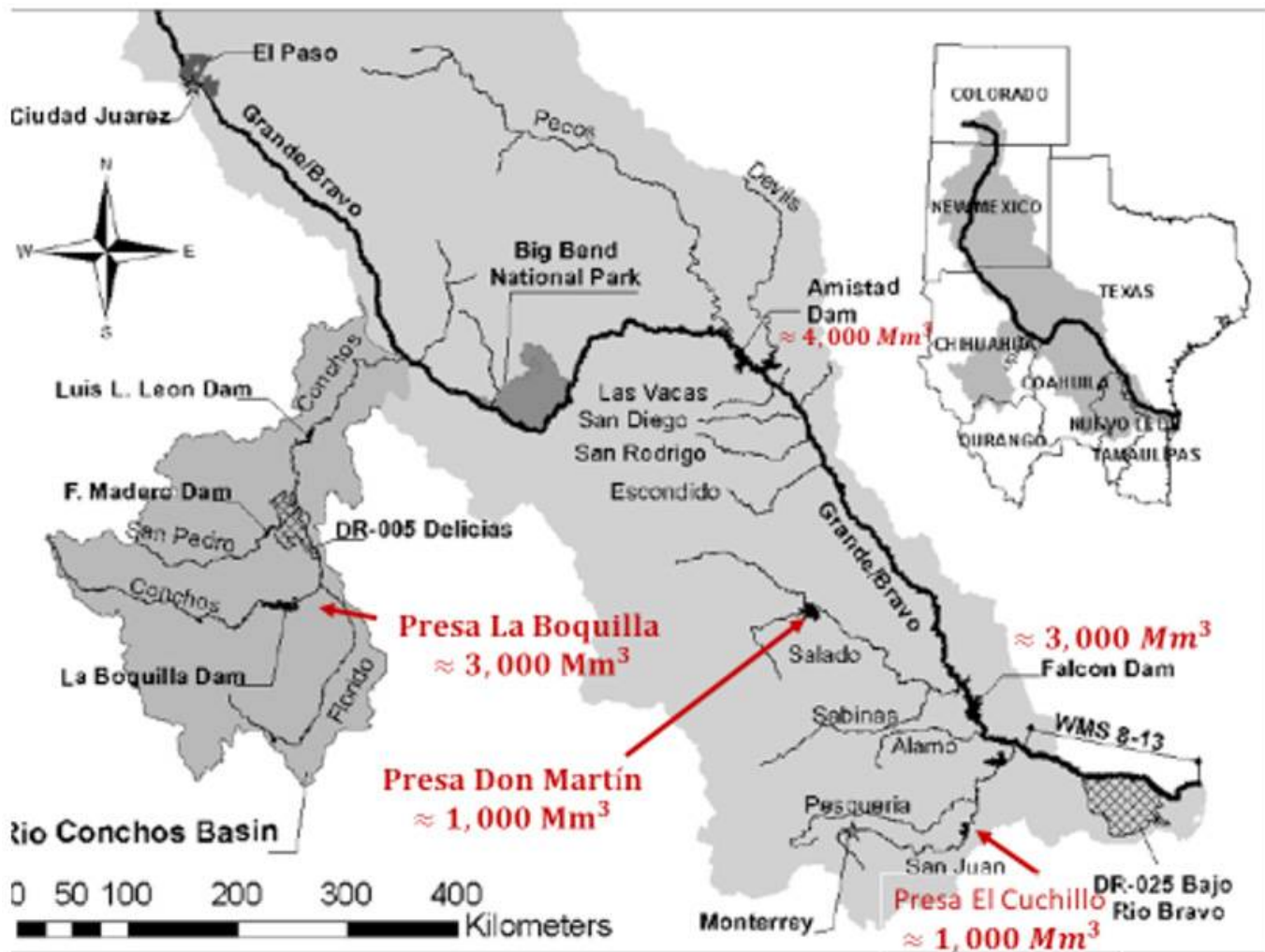


Figura 16. Río Bravo y sus afluentes. La entrega de agua a EEUU se realiza principalmente mediante las presas internacionales Amistad y Falcón. https://www.researchgate.net/figure/Rio-Grande-Bravo-Basin_fig1_269091665

kW de potencia y que esté en operación una hora utilizará 1 kWh de energía, cuyo costo puede variar desde un peso a cuatro pesos dependiendo del consumo. Los 60 MW son equivalentes a 60,000 kW, los cuales si se mantienen en operación por una hora representarán 60,000 kWh. Si se cobran a un peso serán 60,000 pesos por hora y si a cuatro pesos 240,000 pesos por hora. Esto es mucho dinero por hora, pero veamos cuánto es por metro cúbico. En una hora se reciben en la presa El Carrizo $(6 \text{ m}^3/\text{s}) \times 60 \times 60 \text{ s} = 6 \times 3,600 \text{ m}^3$. El resultado es $21,600 \text{ m}^3 \approx 20,000 \text{ m}^3$. Dividiendo los pesos entre los metros cúbicos tenemos que el costo de la electricidad será de entre 3 y 12 pesos/ m^3 según la tarifa de la CFE.

También es interesante saber cuánto tiempo tarda el agua para llegar desde Mexicali a la presa El Carrizo, a 100 km de distancia. Calculemos primero la velocidad, para lo cual necesitamos el área transversal del acueducto. Su diámetro es de $1.22 \text{ m} \approx 1.2 \text{ m}$ por lo que su área será $A = \pi r^2 = 3.14 \times 0.6^2 \approx 3 \times 0.36 \approx 1 \text{ m}^2$. Sabemos que el gasto $Q = v \times A$ por lo que $6 \text{ m}^3/\text{s} = v \times 1 \text{ m}^2$. Aquí ni siquiera es necesario despejar la velocidad. Es claro que $v = 6 \text{ m/s}$. Para convertir la velocidad a km/h multiplicamos por $(1) \times (1) = ((1 \text{ km}) / (1,000 \text{ m})) \times ((60 \times 60 \text{ s}) / (1 \text{ h}))$. Esto es lo mismo que $3.6 \text{ (km s)} / (\text{m h})$. Tenemos entonces $v = 6 \text{ (m/s)} \times 3.6 \text{ (km s)} / (\text{m h}) = 6 \times 3.6 \text{ km/h} = 21.6 \text{ km/h} \approx 20 \text{ km/h}$. El agua que entra al acueducto en Mexicali tarda 5

horas en llegar a la presa El Carrizo, pero esto no se nota porque el flujo es continuo. De ahí pasa a la planta potabilizadora El Florido para después distribuirse en Tijuana y Rosarito y enviar a Ensenada 100 l/s los cuales representan el 1.7 % de los 6,000 l/s del acueducto.

Encontramos más arriba que llegan a El Carrizo 21,600 m³ en una hora. En ese cálculo no intervienen directamente la velocidad de agua ni el área del acueducto. Veamos ahora qué se obtiene si utilizamos la velocidad del agua y el área del acueducto. Queremos saber el gasto del acueducto en unidades de m³/h, lo que nos daría la cantidad de m³ que llegan al El Carrizo en una hora. El gasto se puede calcular como $Q=v \times A$. La velocidad $v=21.6$ km/h y el área $A=1$ m². La velocidad $v=21.6$ km/h=21,600 m/h que multiplicados por el área $A=1$ m² da como resultado $Q=21,600$ m³/h. Con esto comprobamos que la velocidad del agua en el acueducto es compatible con lo que llega a El Carrizo en una hora.

En el siglo III llegaba agua a Roma a través de 11 acueductos que sumados tenían una longitud de 800 km. El volumen de agua era de 1 Mm³/día. Para comparar con el acueducto Colorado-Tijuana necesitamos pasar esta cantidad a l/s. ¿Recibía más Roma que Tijuana?

La presa La Boquilla en Chihuahua produce 25 MW de electricidad. Se aprovecha que el agua está a mayor altura a un lado del bordo que del otro. El bordo de La Boquilla tiene 80 m de altura. Queremos saber cuántos metros cúbicos por segundo se requieren para producir los 25 MW. Podemos utilizar la fórmula de la energía potencial $E=mga$, donde m es la masa, g la aceleración de la gravedad y a la altura. En lugar de energía suponemos energía por segundo (potencia) y en lugar de masa, masa por segundo. La fórmula es ahora $P=m_s g a$, donde P es potencia en W y m_s es en kg/s=l/s. Podemos entonces obtener directamente los l/s que se necesitan para producir determinados W utilizando la fórmula $m_s=P/ga$. Por lo tanto $m_s=(25 \times 10^6)/(10 \times 80)=25/8 \times 10^4 \cong (24/8) \times 10^4=30 \times 10^3$ l/s=30 m³/s.

LA MULTIPLICACIÓN Y DIVISIÓN DE LAS AGUAS

Multiplicación

Para cosechar cultivos que requieren hasta 1,000 litros de agua por metro cuadrado en zonas donde apenas si llueve 100, es cuestión de ingeniárselas. Las presas permiten regar plantíos a voluntad, llueve o no llueve y en la cantidad requerida. Controlan además las inundaciones y pueden producir energía eléctrica. Las principales presas del río Bravo se indican en el mapa de la Figura 16, y las del Colorado en la Figura 17. Se puede observar que las presas del río Colorado tienen capacidades 10 veces mayores que las del río Bravo, aunque solo tiene el doble del caudal. La presa Morelos en Mexicali tiene muy poca capacidad de almacenaje, se utiliza solo para distribuir el agua en los distritos de riego de Baja California y Sonora. En el tratado de 1944 se contempla asignar anualmente 1,850 Mm³ $\approx 2 \times 10^9$ m³ para regar 200,000 ha = 2×10^9 m². Dividiendo el volumen por el área obtenemos la altura que alcanzaría el agua sobre el área de riego. La aproximación hace que la operación sea obvia sin necesidad de calculadora. La altura es un metro, mil milímetros o mil litros por metro cuadrado cada año. Esto es lo que se requiere para cosechar maíz, alfalfa o algodón, entre otros cultivos. En las áreas de riego ciertamente se multiplica la precipitación natural. Sin embargo, como se hace artificialmente esto deberá compensarse en alguna otra parte con una división.

División

La mayor parte del uso del agua en el mundo es para la agricultura, con 70%, industria 20 % y solo 10 % para usos domésticos. Con el agua de la cuenca del río Bravo se riegan casi un millón de hectáreas y la utilizan 15 millones de personas en sus casas. En EEUU se aprovechan sus aguas en los estados de Colorado, que es donde nace, Nuevo México y Texas, y en México, en Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. Solo el 5 % del caudal natural llega a la desembocadura del río. En otras palabras, los humanos usan en la agricultura y otros fines el 95 % del agua de la cuenca del río Bravo. Se puede calcular que el 5 % que llega al mar es ≈ 14 m³/s, lo cual es lo

mismo que entrega México a EEUU por el tratado. Esta agua es de los dos países y podrían decidir utilizarla aguas arriba en la agricultura regando $\approx 25,000$ hectáreas (ha) al año cada uno. Para llegar a este número consideren el caso del río Colorado que con $600 \text{ m}^3/\text{s}$ riegan dos millones de hectáreas, lo cual se reduce a 0.3 l/s por hectárea. Lo mismo se obtiene considerando los $60 \text{ m}^3/\text{s}$ para regar 200 mil hectáreas en Mexicali. Sin embargo, si se decidiera usar $14 \text{ m}^3/\text{s}$ aguas arriba, el río Bravo se quedaría seco. ¿Se puede uno imaginar al río Bravo sin agua?

El que sí se quedó sin agua es el delta del río Colorado. Hace décadas que no llega agua al mar de Cortés, excepto por el evento “flujo pulso” en 2014, cuando se liberaron 105,000 acres-pies en 2 meses para estudiar la recuperación del delta. Hubo un segundo pulso en 2021 que duró 5 meses donde se liberaron 35,000 acres-pies. Para comparar estas cantidades con el caudal del río de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ hay que convertir los acres-pies a metros cúbicos: $\text{acre-pie}(0.3\text{m}/\text{pie})(0.4 \text{ ha}/\text{acre})=0.12 \text{ m ha}$. Ahora hay que convertir una ha en m^2 . El resultado es $\text{acre-pie}=1,200 \text{ m}^3$. Por lo tanto el volumen sumado de los dos pulsos es $14 \times 1.2 \times 10^7 \text{ m}^3$, donde se utiliza el exponente 7 para facilitar la operación porque el volumen se va a dividir por $3 \times 10^7 \text{ s}$, el número de segundos en un año. El resultado es $\approx 6 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto significa que del caudal anual del río Colorado se ha dejado pasar al delta el equivalente al 1%, no año con año, sino un solo año en seis décadas. Esto contrasta con el 5 % del caudal del río Bravo que se deja pasar a la desembocadura, este sí, año con año, de tal forma que siempre hay agua fluyendo. Tal vez, más que conservar el ecosistema, lo que ha pesado más en la decisión es que el agua de cierta manera funciona como muro en la frontera. En el delta del Colorado no pasa nada, ni agua, tal vez porque no es frontera internacional.

LAS POTENCIAS DE DIEZ LE VAN BIEN A BAJA CALIFORNIA

Los números del agua de Baja California resultan muy fáciles de imaginar y recordar para el caudal del río Colorado, la asignación a México

y el acueducto Colorado-Tijuana. Estos son, respectivamente: 600, 60 y $6 \text{ m}^3/\text{s}$. En otras palabras, si el caudal del río es 100 unidades, entonces llegan a Mexicali 10, y de esos 10 se envía 1 a Tijuana. Buscando en los medios de comunicación una cantidad de agua que resultara ser el 10 % del caudal del acueducto lo encontramos en Mexicali. Recordarán que hace varios años se anunció la cancelación de una planta cervecera que se estaba construyendo en Mexicali, en la zona agrícola, en la que se planeaba utilizar anualmente 20 Mm^3 . Para dimensionar esta cantidad vamos a dividir este volumen por los segundos que tiene un año $\approx 3 \times 10^7 \text{ s}$. Recordando que M significa millón o sea 10^6 el volumen se puede escribir como $2 \times 10^7 \text{ m}^3$ por lo que la división se reduce simplemente a $2/3 \approx 0.6 \text{ m}^3/\text{s}$. Tenemos así cuatro cantidades que se van reduciendo por un factor de 10 en Baja California: 6×10^2 , 6×10^1 , 6×10^0 y 6×10^{-1} metros cúbicos por segundo. Suertudo el Estado, le van bien las potencias de diez.

En cuanto al río Bravo, su caudal de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ es la mitad del Colorado y se reparte entre los dos países en partes iguales. Para ser equitativo México le entrega aproximadamente el 5 % a EEUU, dejando ambos países otro 5 % para que llegue al mar. De México a EEUU $14 \text{ m}^3/\text{s}$ y de EEUU a México $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Por cada litro entregado en el Bravo, se reciben cuatro en el Colorado.

EL INCREIBLE USO DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTOS

No van a creer la información que se presenta en la Figura 18. Un litro de leche requiere para su producción de 1,000 litros de agua. En otras palabras, se requieren 5 tambos de agua de 200 litros, de esos que se utilizan para la basura, para producir un solo litro de leche. A esto le llaman la huella hídrica de la leche. Todos los alimentos tienen su huella hídrica. Una que es simple de calcular es la del maíz. Utilizaremos 8 toneladas por hectárea como productividad típica, y supondremos que se regó con 1,000 mm de agua, ya sea de lluvia o tomada de alguna presa. 1,000 mm es lo mismo que 1,000 litros por metro cuadrado ($10^3 \text{ l}/\text{m}^2$). Una hectárea equivale a 10^4 m^2 por lo que el volumen total de agua utilizado es



Figura 17. Río Colorado y sus afluentes. La entrega de agua a México se hace de forma programada a lo largo del año mediante diferentes presas como la Hoover y Glen Canyon. https://www.wikiwand.com/es/articles/Lago_Granby#/media/Lago_Granby|Archivo:Coloradorivermapnew.jpg

$10^3 \text{ l/m}^2 \times 10^4 \text{ m}^2$. Tenemos entonces un volumen de 10^7 litros para producir 8 toneladas u $8 \times 10^3 \text{ kg}$. Dividiendo los litros por los kg obtenemos 1,250 l/kg, que es aproximadamente lo mismo que en la figura. Suponiendo que salen 30 tortillas de un kg de maíz, se necesitan ≈ 40 litros por cada tortilla, dos garrafones de 20 litros. ¿Dos garrafones de agua para producir una tortilla? Así es.

A la huella hídrica también se le llama agua virtual porque es la cantidad de agua que se necesita para obtener un producto pero que ya no está en el producto y no la vemos. El promedio mundial de agua virtual per cápita es de 1,400 metros cúbicos por año. ¿Cuánto utilizamos per cápita al año en los domicilios, suponiendo un promedio de 200 litros por día? Verán que el agua que utilizamos en las casas es un porcentaje pequeño del agua



Figura 18. Litros de agua que se requieren para producir diferentes alimentos

virtual. Otra forma de dimensionar la magnitud del agua virtual es utilizando la importación de alimentos. México es un importador neto de agua virtual, o sea que importamos más de lo que exportamos, principalmente por la importación de carnes y cereales. Por ejemplo, año con año importamos 20 millones de toneladas de maíz amarillo, principalmente para consumo animal en la producción de carne de res, cerdo, pollo, huevo y leche. Nos preguntamos por la cantidad de agua que se necesita para producir esos 20 millones de toneladas de maíz. Supongan una producción de 10 toneladas por hectárea. Hagan el cálculo en m^3/s y comparen con el caudal del río Colorado. Se van a sorprender.

Para concluir, volvamos a la comida de todos los días haciendo suposiciones razonables. Por ejemplo, que 20 huevos pesan un kg. Utilizando la tabla de la huella hídrica obtendremos que para producir un huevo se necesita casi un tambor de agua, al que para llenarlo solo le faltaría una tortilla. ¿Increíble? Espérense a la carne de res. De un kg de carne de res pueden salir 20 tacos de carne asada. Hagan sus cuentas. La carne en un taco necesita para su producción varios tambors de agua. ¿Con aguacate y salsa? ¿Otro taco?

RECOMENDACIONES

Leer la guía varias veces y buscar entre líneas las posibles preguntas. Ubiquen en los mapas los ríos y presas. Con lápiz y papel rehagan las operaciones. Practiquen las aproximaciones de los ejemplos. Y sobre todo, pregunten si no saben algo. Hagan búsquedas de la huella hídrica de otros productos. Discutan entre ustedes y con sus maestros. Formen pequeños grupos y repártanse las secciones, luego se explican unos a otros. Vean en YouTube videos al respecto, particularmente los del Dr. Samuel Sandoval, profesor de la Universidad de California Davis y experto en el tratado y sus detalles, son en español.

EL EXAMEN

El examen consistirá de 100 preguntas y tendrá una duración máxima de 2 horas. Se recomienda traer calculadora, aunque si practican las aproximaciones que se explicaron podrán resolver las preguntas más rápido sin calculadora.

INSCRIPCIONES

Es muy conveniente que se preinscriban a más tardar unos días antes del concurso, ya sea en forma individual o en grupo por correo electrónico, según se indica en esta página. Haciéndolo así nos permite planear mejor la cantidad de exámenes que debemos imprimir, etc.

Por lo general recibimos alrededor de 90 participantes. Aunque nunca hemos puesto límite, de ser necesario limitaremos a 100 el número de participantes. Habrá pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado. De 8:00 a 10:00 AM serán las inscripciones. A las 10:00 AM inicia el examen y se termina a las 12:01 PM. Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios incluyendo la red sísmológica donde se analizan las señales de los sismos que ocurren en Baja California, Sonora y el Golfo de California principalmente.

Las premiaciones se harán de 2:00 a 3:00 PM. Saludos cordiales y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño.
Coordinador de las Olimpiadas

LAS 100 PREGUNTAS DEL EXAMEN

1. Altura que hay que vencer para subir el agua de Mexicali por La Rumorosa en el acueducto Colorado-Tijuana:

- a) 1 km b) 100 m c) 2,000 m d) 1.5 km

2. Longitud del acueducto Colorado-Tijuana:

- a) 10 km b) 60 km c) 50 km d) 100 km

3. El acueducto Colorado-Tijuana conduce:

- a) 60 m³/s b) 600 l/s
c) 60 l/s d) 6,000 l/s

4. Los 150 Mm³ que se tomaron de la presa El Cuchillo en enero de 2025 para abono de la deuda con EEUU, equivalen al agua acumulada por un año de un río con caudal de:

- a) 5 m³/s b) 500 l/s
c) 0.5 m³/s d) 14 m³/s

5. Un río con un flujo de 1 m³/s puede suplir las necesidades de agua de una ciudad con un máximo de habitantes. Suponiendo un consumo de 200 litros de agua por habitante por día, el máximo de habitantes es:

- a) 130,000 h b) 230,000 h
c) 330,000 h d) 430,000 h

6. La respuesta a la pregunta 4 es cierto número de m³/s. La respuesta a la pregunta 5 es el número de habitantes por cada m³/s. Por lo tanto, multiplicando el número de la pregunta 4 por el de la pregunta 5, obtenemos el número máximo de habitantes que por un año podrían consumir 200 litros por día con los 150 Mm³. El número de habitantes es:

- a) 650,000 h b) 1,150,000 h
c) 1,650,000 h d) 2,150,000 h

7. La presa La Boquilla en Chihuahua tiene una capacidad máxima de ≈4,000 Mm³. En octubre de 2024 la presa estaba al 15 % de su capacidad máxima. ¿Cuánta agua le faltaba para llenarse?

- a) 600 m³ b) 3,400 Mm³
c) 6,000 Mm³ d) 3,750 Mm³

8. En el año 2022 en Mexicali se recibieron ≈100 Mm³ menos de lo que normalmente se recibe del río Colorado que son ≈2,000 Mm³. ¿Qué porcentaje se recibió en relación a lo normal?

- a) 10% b) 5% c) 90% d) 95%

9. La disminución de 2022 del río Colorado a Mexicali se puede expresar en m³/s para ese año. ¿Cuántos m³/s?

- a) 3 m³/s b) 1 m³/s
c) 6 m³/s d) 2 m³/s

10. Esta disminución comparada con el caudal o gasto del acueducto Colorado-Tijuana es:

- a) un tercio
- b) la mitad
- c) igual
- d) el doble

11. En la nota de febrero de 2024 de la cadena NBC News se reporta que en los últimos 5 años, se han echado al río Tijuana y cruzado la frontera, 100 billones de galones de drenaje sin tratar, desechos industriales y escurrimientos de la ciudad. Los billones son billones americanos, que equivalen a 1,000 millones. ¿A cuánto equivale en m^3/s en cinco años el volumen mencionado?

- a) $12.5 m^3/s$
- b) $10 m^3/s$
- c) $5 m^3/s$
- d) $2.5 m^3/s$

12. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS): ¿Cuántos litros de agua diarios requiere como mínimo una persona para satisfacer sus necesidades de consumo e higiene?

- a) 200 litros
- b) 100 litros
- c) 360 litros
- d) 60 litros

13. ¿Cuál es el promedio en México del consumo de agua por habitante?

- a) 360 litros
- b) 260 litros
- c) 200 litros
- d) 100 litros

14. ¿Cuál es el promedio en Mexicali del consumo de agua por habitante?

- a) 360 litros
- b) 260 litros
- c) 200 litros
- d) 100 litros

15. ¿Cuál es el promedio en Tijuana del consumo de agua por habitante?

- a) 360 litros
- b) 260 litros
- c) 200 litros
- d) 100 litros

16. ¿Cuál es el promedio en Ensenada del consumo de agua por habitante?

- a) 360 litros
- b) 260 litros
- c) 200 litros
- d) 100 litros

17. ¿Cuál es el promedio en San Diego del consumo de agua por habitante?

- a) 400 litros
- b) 500 litros
- c) 600 litros
- d) 800 litros

18. Para subir el agua por un tubo se necesita empujarla de alguna manera. Así como un abanico en un tubo empuja aire también puede empujar agua. El acueducto funciona con abanicos gigantes llamados estaciones de bombeo. ¿Cuántas estaciones de bombeo hay en el acueducto Colorado-Tijuana?

- a) 4
- b) 5
- c) 6
- d) 7

19. Aproximadamente la mitad de la longitud del acueducto es cuesta arriba y la otra mitad es casi horizontal. En la parte horizontal había que rodear picos en La Rumorosa que, haciendo cálculos, resultaba más práctico y económico perforar las rocas y hacer túneles para continuar con el acueducto. Se perforaron dos túneles, túnel 1 y túnel 2. ¿Cuál es la longitud del túnel 1?

- a) 5 km
- b) 6 km
- c) 7 km
- d) 8 km

20. ¿Cuál es la longitud del túnel 2?

- a) 2 km
- b) 3 km
- c) 4 km
- d) 5 km

21. Las estaciones de bombeo están en la primera mitad del acueducto. Si suponemos que son 6 estaciones la separación promedio entre ellas sería de:

- a) 5 km
- b) 6 km
- c) 7 km
- d) 8 km

22. Una estación de bombeo de determinada potencia puede elevar el agua del acueducto solo hasta cierta altura. Suponiendo que sean 6 estaciones igualmente espaciadas en alturas ¿Cuál sería la diferencia de altura entre las estaciones?

- a) 146 m
- b) 159 m
- c) 167 m
- d) 187 m

23. En una vivienda promedio el lugar donde se utiliza más agua es en:

- a) lavandería b) fregadero
c) sanitario d) regadera

24. En un reporte de la CEABC de enero de 2022 se dice en relación con el acueducto Colorado-Tijuana: "En este año se han bombeado 14,966,765 millones de metros cúbicos, lo que nos representa un gasto promedio de 5,588 l/s". Llama la atención los casi 15 millones de millones de metros cúbicos que se bombearon en un mes. La cantidad bombeada se puede escribir como $\approx 15 \times 10^{12}$ m³. Vamos a suponer que este volumen corresponde a un año. ¿Cuál es el caudal equivalente?

- a) 5×10^2 m³/s b) 5×10^3 m³/s
c) 5×10^4 m³/s d) 5×10^5 m³/s

25. Ninguna de las cuatro opciones de respuesta a la pregunta anterior es realista. La primera es un río de categoría 2 como el Colorado, la segunda es uno de categoría 3 como el Nilo, la tercera es uno de categoría 4 como el Misisipi, y la cuarta es uno de categoría 5 como el Amazonas. Imposible que hayan bombeado por el acueducto esas cantidades en un año, mucho menos en un mes. Obviamente el volumen que da la CEABC no puede ser correcta. Es tan grande la cifra que tal vez se trate simplemente que le sobra la palabra millones. Quitando la palabra millones el caudal recalculado suponiendo de nuevo un año de flujo sería de:

- a) 2.0 m³/s b) 1.5 m³/s
c) 1.0 m³/s d) 0.5 m³/s

26. El cálculo anterior supone que el volumen es lo bombeado en un año, no en un mes como dice la CEABC. Esto hace que el caudal calculado sea 12 veces más pequeño. Multiplicando por 12 las opciones anteriores se obtienen las siguientes, ¿Cuál es la correcta?:

- a) 24 m³/s b) 18 m³/s
c) 12 m³/s d) 6 m³/s

27. Ahora sí, con calculadora utilicen todas las cifras del bombeo pero sin considerar la palabra millones. Al parecer ese es el problema. Calculen el caudal en m³/s para el mes de enero, sin olvidar que enero tiene 31 días. El valor correcto es:

- a) 5,588 l/s b) 558.8 l/s
c) 55.88 l/s d) 5.588 l/s

28. En la nota de El Sol de Tijuana de enero de 2024, se reporta que el recibo de la energía eléctrica de la CFE para el acueducto fue de 300 millones de pesos. Supongamos que el recibo es bimestral por lo que al mes sería de la mitad. Por otro lado tenemos el volumen bombeado (corregido) en un mes de la pregunta 24. Podemos entonces calcular el costo de la energía por metro cúbico. El costo es de:

- a) 10 pesos b) 20 pesos
c) 30 pesos d) 40 pesos

29. En la nota de febrero de 2020 en Milenio se habla de una deuda de agua a EEUU de 220 millones de milímetros cúbicos (mm³). ¿Cuánto es esta cantidad en litros?

- a) 0.220 litros b) 2.20 litros
c) 22 litros d) 220 litros

30. Si la deuda hubiera sido lo que se reportó en la nota de Milenio, los agricultores no habrían tomado la presa La boquilla para impedir que se utilizara para pagar la deuda. Cualquier agricultor, cualquiera, podría haber dicho yo la pago mañana, y cada quien para su casa. Lo que se quiso decir en la nota periodística era 220 millones de metros cúbicos 220 Mm³, no de milímetros cúbicos. Suponiendo que la deuda real se paga en un año, la cuestión es calcular el equivalente en un caudal en m³/s. El caudal en m³/s es:

- a) 7 m³/s b) 14 m³/s
c) 21 m³/s d) 28 m³/s

31. En 2020 se cerraba el segundo ciclo de cinco años donde no había opción sino saldar el remanente del total de la deuda de diez años. La deuda total de diez años era de 4,320 Mm³. Cada año se abonaba, de tal forma que al final de 2020 solo se debían los mencionados 220 Mm³. ¿Qué porcentaje era la deuda al final, del total de los diez años?

- a) 10% b) 15% c) 5% d) 2 %

32. En 2025 se cumple el primer ciclo de cinco años en que México debe entregar 2,160 Mm³. Antes de la entrega de los 150 Mm³ de la presa El Cuchillo se adeudaban 1,627 Mm³. ¿De cuánto es la deuda actual en Mm³?

- a) 1,277 Mm³ b) 1,477 Mm³
c) 1,577 Mm³ d) 1,677 Mm³

33. ¿Cuánta es la deuda actual en porcentaje del total que se debe pagar?

- a) 58% b) 68% c) 78% d) 88%

34. ¿Cuánto ha abonado México en porcentaje del total que se debe pagar?

- a) 42% b) 32% c) 22% d) 12%

35. En octubre de 2025 se debe terminar de pagar la deuda. Faltan de entregar muchos millones de metros cúbicos según la pregunta 32. Si la deuda se tuviera que pagar en seis meses: ¿Cuál sería el caudal equivalente en m³/s?

- a) 50 m³/s b) 75 m³/s
c) 100 m³/s d) 125 m³/s

36. Todavía queda otro ciclo de cinco años en que se puede aplazar el pago. El problema es que se acumula, ya debemos para finales de 2025 lo de la pregunta 32, a lo que habría que sumar lo que se acumule del 2026 al 2030 que es 2,160 Mm³. Si pagáramos todo distribuyendo la deuda en el año 2030: ¿Cuál sería el caudal equivalente en m³/s de un río fluyendo todo el año?

- a) 60 m³/s b) 80 m³/s
c) 100 m³/s d) 120 m³/s

37. En condiciones ideales con lluvias según el promedio de muchos años, lo más conveniente sería abonar según lo convenido por año, que es de 432 Mm³. ¿A cuánto equivaldría este volumen en un caudal en m³/s?

- a) 3.5 m³/s b) 7 m³/s
c) 14 m³/s d) 17.5 m³/s

38. Por la parte del río Colorado se le entrega a México 1,850 Mm³ anuales. ¿Por cada litro que entrega México a EEUU en el río Bravo, cuántos litros se reciben aproximadamente del río Colorado?

- a) 1 litro b) 2 litros
c) 3 litros d) 4 litros

39. Lo que recibe México del río Colorado equivale a un caudal de:

- a) 60 m³/s b) 40 m³/s
c) 20 m³/s d) 10 m³/s

40. Lo que se recibe al año en México se puede pensar como un río de ciertos m³/s de caudal. Lo que entrega México a EEUU sería otro río de otros m³/s de caudal. ¿Cuántas veces es el caudal que recibe México en comparación con el que entrega a EEUU:

- a) 5 veces b) 4 veces
c) tres veces d) dos veces

41. El agua que viene por el acueducto Colorado-Tijuana no puede distribuirse directamente a la población porque no es potable. Se necesita tratarla en una planta potabilizadora. Por otro lado, una planta potabilizadora no puede recibir tampoco directamente el agua del acueducto porque tiene sus propios tiempos de mantenimiento. Se necesita una presa entre el acueducto y la planta potabilizadora para regular el flujo. La presa que se construyó en 1978 con este propósito es la presa:

- a) Las Auras b) Morelos
c) El Carrizo d) Abelardo L Rodríguez

42. Cómo se llama la planta potabilizadora que entrega el agua del acueducto a Tijuana:

- a) La Gloria b) Tecate
c) El Florido d) Otay

43. Según la clasificación de los ríos que se discutió en la guía, el río Ganges es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

44. El río Nilo es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

45. El río Misisipi es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

46. El río Amazonas es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

47. El río Bravo es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

48. El río Tijuana es de categoría:

- a) -1 b) 0 c) 1 d) 0 2

49. El río Colorado es de categoría:

- a) 2 b) 3 c) 4 d) 0 5

50. ¿Cuántos metros cúbicos se acumulan en un día con un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$?

- a) $86,400 \text{ m}^3$ b) $24,000 \text{ m}^3$
c) $36,000 \text{ m}^3$ d) $96,000 \text{ m}^3$

51. Imaginen un depósito que tiene una superficie de una hectárea. Puede ser $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, o $50 \text{ m} \times 200 \text{ m}$. ¿A qué altura subiría aproximadamente el agua en un día si recibe $1 \text{ m}^3/\text{s}$?

- a) 9 cm b) 90 cm c) 9 m d) 18 m

52. Por lo general una cuenca tiene sub-cuencas y microcuencas que concentran agua en los ríos y arroyos afluentes de la corriente principal, formando un patrón que semeja un árbol. El río principal sería el tronco y los afluentes las ramas. Es el mismo patrón del sistema circulatorio que forman arterias y venas, y también las neuronas en el cerebro. A este patrón en la forma de árbol se le conoce como:

- a) dentrítico b) dentrífico
c) dendrítico d) denfrítico

53. Cuencas cuyas aguas desembocan en lagos, lagunas o salares, y no tienen comunicación fluvial al mar. Un ejemplo es la cuenca del lago de Pátzcuaro, en el estado de Michoacán. Estas cuencas cerradas también se conocen como:

- a) xenorreica b) endorreicas
c) criptorreicas d) exorreicas

54. Cuencas cuyo cauce principal descarga sus aguas en el mar. Las tres cuencas internacionales, la del Bravo, Colorado y río Tijuana son ejemplos de estas cuencas abiertas, también conocidas como:

- a) xenorreicas b) endorreicas
c) criptorreicas d) exorreicas

55. Cuencas cuyos escurrimientos son exclusivamente subterráneos, como en el caso de la península de Yucatán, que al no tener cauces superficiales definidos, sus cuencas se definen por sus escurrimientos subterráneos con sus decenas de cenotes. Estas cuencas subterráneas también se conocen como:

- a) xenorreicas b) endorreicas
c) criptorreicas d) exorreicas

56. No toda el agua que cae en una cuenca termina en el río, la mayor parte se evapora tanto directamente del suelo o a través de las plantas en lo que llaman evapotranspiración. Otra parte se infiltra al subsuelo y se acumula como agua subterránea en los acuíferos. Lo que termina en los ríos es alrededor del:

- a) 5% b) 10% c) 20% d) 50%

57. Tanto el río Bravo como el río Colorado, y también el Río Tijuana, estaban totalmente en territorio de la Nueva España. Una década después de la independencia, en 1832, las fronteras seguían igual por el tratado de Adams-Onís con EEUU. Tres años después, en 1835, Texas se declara independiente fijando su frontera sur unos 200 km al norte del río Bravo. O sea que seguían los tres ríos en territorio mexicano. Texas fijaba su frontera sur en el río:

- a) Arkansas b) Sabina
- c) Pecos d) Nueces

58. Derivado de la guerra con EEUU la frontera se corrió hacia el sur hasta el Río Bravo con el tratado de Guadalupe-Hidalgo de 1848, y se extendió además el territorio de EEUU hacia el oeste hasta California. En el tratado, la frontera norte de Sonora era el río:

- a) Mayo b) Sonora
- c) Gila d) Yaqui

59. Sin embargo, esto cambió con el tratado de la venta de La Mesilla en 1853 con lo que se estableció la frontera actual. El nombre mismo de La Mesilla sugiere que se trata de un territorio pequeño. Sin embargo, la región entre el río Gila y la frontera actual tiene un área mayor a la del estado de Baja California. La distancia media entre la frontera actual y el río Gila es aproximadamente de:

- a) 45 km b) 200 km c) 400 km d) 600 km

60. ¿Cómo es que Baja California se salvó de quedar aislada por tierra del resto de México? Se estuvo muy cerca. La clave es el punto donde el Río Gila desemboca en el Río Colorado. Este punto se defendió a toda costa como inamovible en la nueva frontera y así quedó finalmente. Sin embargo, los negociadores mexicanos al parecer tuvieron que aceptar que tanto al este como al oeste la frontera quedara más al sur de ese punto. Hacia el este se estableció que la frontera quedaría a una legua marina al sur de la parte más al sur del puerto de San Diego. O sea la actual Tijuana. ¿A cuánto equivale una legua marina?:

- a) 2.5 km b) 3.5 km c) 4.5 km d) 5.5 km

61. El río Gila tiene un caudal promedio de $170 \text{ m}^3/\text{s}$. Si queremos saber el volumen que se acumularía en un año, multiplicamos por el número de segundos que tiene un año. Si queremos el volumen de lo que llovió en la cuenca tenemos que multiplicar el volumen acumulado del río por 5, recordando que solo un 20 % de lo que llueve termina en el río. Ya tenemos el volumen de agua que llueve en la cuenca en un año. Por otro lado, sabemos que este volumen es el área de la cuenca multiplicada por el espesor de la lluvia acumulada en un año. El área de la cuenca del Gila es $150,000 \text{ km}^2$ y queremos saber el espesor de la lluvia acumulada en un año. Este espesor es de:

- a) 170 mm b) 270 mm c) 370 mm d) 470 mm

62. La presa Hoover o lago Mead tardó en llenarse 6 años con aguas del río Colorado, cuyo caudal es de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. No era conveniente utilizar todo el caudal y tapar el río porque ya había muchos usuarios aguas abajo de la presa. El llenado se hizo de manera controlada utilizando solo parte del caudal. Para calcular el caudal que se utilizó necesitamos la capacidad de la presa la cual es de $35,000 \text{ Mm}^3$. ¿Qué caudal se utilizó?:

- a) $50 \text{ m}^3/\text{s}$ b) $100 \text{ m}^3/\text{s}$
- c) $150 \text{ m}^3/\text{s}$ d) $200 \text{ m}^3/\text{s}$

63. Si se hubiese utilizado el caudal completo ¿En cuánto tiempo se habría llenado?:

- a) 1 año b) 2 años c) 3 años d) 4 años

64. Las presas pueden contener menos o más agua de la que mueve el río en un año. Por ejemplo, si se utiliza todo el caudal y se llena en tres meses, habrá agua para solo tres meses si al año siguiente no llueve. Por el contrario, si se llena en tres años, habrá agua para tres años aunque ya no llueva. Es como tener tres años normales de lluvia guardados en la presa. ¿Cuántos años normales caben en el lago Mead?:

- a) 1 año b) 2 años c) 3 años d) 4 años

65. La presa Glen Canyon o lago Powell tiene una capacidad de 30,000 Mm³ y tardó en llenarse 17 años. El caudal utilizado fue de:

- a) 10 m³/s b) 20 m³/s
c) 40 m³/s d) 60 m³/s

66. La presa donde descarga el acueducto Colorado-Tijuana tiene una capacidad de 40 Mm³. A la presa llegan y salen 6,000 l/s. Si el acueducto dejara de alimentar a la presa y se siguiera extrayéndole la misma cantidad ¿Para cuántos días alcanzaría la reserva?

- a) 80 días b) 160 días
c) 320 días d) 640 días

67. Desalinizar 1,000 galones de agua de mar para hacerla potable cuesta 10 dólares. ¿Cuánto es en pesos por metro cúbico?

- a) 30 pesos b) 40 pesos
c) 50 pesos d) 60 pesos

68. El agua que lleva el río Tijuana en su tramo canalizado, aguas abajo de la presa Abelardo L. Rodríguez, es una mezcla de drenaje tratado con no tratado. Tratar esta agua para hacerla potable y comercializarla cuesta 5 dólares por 1,000 galones. ¿Cuánto es en pesos por metro cúbico?

- a) 15 pesos b) 20 pesos
c) 25 pesos d) 30 pesos

69. ¿Aproximadamente que fracción de la cuenca del río Tijuana queda en México?

- a) 1/4 b) 2/4 c) 1/2 d) 3/4

70. La presa Abelardo L. Rodríguez tiene una capacidad de 135 Mm³. Si la presa estuviera llena y se le extrajera la misma cantidad de agua que llega por el acueducto Colorado-Tijuana, la presa se vaciaría con el tiempo si no llueve. ¿Cuántos días tardaría en vaciarse?

- a) 60 días b) 160 días
c) 260 días d) 360 días

71. La respuesta correcta a la pregunta 22 es la diferencia de alturas entre las estaciones de bombeo en el acueducto Colorado-Tijuana. Necesitamos esta altura para calcular la energía que se necesita para subir los 6,000 litros de agua de estación a estación. Podemos utilizar la fórmula de la energía potencial $E=mga$, donde m es la masa del agua en kg, g es la aceleración de la gravedad en m/s² y a es la altura entre estación y estación. La energía para subir 1 litro es:

- a) 16.7 J b) 167 J c) 1,670 J d) 1.67 J

72. La fórmula de la energía no toma en cuenta el tiempo que se tarde en subir el litro de agua. Sin embargo, el tiempo es muy importante. Tijuana y Rosarito necesitan 6,000 litros cada segundo, y no cada 10 segundos, por ejemplo. Si fuera cada 10 segundos serían 600 litros por segundo. Insuficiente. Si queremos que las cosas sucedan 10 veces más rápido eso habría que pagarlo. La fórmula de la energía se divide entre el tiempo para tomar esto en cuenta. La división energía/tiempo mide la potencia. La unidad es el vatio o Watt (W) y equivale a 1J/1s=J/s. Esto significa que para elevar 1 litro de agua entre una estación y otra en un segundo se requiere una potencia de:

- a) 167 W b) 1,670 W
c) 16.7 W d) 1.67 W

73. Si sabemos la potencia para subir un litro por segundo, seis mil veces esta potencia se requerirá para subir 6,000 l/s. La potencia que se requiere para subir de estación a estación el caudal del acueducto es:

- a) 0.01 MW b) 1 MW
c) 0.1 MW d) 10 MW

74. Es conveniente escribir 1 MW = 1,000 × 1000W = 1,000 kW. Esto es, cambiar de unidades de MW a kW. ¿Cuál es la potencia que se requiere para subir de estación a estación el caudal del acueducto?

- a) 10,000 kW b) 1,000 kW
c) 100 kW d) 10 kW

75. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) cobra la energía utilizada en unidades de kWh, la cual es la potencia multiplicada por las horas que se utilizó. Por ejemplo, un horno eléctrico de cocina que consume una potencia de 1 kW, si se utiliza por una hora consume 1 kWh. La CFE le pone precio al kWh, no al kW, el kW está disponible pero si no se utiliza no se cobra, y entre más tiempo se utilice más se cobra. La energía que se gasta por día (24 horas) para subir el caudal del acueducto de estación a estación es de:

- a) 240 kWh b) 24,000 kWh
- c) 2,400 kWh d) 240,000 kWh

76. Si el costo del kWh sin subsidio es 4 pesos, lo que habría que pagar por mes a la CFE por subir el caudal del acueducto de estación a estación sería de:

- a) 30 millones b) 3 millones
- c) 300 mil d) 30 mil

77. Lo anterior es el costo por mes por estación. Multiplicando por el número de estaciones el total por mes para subir la Rumorosa es:

- a) 1.8 millones b) 18 millones
- c) 180 millones d) 180 mil

78. Multiplicando por 12 para calcular el monto por un año resulta:

- a) 2,160 millones b) 216 millones }
- c) 21.6 millones d) 2.16 millones

79. ¿Y cuántos millones de metros cúbicos llegan a Tijuana en un año, si llegan $6 \text{ m}^3/\text{s}$?

- a) 180 mil b) 18 millones
- c) 1.8 millones d) 180 millones

80. Dividiendo los millones de pesos entre los millones de metros cúbicos obtenemos lo que andábamos buscando: el costo en energía eléctrica de subir un metro cúbico de agua a La Rumorosa. El costo es de:

- a) 1.20 pesos b) 12 pesos
- c) 6 pesos d) 20 pesos

81. En el siglo III llegaba agua a Roma a través de 11 acueductos que sumados tenían la longitud de 800 km. En promedio su longitud era más o menos la del Colorado-Tijuana, pero en ellos no se subía el agua sino que se bajaba por gravedad. El volumen total de agua que llegaba a Roma era de $1 \text{ m}^3 / \text{día}$. ¿Cuánto recibía Roma comparado con lo que recibe Tijuana por el acueducto?

- a) igual b) la mitad
- c) un tercio d) el doble

82. Las presas pueden tener varias funciones. Una de ellas es la producción de energía eléctrica. Así como se requiere energía para vencer la gravedad al subir el agua, cuando baja por gravedad se le puede recuperar utilizando turbinas (abanicos) diseñadas para ello. El agua en la Rumorosa baja por gravedad a Tijuana casi al nivel del mar, o sea que en teoría se podría recuperar el 100% de la energía que se utilizó para subirla, por lo que el costo neto sería cero pesos. Sin embargo, el terreno no es el adecuado para hacerlo, aunque se podría utilizar un desnivel abrupto de aproximadamente 100 m que hay antes de descargar en la presa. Si se instalaran los equipos adecuados se podría recuperar parte de la energía que se utilizó para subir el agua. ¿Qué porcentaje se recuperaría en esos 100 m?:

- a) 1% b) 5% c) 10% d) 100%

83. El bordo de la presa La Boquilla en Chihuahua tiene una altura de 80 m, por lo que cuando está llena, los litros por segundo que se descarguen pueden producir un máximo de 25 MW de potencia. De hecho, la capacidad instalada para producir energía eléctrica es de 25 MW de potencia. Sin embargo, la presa casi nunca está llena por lo que la producción de energía es menor de la máxima instalada. Vamos a suponer que se descargan $15 \text{ m}^3/\text{s}$ y que estos pasan por las turbinas. Para calcular la potencia que se produce con ese caudal no necesitamos conocer la capacidad instalada porque esa es la máxima que se puede producir. Podemos utilizar la fórmula de la energía potencial entendida como potencia cuando la masa es masa por segundo. Recuerden que la masa debe estar en kg. La potencia generada sería de:

- a) 2 MW b) 4 MW c) 8 MW d) 12 MW

84. Más que en los hogares en lo que más se utiliza el agua es en la agricultura. El promedio mundial es del:

- a) 51% b) 55% c) 59% d) 70%

85. El promedio mundial del uso del agua en los hogares es del:

- a) 1% b) 2% c) 3% d) 10%

86. En el caso del río Colorado el promedio del uso en hogares es mayor porque ciudades grandes que no están en su cuenca como Los Ángeles, San Diego y Tijuana dependen total o parcialmente del río. Suponiendo que una persona usa 300 l/ día, calcular el volumen que usa en un año:

- a) 40 m³ b) 100 m³
c) 365 m³ d) 36.5 m³

87. Se estima que 40 millones de personas dependen del río Colorado. Con la respuesta correcta a la pregunta anterior se puede calcular el volumen total que utilizan los 40 millones de personas en un año. El volumen es de:

- a) 400 Mm³ b) 365 Mm³
c) 4,000 Mm³ d) 36.5 Mm³

88. El escurrimiento anual del río Colorado es ≈20,000 Mm³. Calcular el porcentaje del agua del río que usan los 40 millones de personas. El porcentaje es:

- a) 11% b) 15% c) 20% d) 30%

89. ¿Qué porcentaje del escurrimiento del río Bravo se deja pasar permanentemente a su desembocadura en el Golfo de México?

- a)20% b) 15% c) 10% d) 5%

90. ¿Qué porcentaje del escurrimiento del río Colorado se deja pasar permanentemente a su desembocadura en el Mar de Cortés?

- a)15% b) 10% c) 5% d) 0%

91. A Baja California se le dan bien las potencias de diez en relación con el agua. El caudal del río imaginario “Baja California” es de:

- a) 6×10⁻¹ m³/s b) 6×10⁰ m³/s
c) 6×10¹ m³/s d) 6×10² m³/s

92. El caudal del río Colorado es de:

- a) 6×10⁻¹ m³/s b) 6×10⁰ m³/s
c) 6×10¹ m³/s d) 6×10² m³/s

93. El caudal que se le asigna a México del río Colorado es de:

- a) 6×10⁻¹ m³/s b) 6×10⁰ m³/s
c) 6×10¹ m³/s d) 6×10² m³/s

94. El caudal del acueducto Colorado-Tijuana es de:

- a) 6×10⁻¹ m³/s b) 6×10⁰ m³/s
c) 6×10¹ m³/s d) 6×10² m³/s

95. El caudal de la concesión en Mexicali a la planta cervecera que se canceló hace varios años era de:

- a) 6×10⁻¹ m³/s b) 6×10⁰ m³/s
c) 6×10¹ m³ d) 6×10² m³/s

96. El agua virtual es la cantidad de agua que se necesita para obtener un producto. Se le llama virtual porque ya no está en el producto y no la vemos. También se le conoce como huella hídrica porque es el rastro que deja el producto y no está en el producto mismo. El promedio mundial de agua virtual per cápita es de 1,400 metros cúbicos por año. Por otro lado, si el consumo per cápita al día de agua en domicilios es de 200 litros, al año son ≈70 m³. Obviamente usamos más agua que no vemos que la que vemos. ¿Cuántas veces?

- a) 2 b) 6 c) 12 d) 20

97. Canadá y EEUU son exportadores netos de agua virtual. Esto es, que exportan más de la que importan, principalmente en alimentos. México es un importador neto de agua virtual, principalmente por la importación de carnes y cereales. Por ejemplo, año con año importamos 20 millones de toneladas de maíz amarillo, principalmente para consumo animal en la producción de carne de res, cerdo, pollo, huevo y leche. Nos preguntamos por la cantidad de agua que se necesita para producir los 20 millones de toneladas de maíz. Una manera de calcularla es suponer una producción razonable de 10 toneladas por hectárea. Sabiendo esto podemos calcular el número de hectáreas de riego que se necesitan. Son 2 millones de hectáreas. Ahora necesitamos los metros cúbicos que se necesitan por hectárea. Una hectárea son tantos metros cuadrados por lo que nos falta la altura. El dato que necesitan es el de 1 m de altura para cultivar maíz. Por lo tanto, el agua que se necesita para producir los 20 millones de toneladas de maíz amarillo es de:

- a) 20 Mm³
- b) 200 Mm³
- c) 2,000 Mm³
- d) 20,000 Mm³

98. La respuesta correcta a la pregunta anterior es aproximadamente el escurrimiento anual del río Colorado. En otras palabras, el equivalente de toda el agua del río Colorado, año con año se exporta a México como agua virtual en los 20 millones de toneladas de maíz amarillo. El escurrimiento anual del río Colorado es aproximadamente:

- a) 20 Mm³
- b) 200 Mm³
- c) 2,000 Mm³
- d) 20,000 Mm³

99. De un kilogramo de carne de res pueden salir 20 tacos de carne asada. La huella hídrica de un kilogramo de carne de res es $\approx 16,000$ litros de agua. Calcular la huella hídrica de la carne en un taco, olvídense de la tortilla, guacamole y demás. ¿Cuántos tambos de 200 litros es la huella hídrica de la carne de res en un taco?:

- a) 1 tambo
- b) 2 tambos
- c) 3 tambos
- d) 4 tambos

100. De un kilogramo de carne de puerco pueden salir 24 tacos de adobada. La huella hídrica de un kilogramo de carne de puerco es $\approx 4,800$ litros de agua. Calcular la huella hídrica de la carne en un taco, olvídense de las dos tortillitas, la salsa y la piña. ¿Cuántos tambos de 200 litros es la huella hídrica de la carne en un taco de adobada?:

- a) 1 tambo
- b) 2 tambos
- c) 3 tambos
- d) 4 tambos

Agradecimientos

La logística del evento estuvo a cargo de Mario González Escobar, Humberto S. Benítez Pérez, Ana Karina Espinoza Villalva, Ángel Daniel Peralta Castro, Sergio Manuel Arregui Ojeda. En las mesas de divulgación y en los laboratorios colaboraron Luis Delgado Argote, Mario González Escobar, Efraín Gómez Arias, Javier Alejandro González Ortega, Claudio Inguaggiato, Oscar Alberto Castro Artola, Carlos Simón Reyes Martínez, Carlos Eduardo Reinoza Gómez, Jorge Olmos Soto, Jeremie Bauer así como Gabriel Rendón Marquez, Martín Francisco Pacheco Romero, Fernando Herrera Barrientos, Cristian Alejandro Gallegos Castillo, María Alejandra Nuñez Leal, Eduardo Rodríguez Orozco, Rogelio Arce Villa, María Margarita Martínez Rodríguez, Agustín Mastache Román, Luis Eduardo Ochoa Tinajero, Elvia Ramón Morales, Andrés Navarro Rodríguez, con el apoyo de los estudiantes de posgrado de diversos programas: Blanca Suhey Apolinar Morales, Jorge Daniel Castro Morales, Iván Barea Pérez, Ignacio Francisco García Meza, Nina Adhara Elena Ávila Ortiz. En la coordinación de recorridos, Ana Karina Espinoza Villalva, con la participación de los estudiantes del Programa de Posgrado de Ciencias de la Tierra: Marisol Juárez Reyes, Young Ho Aladro Chio, Andrea Rojo Díaz de León, Miriam S. Morales Infante, Beatriz Valdés Moreno, Yasmin Hernández Aburto, Luis alvarado, Diana Yareth Carmona, Ashley Natalie Vega Donato y Joel Aguilar Tomasini. En la coordinación de los recorridos de los maestros participo Martín Francisco Pacheco Romero.

Manuscrito recibido: 3 de junio de 2025
Manuscrito aceptado: 9 de junio de 2025

Comparación del balance radiativo suelo-atmósfera en un sitio urbano y uno rural de la ciudad de Puebla

J. Adrián Álvarez-Pérez¹ (QEPD), Raquel Elisa Hernández-Parra², Adalberto Tejeda- Martínez², Gabriel Balderas-Romero³, Juan Pablo Báez-Vázquez³

¹Estudiante de Maestría en Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana

²Grupo de Climatología Aplicada de la Universidad Veracruzana

³Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

email: raquelelisahernandezparra@gmail.com, atejeda.martinez@gmail.com

Resumen

No obstante que el clima de la ciudad de Puebla y sus alrededores ha sido estudiado ampliamente, prevalece la pregunta sobre los efectos de la urbanización en el balance radiativo suelo-atmósfera. Este trabajo evalúa las componentes de la radiación (onda larga y corta tanto entrantes como salientes), mediante campañas de mediciones realizadas en el año 2022, para comparar los balances radiativos de un sitio urbano contra uno rural, antes (18 de febrero al 20 de marzo), durante (19 de agosto al 20 de septiembre) y después (20 de octubre al 23 de noviembre) de la temporada de lluvias.

En el sitio rural durante todos los periodos analizados, las componentes del balance de radiación resultaron de menor magnitud que en el sitio urbano. El máximo de radiación neta se observó en el sitio urbano durante el periodo seco. Sin embargo, la diferencia máxima de radiación neta entre los sitios urbano y rural se observó en el periodo de octubre-noviembre, con valores de 4.75 MJm^{-2} durante el periodo seco después de la temporada de lluvias.

La radiación de onda corta incidente ($\downarrow RC$) tuvo su máximo antes de la temporada de lluvia (febrero-marzo) en el sitio rural. La pérdida máxima por reflexión fue en este mismo periodo en la zona urbana ($\uparrow RC$), se dio el máximo de radiación de onda larga incidente ($\downarrow RL$) en la zona urbana y la máxima emisión ($\uparrow RL$) en el sitio de medición rural.

En el sitio de medición rural se observó el mínimo de $\downarrow RC$ posterior a la temporada de lluvias. El mínimo de $\uparrow RC$ y $\downarrow RL$ se observaron en agosto en Azumiatla. El mínimo de $\uparrow RL$ se observó en la zona urbana en el periodo octubre-noviembre.

Con respecto al balance radiativo diurno, se registró mayor radiación neta en la estación urbana en comparación con la rural.

Palabras clave: clima urbano, balance radiativo, ciudad de Puebla

Abstract

Although the climate of the city of Puebla and its surroundings has been extensively studied, the question of the effects of urbanization on the soil-atmosphere radiative balance prevails. This work evaluates the radiation components (incoming and outgoing longwave and shortwave), by means of measurement campaigns carried out in 2022, to compare the radiative balances of an urban versus a rural site, before (February 18 to March 20), during (August 19 to September 20) and after (October 20 to November 23) the rainy season.

In the rural area, during all the periods analyzed, the radiation balance components were of a smaller magnitude than in the urban area. The maximum net radiation was observed at the urban site during the dry period. However, the maximum difference in net radiation between the urban and rural areas was observed in the October-November period, with values of 4.75 MJm^{-2} during the dry period after the rainy season. Incident shortwave radiation ($\downarrow\text{RC}$) had its maximum before the rainy season (February-March) at the rural site. The maximum reflection loss was in this same period in the urban area ($\uparrow\text{RC}$), also the maximum incident longwave radiation ($\downarrow\text{RL}$) was in the urban area and the maximum emission ($\uparrow\text{RL}$) was in the rural measurement site.

The minimum $\downarrow\text{RC}$ following the rainy season was observed at the rural measurement site. The minimum of $\uparrow\text{RC}$ and $\downarrow\text{RL}$ were observed in August at Azumiatla. The minimum of $\uparrow\text{RL}$ was observed in the urban area in the October-November period.

With respect to the diurnal radiative balance, higher net radiation was recorded at the urban station compared to the rural station.

Keywords: urban climate, radiative balance, Puebla City

Introducción

La transmisión de energía del Sol a la Tierra es casi en su totalidad radiativa. Cierta flujos de masa está asociado con las partículas del viento solar, pero su cantidad de energía es pequeña en comparación con la que llega en forma de fotones. Para calcular el balance energético de la Tierra, podemos solo considerar los intercambios de energía radiativa (Hartmann, 2016), o más específicamente, el flujo vertical de energía radiativa en la atmósfera, que es uno de los procesos más importantes para explicar el comportamiento climático.

El balance de radiación es el equilibrio entre la energía absorbida contra la reflejada y emitida por la superficie terrestre, es decir, la diferencia de la radiación neta de onda corta y la radiación neta de onda larga (Beringer, 2000).

Hartmann (2016) menciona que los flujos radiativos y no radiativos entre la superficie, la atmósfera y el espacio son factores determinantes del clima, pues la superficie se calienta a partir de un balance de radiación neta (Q^*) positivo durante el día y se enfría durante la noche ya que el balance de radiación es negativo.

Los flujos de energía a través de la superficie son tan importantes para el clima como los flujos en la parte superior de la atmósfera, puesto que el balance de energía en el continente determina la cantidad de energía disponible para evaporar el agua del suelo y para aumentar o disminuir la temperatura del suelo y del aire.

El balance energético en la superficie es más complejo que el balance en la parte superior de la atmósfera porque requiere considerar los flujos de energía por conducción, por convección de calor y de la humedad a través del movimiento de fluidos, así como por radiación. Además, en la escala local depende de la insolación, de las características de la superficie como la humedad, la cubierta vegetal, el albedo y de las condiciones superpuestas de la atmósfera. El balance energético de la superficie está íntimamente relacionado con el ciclo hidrológico. Evaluar el balance energético de la superficie es entonces fundamental para comprender el clima y su dependencia de los forzamientos radiativos (Hartmann, 2016).

La ciudad de Puebla, como consecuencia de su crecimiento urbano, ha experimentado alteraciones en su balance energético, lo cual afecta directamente las variables meteorológicas

locales. Por ello, estudiar el balance radiativo se vuelve fundamental para mitigar impactos como sequías, islas de calor y efectos adversos en el sector energético, entre otros. En consecuencia, es esencial comprender las diferencias entre los entornos urbanos y rurales, reconociendo cómo las variables meteorológicas responden de manera diferente en ambos contextos. Este conocimiento permite tomar decisiones informadas para enfrentar los retos derivados del cambio en el uso del suelo y sus efectos sobre el clima local.

Antecedentes

De acuerdo con Hartmann (2016), de la radiación solar incidente, una fracción es reflejada hacia el espacio debido al albedo planetario medio global, cuyo valor aproximado es de 0.29. El balance energético medio global de la Tierra a principios del siglo XXI, según Wild *et al.* (2017), muestra que en el tope de la atmósfera la radiación solar entrante es de alrededor de 340 Wm^{-2} , mientras que la radiación terrestre emitida es de alrededor de 398 Wm^{-2} ; la diferencia es almacenada por el océano. De los 340 Wm^{-2} de radiación solar absorbida por el sistema climático, solo alrededor de una tercera parte es absorbida en la atmósfera y dos terceras partes en la superficie.

Más del 90% de la emisión terrestre al espacio se origina en la atmósfera y solo alrededor de 20 Wm^{-2} (~6 %) provienen de la propia superficie.

Para el caso del balance de radiación en superficie, la radiación neta (Q^*) es la variable de mayor interés, la cual es la diferencia entre la radiación solar entrante menos la radiación reflejada y la emitida por la superficie; en otras palabras, es la radiación almacenada en el sistema superficie-atmósfera y puede ser escrita como en la ecuación 1 (Oke *et al.*, 1999).

$$Q^* = (\downarrow RC + \downarrow RL) - (\uparrow RC + \uparrow RL) \quad (1)$$

Donde $\downarrow RC$ y $\uparrow RC$ son la radiación de onda corta incidente y reflejada, $\downarrow RL$ y $\uparrow RL$ representan la radiación de onda larga incidente y emitida por la superficie.

Sobre el continente, solo una pequeña fracción (20%) de la radiación neta en la superficie se conduce hacia abajo durante el día, o se almacena calentando la superficie. Como resultado, la temperatura de la superficie se eleva rápidamente después del amanecer, hasta que se alcanza un equilibrio aproximado entre la radiación neta y la evaporación de agua (o la transpiración de las plantas), denominado flujo de calor latente (Sánchez, 1992).

Gay (1979) estudió el balance de radiación en cuatro ecosistemas en Bend, Oregon, E.U.A. (bosque, desierto, prado y pantano), y comparó las diferencias en el balance de radiación en condiciones de cielos despejados. Obtuvo que, bajo condiciones uniformes (días despejados de verano) la zona de bosque absorbe 90% de la radiación solar, el pantano 89%, seguido por el desierto 77% y el prado 75%. La absorción fue mayor en áreas con un dosel de mayor espesor.

Posteriormente, Ho-Taek Park *et al.* (1999), en un estudio realizado en la ciudad de Seto, Japón, obtuvieron que durante el día el balance de radiación es dominado primordialmente por la radiación neta de onda corta, la cual depende del albedo, la temperatura superficial y los coeficientes de transmisión de energía en la atmósfera y las nubes para esta franja del espectro. Por la noche el balance es dominado principalmente por la radiación neta de onda larga y es controlado fundamentalmente por la temperatura y la emisividad de las superficies.

Otro análisis del balance de radiación fue llevado a cabo por Akshay *et al.* (2016), quien investigó la contribución de cada componente del balance con el fin de observar sus variaciones diurnas y estacionales en la ciudad de Bangalore, India, con mediciones realizadas en el año 2014. El trabajo

mostró la relevancia de la radiación de onda corta en el balance de radiación neta, especialmente en estaciones húmedas.

Según Hernández *et al.* (1991) los inicios del estudio de la radiación solar en nuestro país pueden situarse en los años 1911 a 1928, cuando el investigador de origen polaco Ladislaw Gorczynski realizó mediciones con un sensor desarrollado por él mismo –la termopila de Gorczynski– en el Observatorio Meteorológico de Tacubaya de la Ciudad de México y otros sitios del país, los cuales produjeron “datos comparativos de las intensidades de la radiación solar que se registraron en diversas localidades del país con distintos climas y latitudes” (que los autores no especifican).

El presente trabajo parte de la hipótesis de que los fenómenos meteorológicos y la cobertura superficial en las zonas urbanas y rurales son un factor importante en las diferencias del balance de radiación solar (entrante y saliente de onda corta y larga), por lo que prevalece la pregunta sobre las características cuantitativas del balance radiativo, bajo la influencia de las superficies en las temporadas seca y húmeda en las zonas urbanas y rurales de la ciudad de Puebla y sus inmediaciones.

Según Balderas-Romero (2018), el estudio de la climatología urbana de la ciudad de Puebla se remonta al año 1970 con la tesis doctoral de Günter Gäb, partiendo del crecimiento de población en la región Puebla-Tlaxcala (Gaeb, 1970). En la década de los 90 se realizaron estudios para analizar el impacto del crecimiento urbano de la ciudad de Puebla en el clima local. Las investigaciones se realizaban bajo cuatro principales métodos: recorridos de medición, datos de estaciones fijas, sensores remotos y modelación de cambio climático.

Molina-Prior (2013) presenta el balance de radiación durante la temporada de secas para el centro de la ciudad de Puebla. La campaña

de medición realizada del 1 al 7 de abril de 2003 mediante estaciones meteorológicas fijas muestra que, al medio día, la radiación global, la compuesta por la radiación difusa (dispersión que sufre la radiación solar al atravesar algunos componentes de la atmósfera, incluidas las nubes) y la directa (la que no sufre dispersión atmosférica) fue en promedio de 943.14 W/m², la radiación neta de 575.5 W/m², el calor almacenado en superficie de 434.67 W/m², el calor sensible de 183.7 W/m², y el calor de evaporación de 5.2 W/m². Por la noche el promedio de calor almacenado en superficie fue de -124.15 W/m² (el signo negativo significa que el flujo es hacia abajo) y un valor extremo de -191.12 W/m²; la radiación neta promedio fue de -91.14 W/m² con un extremo de -104.6W/m².

Realizar mediciones in situ del balance de radiación es fundamental para comprender la interacción de la energía con el entorno de manera precisa y en tiempo real. Aunque las aproximaciones mediante percepción remota son valiosas, las mediciones en superficie proporcionan datos específicos y representativos, lo que permite una evaluación más exacta del comportamiento energético en relación con el clima local. Además, los estudios que comparan superficies rurales y urbanas ofrecen información clave para entender cómo las distintas áreas absorben y emiten energía, lo que resulta crucial para optimizar el diseño urbano y mejorar la calidad de vida de los habitantes en entornos urbanos.

Zona de estudio

El municipio de Puebla se centra en las coordenadas geográficas 19°03'05"N, 98°13'04"O y a una altitud aproximada de 2,135 msnm. Cuenta con una población de 1,692,181 habitantes, en una superficie de 535.3 km², que arroja una densidad de población de 3,163 hab./km² (INEGI, 2021).

La Secretaría de Protección Civil y Gestión Integral de Riesgos (2018) expresa en el Programa

Municipal de Protección Civil de Puebla 2018-2021, que el clima dominante es templado subhúmedo, cuyo régimen de lluvias tiene un máximo en verano. La temperatura mínima promedio es de 5°C observada en la parte alta del volcán Malinche. El centro y sur del municipio tienen una temperatura media anual de 17.1°C y 16°C respectivamente. El mes más frío del año es enero, mientras que las temperaturas más altas ocurren en mayo, iniciando en este mismo mes la temporada de lluvias que culmina en octubre, con dos máximos, uno en junio y el otro en septiembre. Con el aumento de nubosidad a partir del mes de junio la temperatura comienza a descender progresivamente (Figura 1).

La humedad relativa tiene un valor promedio de 45% en los meses secos y en los meses de lluvias alrededor del 72%, con un promedio anual de 65.4%. (Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (s. f.)).

Instrumentos y métodos

Las variables que se midieron para este trabajo se enlistan en la Tabla 1. Se usaron radiómetros (NR01), que miden el flujo de la radiación de onda larga (RL) y corta (RC) y establece el balance entre la radiación incidente de onda corta más la infrarroja (de onda larga) menos la onda corta y larga infrarroja reflejada y emitida por

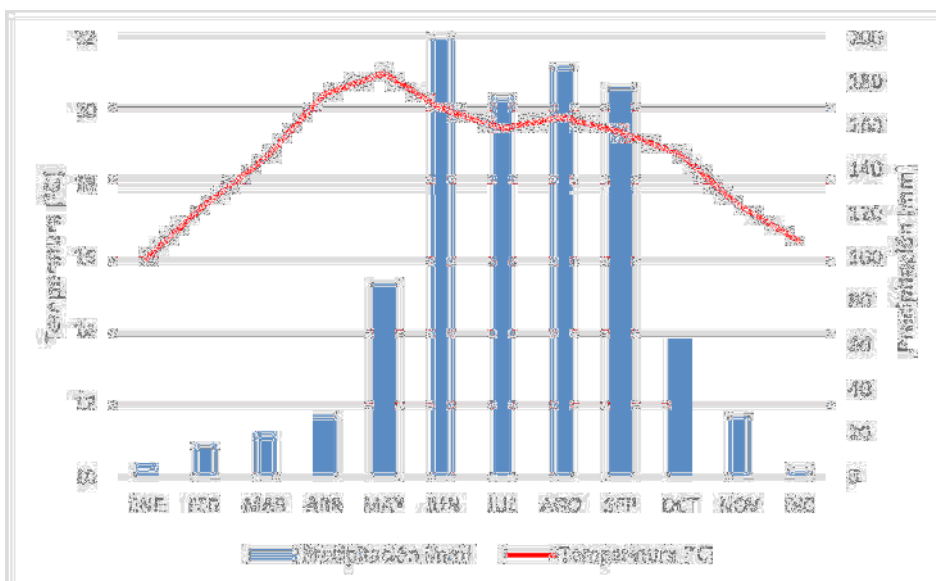


Figura 1. Climograma observatorio meteorológico de Puebla (1981-2010). Elaboración propia a partir de datos de la Conagua (SMN, 2010).

Tabla 1. Definiciones de las variables de estudio según Wallace (2005). Fueron medidas en Wm^{-2}

Variable	Descripción
Radiación solar de onda corta entrante ($\downarrow RC$)	Radiación emitida por el Sol incidente en la superficie de la Tierra a una longitud de onda menor a $3 \mu m$.
Radiación solar de onda corta saliente ($\uparrow RC$)	Radiación reflejada por la superficie de la Tierra de una longitud de onda de menos de $3 \mu m$
Radiación solar de onda larga entrante ($\downarrow RL$)	Radiación entrante cuya longitud de onda es superior a $3 \mu m$.
Radiación solar de onda larga saliente ($\uparrow RL$)	Radiación saliente cuya longitud de onda es superior a $3 \mu m$.

la superficie. El NR01 incluye cuatro detectores: dos con la cara hacia arriba y dos hacia abajo, y requiere mantenimiento limitado. Además, permite calcular algunos parámetros como el albedo para la onda corta, temperatura del aire, temperatura de la superficie y radiación neta.

Los sensores de RC, también llamados piranómetros (tipo SR01), miden longitudes de onda entre 300 y 2,800 nm; los sensores de RL son llamados pirgeómetros (tipo IR01) y miden longitudes de onda entre 4,500 y 50,000 nm. Para calcular las temperaturas del aire y la superficie, se incluye un sensor de temperatura PT100 conectado a los sensores mencionados. (Campbell-Scientific Inc, 2014 b).

Los datos son almacenados y preprocesados en el datalogger CR3000. Debe tomarse en cuenta que una falla en cualquier parte del sistema

puede llevar a datos dudosos o bien, a su pérdida (Campbell - Scientific Inc. 2014 a). Para los periodos de datos que se reportan aquí se descarta la presencia de datos dudosos.

Se instalaron dos estaciones de balance de radiación en la ciudad de Puebla (Figuras 2 y 3), una en el edificio Carolino (Ca, en los sucesivos) en el centro de la ciudad ($19^{\circ}02'44''$ N, $98^{\circ}11'44''$ W, 2,135 msnm), y la otra en San Andrés Azumiatla (Az, en los sucesivos) ($18^{\circ}54'44''$ N, $98^{\circ}14'31''$ W, 2,142 msnm), un ambiente rural en la periferia de la ciudad. Cada estación incluye dos piranómetros y dos pirheliómetros que miden radiación solar de onda larga y corta tanto entrante como saliente y un datalogger que almacena los datos. Los instrumentos se colocaron entre 15 y 20 metros sobre el nivel de la calle en torres verticales, lo que permitió obtener una base de datos de las diferentes variables registradas cada 15 minutos.

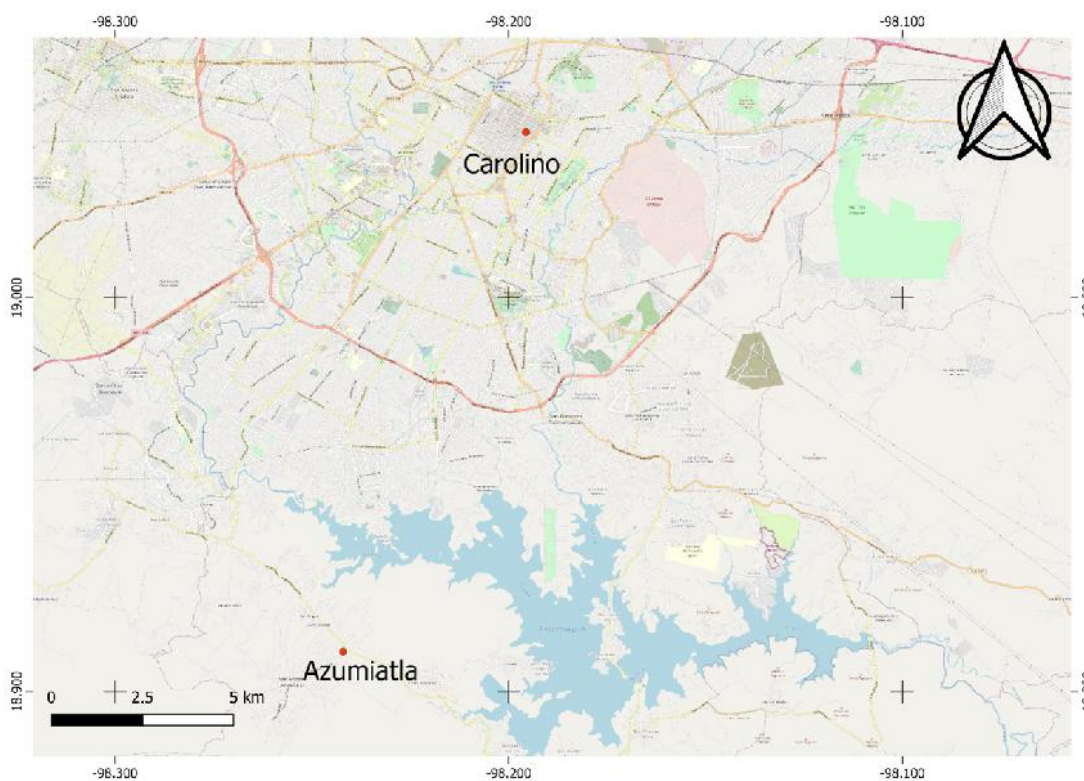


Figura 2. Ubicación de las estaciones de medición de balance radiación en la ciudad de Puebla. *Estación edificio Carolino (Ca, zona urbana):* $19^{\circ}02'44''$ N, $98^{\circ}11'44''$ W, 2,135 msnm *y estación San Andrés Azumiatla (Az, zona rural):* $18^{\circ}54'44''$ N, $98^{\circ}14'31''$ W, 2,142 msnm.

Se seleccionaron tres periodos de datos correspondientes a: 1) la época de secas invernal, del 18 de febrero al 20 de marzo de 2022 (2,880 observaciones); 2) mitad de la época de lluvias, del 19 de agosto al 20 de septiembre de 2022 (3,168 observaciones); 3) época de secas después de la época de lluvias, del 20 de octubre al 23 de noviembre de 2022 (3,072 observaciones).

La evaluación de las componentes del balance radiativo requiere el cálculo de las áreas fuente de los sensores de medición. Los radiómetros tienen un campo de visión prácticamente hemisférico hacia arriba, como un ojo de pez; hacia abajo el área de influencia de los datos de radiación se considera como la base de un cono con vértice en el sensor. Para determinar la distancia máxima y el área visual de la señal de los sensores de radiación que apuntan hacia abajo, se utiliza una función trigonométrica, dependiendo del ángulo de visión de éste (Marcolla & Cescatti, 2018).

Se considera un ángulo de 85° alrededor de la vertical, de modo que el radio máximo en la horizontal será calculado con la Ecuación 2:

$$R_{max} = (\tan 85^\circ)h \quad (2)$$

donde h es la altura a la que se coloca el sensor (Schmid, 1997).

Las herramientas de cómputo utilizadas fueron LoggerNet de Campbell-Scientific Inc., para la programación de los equipos, y Excel de Microsoft para el procesamiento de los datos.

Resultados

La Tabla 2 y las Figuras 4, 5 y 6 resumen la energía por unidad de área (MJm^{-2}) para los tres periodos de estudio, tanto en la estación urbana ubicada en el edificio Carolino, como en la rural en San Andrés Azumiatla.

En la Figura 4 se muestra que durante la campaña de medición febrero-marzo se alcanzó la radiación más alta en todas sus componentes en ambos sitios de medición. La radiación de onda corta incidente ($\downarrow\text{RC}$) máxima de ambas estaciones se registró en la estación Ca de 27.37 MJm^{-2} (Tabla 2). Durante este periodo previo a la temporada de lluvia, el sitio urbano superó al sitio rural en cada componente de radiación a excepción de la reflejada de onda larga ($\uparrow\text{RL}$), puesto que el máximo se observó en Az de 2.38 MJm^{-2} . También se observó la pérdida máxima de los tres periodos de estudio por reflexión de onda corta ($\uparrow\text{RC}$) de -8.01 MJm^{-2} para la zona urbana. En cuanto a la radiación neta (Q^*), la máxima se observó en el sitio urbano de 31.22 MJm^{-2} .



Figura 3. Área fuente de la estación urbana en el edificio Carolino (izquierda) y de la estación rural San Andrés Azumiatla (derecha).

En la Figura 5 se observa que durante la temporada de lluvia (agosto-septiembre) la diferencia entre los sitios urbano y rural es la más baja en todas las componentes del balance de radiación (Tabla 2). En esta figura se registró el mínimo de $\uparrow RC$ y de $\downarrow RL$ de -4.54 y 5.41 MJm^{-2} , respectivamente. La componente de $\uparrow RL$ resultó mayor en Az de -2.10 MJm^{-2} . Respecto a la radiación neta en la época lluviosa, el sitio urbano superó por 1.8 MJm^{-2} al sitio rural, según se muestra en la Tabla 2.

Durante el periodo de secas posterior a la temporada de lluvia, agosto- noviembre (Figura 6), la radiación de onda corta incidente ($\downarrow RC$) y reflejada ($\uparrow RC$) fueron mayores en el sitio urbano. Por otro lado, la radiación de onda larga, la componente incidente ($\downarrow RL$), resultó mayor en la Ca, mientras que la reflejada ($\uparrow RL$) fue mayor en la Az. La radiación neta (Q^*) en Ca fue de 25.21 MJm^{-2} (Tabla 2).

De la Figura 7 se observa que para la zona rural en todos los periodos la radiación es de menor

magnitud que en la estación urbana en todas las componentes. La que presentó la diferencia mínima de todas las componentes de radiación y de todas las campañas de medición fué de 0.68 MJm^{-2} más en el sitio urbano. Las máximas diferencias de radiación neta (Q^*) se observaron en el periodo de secas posterior a la de lluvia (octubre-noviembre) alcanzando 4.75 MJm^{-2} (Tabla 2).

Los balances de radiación diarios comparando la zona rural con la zona urbana se muestra en las Figuras 8, 9 y 10 y, aunque el comportamiento en todas las temporadas es similar en la Figura 8, durante los meses previos a la temporada de lluvia se observa que la estación urbana alcanza amplitudes superiores en la mayoría de las componentes del balance, exceptuando la radiación de onda larga incidente ($\downarrow RL$) y reflejada ($\uparrow RL$). Además se observaron variaciones en la radiación de onda corta incidente ($\downarrow RC$) y neta (Q^*) después de medio día en el caso de la estación Az.

Tabla 2. Energía por unidad de área [MJm^{-2}] en cada componente de la radiación solar entre el sitio Urbano (Ca) y el sitio Rural (Az), durante tres periodos en el 2022

COMPONENTE	PERIODO	URBANA (Ca)	RURAL (Az)	DIFERENCIA (Ca-Az)
$\downarrow RC$	Febrero- Marzo	27.37	24.63	2.74
	Agosto- Septiembre	20.55	19.87	0.68
	Octubre-Noviembre	21.87	18.71	3.16
$\uparrow RC$	Febrero- Marzo	-8.01	-6.10	-1.91
	Agosto- Septiembre	-5.39	-4.54	-0.85
	Octubre-Noviembre	-5.91	-4.81	-1.1
$\downarrow RL$	Febrero- Marzo	13.23	11.22	2.01
	Agosto- Septiembre	6.20	5.41	0.79
	Octubre-Noviembre	10.11	8.21	1.9
$\uparrow RL$	Febrero- Marzo	-1.38	-2.38	1
	Agosto- Septiembre	-0.92	-2.10	1.18
	Octubre-Noviembre	-0.85	-1.65	0.8
Q^*	Febrero- Marzo	31.22	27.37	3.85
	Agosto- Septiembre	20.44	18.64	1.8
		25.21	20.46	4.75

Durante la temporada de lluvia se observó que los flujos de radiación de onda corta $\downarrow RC$ y por ende, la neta (Q^*), muestran durante el día la mayor variación de todas las temporadas. También se observa que la componente de onda corta reflejada ($\uparrow RC$) tiene mayor amplitud en la zona urbana que en la zona rural.

Posterior a la temporada de lluvia, la estación urbana Ca superó a la rural en la energía de onda corta incidente ($\downarrow RC$) y neta (Q^*) en alrededor por 200 MJm^{-2} y además, la amplitud de la radiación de onda corta saliente también fue mayor en la zona urbana. Las variaciones en esta temporada se mantienen, debido a que aún se pueden observar precipitaciones, sin embargo, las variaciones son más notorias en la zona rural.

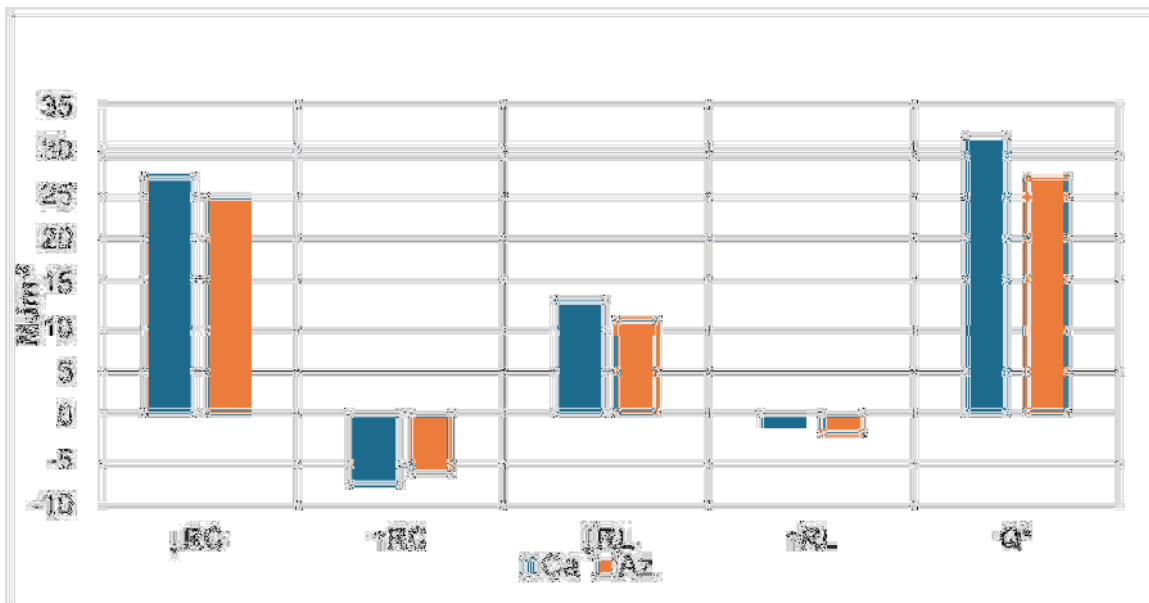


Figura 4. Energía por unidad de área [MJm^{-2}] en cada componente de la radiación solar entre el sitio urbano (Ca) y el sitio rural (Az), durante febrero-marzo 2022

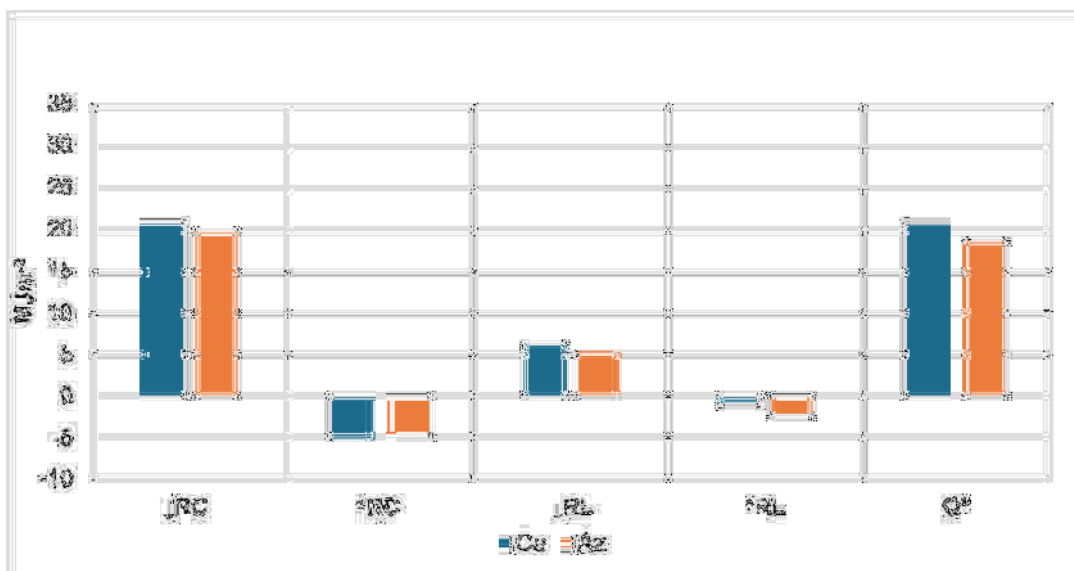


Figura 5. Energía por unidad de área [MJm^{-2}] en cada componente de la radiación solar entre el sitio urbano (Ca) y el sitio rural (Az), durante agosto-septiembre 2022

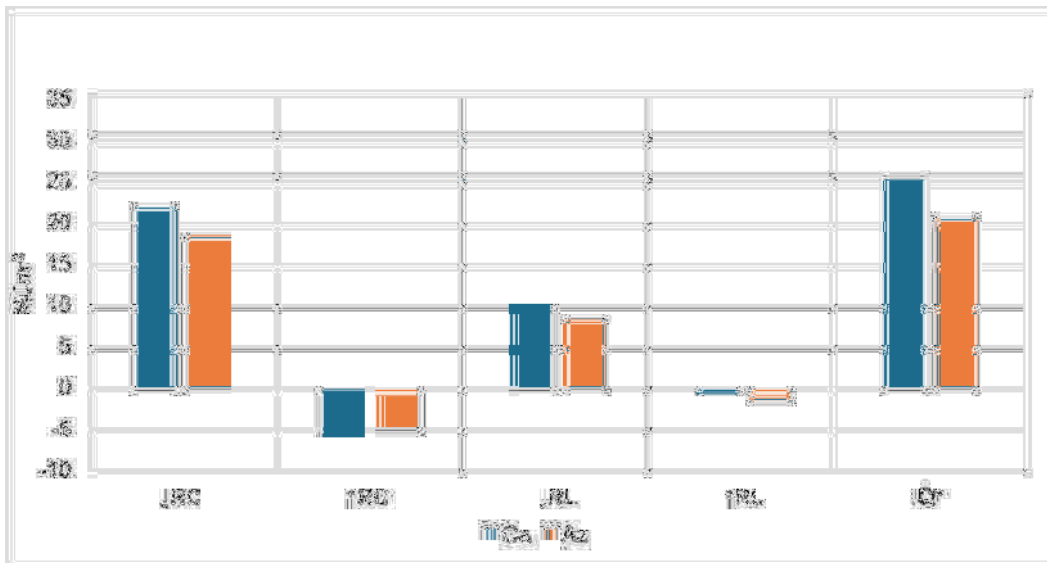


Figura 6. Energía por unidad de área [MJm⁻²] en cada componente de la radiación solar entre el sitio urbano (Ca) y el sitio rural (Az), durante octubre-noviembre 2022

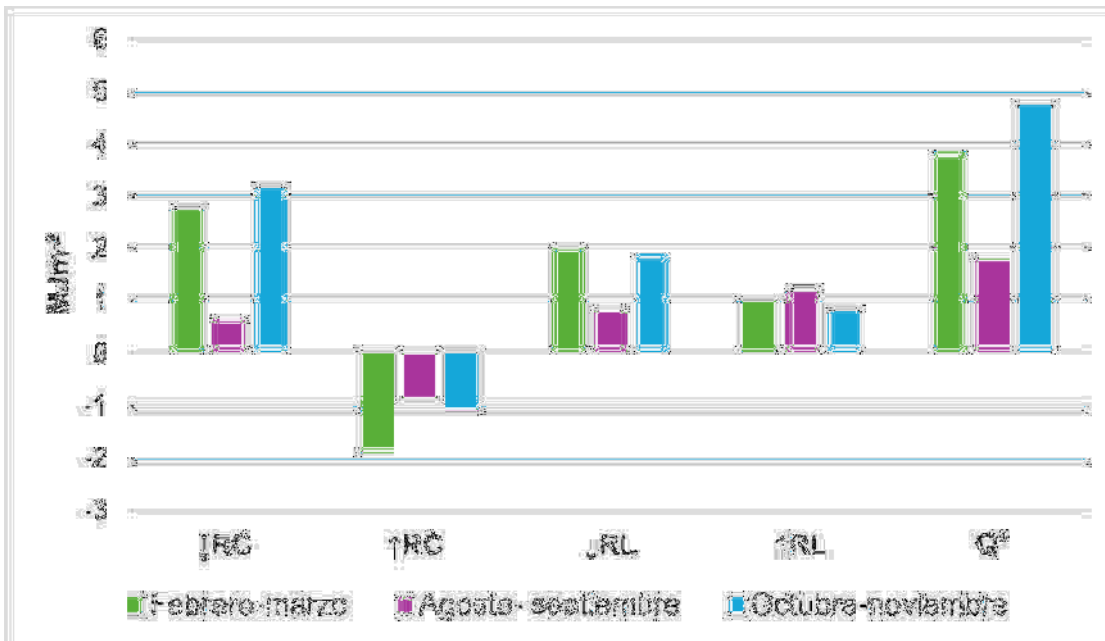


Figura 7. Diferencias de radiación por unidad de área [MJm⁻²] en cada componente de la radiación solar del sitio urbano (Ca) menos el sitio rural (Az)

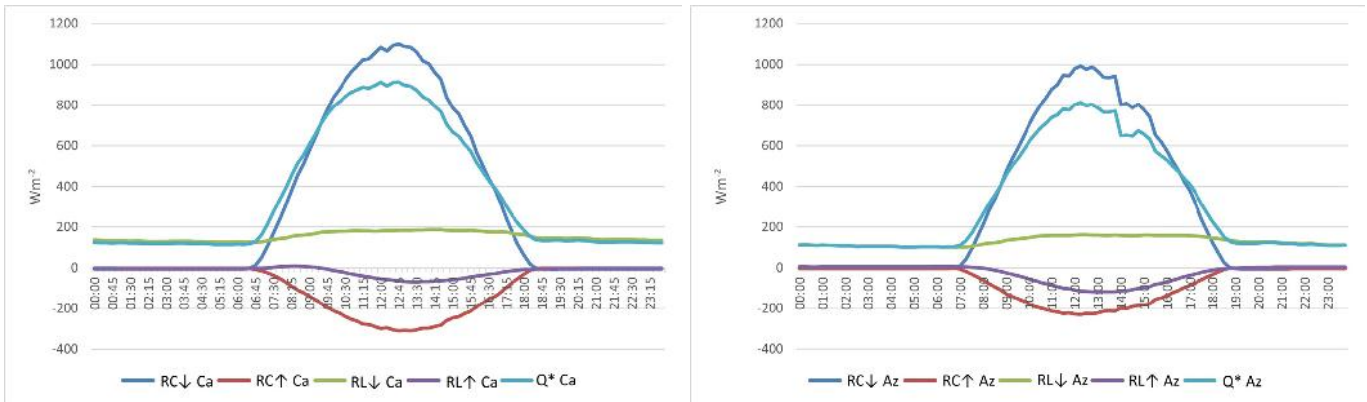


Figura 8. Componentes del balance radiativo en la estación Ca (izquierda) y Az (derecha) durante febrero-marzo 2022.

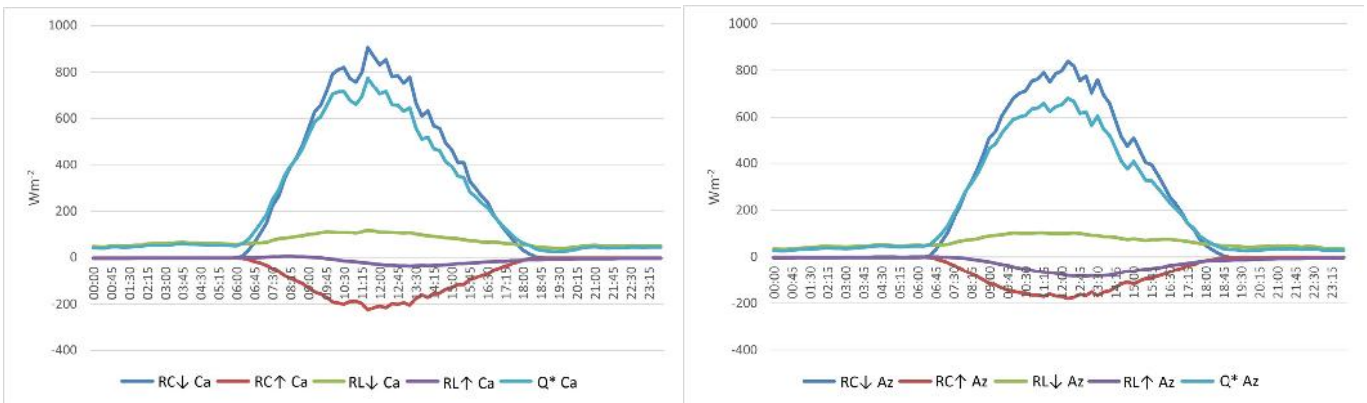


Figura 9. Componentes del balance radiativo en la estación Ca (izquierda) y Az (derecha) durante agosto-septiembre 2022.

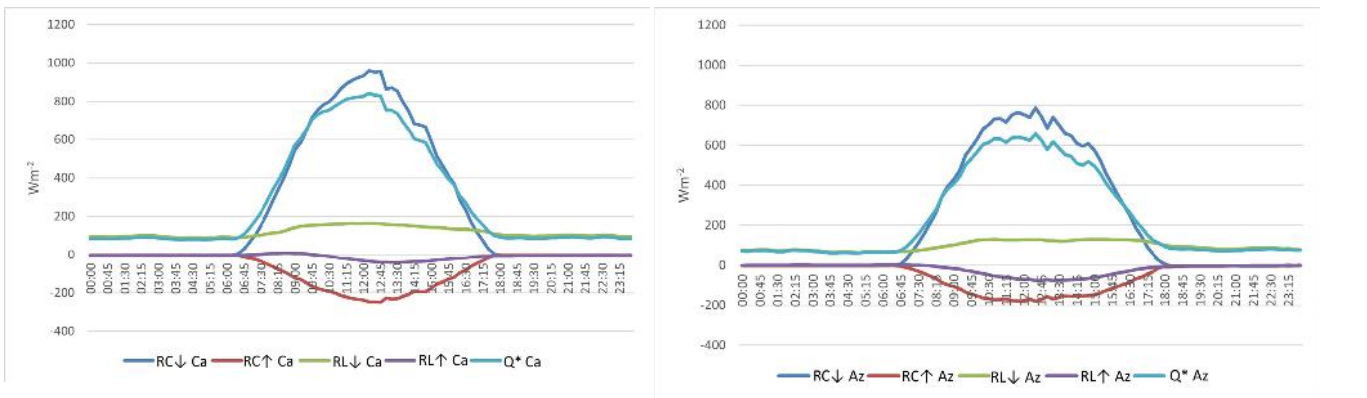


Figura 10. Componentes del balance radiativo en la estación Ca (izquierda) y Az (derecha) durante octubre-noviembre 2022.

Comentarios finales

La radiación neta resulta mayor en la zona urbana para todos los periodos estudiados, observándose una disminución en la temporada de secas posterior a la temporada de lluvias. Con respecto al balance radiativo diurno se destaca que se registró mayor radiación neta en la estación urbana en comparación con la rural. Este comportamiento posiblemente sea similar en otras ciudades del altiplano del país, cuyo ambiente rural es más árido que el urbano, como es el caso de Az versus Ca.

Agradecimientos

Agradecemos a Omar Castro Díaz por sus valiosas sugerencias y al revisor anónimo por sus observaciones pertinentes, que contribuyeron de manera significativa.

Referencias

- Akshay M., Sunil-Kumar M. B., Charan-Kumar K., Gudennavar S. B., Nagaraja K. (2016). Surface radiation Budget over Bengaluru. *Science Spectrum*, v. 1(4), 455-461.
- Balderas-Romero, G. (2018). Efectos climáticos de la urbanización en la Zona Metropolitana de Puebla En: Santillán-Soto, N., García-Cueto, O.R., coordinadores, *Ambiente urbano 2050*. Mexicali, Baja California: Universidad Autónoma de Baja California. ISBN: 9786076074930.
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (s. f.). *Clima y Urbanización en el Valle de Puebla, Estaciones de la RAMM*. BUAP. Recuperado de: <http://urban.diau.buap.mx/estaciones.ph>.
- Beringer, J., and Tapper, NJ. (2000). The influence of subtropical cold fronts on the surface energy balance of a semi-arid site. *Journal of Arid Environments*, 44(4), 437-450. <https://doi.org/10.1006/jare.1999.0608>.
- Campbell - Scientific Inc. (2014 a). *Instruction manual CSAT3 Three-Dimensional Sonic Anemometer*. 72 p.
- Campbell - Scientific Inc. (2014 b). *Instruction manual NR01 Four – Component Net Radiation Sensor*. 46 p.
- Gay, L.W. (1979). Radiation budgets of desert, meadow, forest and marsh sites. *Archiv. für Meteorologie, Geophysik und bioklimatologie*. Vol. 27, 249-259.
- Gaeb, G. M. (1970). Investigaciones del clima de la ciudad de Puebla. *Revista Comunicaciones de la Fundación Alemana*, 2, 25-43.
- Gay, L. W. (1979). Radiation budgets of desert, meadow, forest and marsh sites. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und bioklimatologie*, v. 27, 249-259.
- Hartmann, D. (2016). *Global physical climatology*. 2nd ed. Nueva York. 485 p.
- Hernández, E., A. Tejeda y S. Reyes. (1991). *Atlas solar de la República Mexicana*. Universidad de Colima/ Universidad Veracruzana. México, 154 p.
- Ho-Taek Park, Hattori S., Tanaka T., Gyung-Soo C., (1999). Seasonal variations in radiation and energy balance in a deciduous broad-leaved forest. *J. For. Res*, v.4, 261-269.
- INEGI (2021). *Panorama sociodemográfico de Puebla: Censo de Población y Vivienda 2020*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197940.pdf.
- Marcolla, B., and Cescatti, A. (2018). Geometry of the hemispherical radiometric footprint over plant canopies. *Theoretical and Applied Climatology*, 134, 981-990

Molina-Prior, S. (2013). Mediciones y estimaciones de balance energético en el sistema superficie/atmósfera de la Ciudad de Puebla. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana, Veracruz. México.

Manuscrito recibido: 26 febrero 2025
Recepción del manuscrito corregido: 25 abril 2025
Manuscrito aceptado: 30 abril 2025

Oke, T. R., Spronken-Smith, R. A., Jauregui, E. and Grimmond, S. (1999). The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment*, v. 33, 3919–3930.

Sánchez, M. (1992). Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración 1st ed. Logroño (España): Geoforma ediciones. (p. 3-13).

Schmid, H.P. (1997). Experimental design for flow measurements: matching scales of observations and flows. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 87 (2-3), 179-200.

Secretaría de Protección Civil y Gestión Integral de Riesgos (2018). Programa Municipal de Protección Civil del Municipio de Puebla 2018-2021. https://memorias.pueblacapital.gob.mx/images/PMPC_Version_Final.pdf.

SMN (2020). Información y catálogo EMAS, consultado en octubre del 2021. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-emas>.

Wallace J.M. and Hobbs P.V. (2005). *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. 2nd ed.

Wild, M., Ohmura, A., Schär, C., Müller, G., Folini, D., Schwarz, M., Hakuba, M.Z & Sanchez-Lorenzo, A. (2017). The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: A database for worldwide measured surface energy fluxes. *Earth System Science Data*, 9(2), 601-613. <https://doi.org/10.5194/essd-9-601-2017>.

Observaciones del Tsunami de Kamchatka del 29 de julio, 2025, en la costa occidental de México

Modesto Ortiz Figueroa¹, Laura G. Ortiz Huerta², Gabriel Echeagaray Collantes¹,
Norma Angelica Ramírez Mondragón¹

¹Departamento de Oceanografía Física, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

²Railroad Comission of Texas, Oil and Gas Division.

email: ortizf@cicese.mx

Presentación

El 29 de julio ocurrió un sismo de magnitud M 8.8 en la península de Kamchatka, Rusia, a las 17:24:52 horas, hora del centro de México. Por ser de gran magnitud, el sismo disparó la alerta de tsunami en todo el Océano Pacífico. Con base en registros históricos de tsunamis y en modelos matemáticos recientes, el centro de operaciones del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis emitió boletines de Alerta de Tsunami a partir de las 19:18 horas, dirigidos a las unidades de protección civil y demás autoridades competentes, indicando que el tsunami no sobrepasaría el metro de altura en la costa occidental de México, sin descartar la presencia de corrientes fuertes, en particular en la entrada de los puertos, recomendando a la población mantenerse alejada de las playas. A su vez, los medios de comunicación en general difundieron el boletín en los noticieros de la noche en voz de la Presidenta de México, la Dra. Claudia Sheinbaum Pardo, dando tranquilidad a la población. No se reportaron daños por tsunami en los días subsecuentes.

En el esquema de propagación del tsunami en el Océano Pacífico (Figura 1), se aprecia que la mayor energía del tsunami se dirigió hacia la costa de Chile, donde la altura del tsunami pudo haber sobrepasado el metro de altura.

En los registros de este tsunami en la costa occidental de México (Figura 2), se aprecia como el tsunami llegó al puerto de Ensenada, Baja California, a las 3:00 horas del 30 de julio (hora del centro de México; 9.5 horas después del tiempo de origen del sismo) con altura de 33 cm sobre el nivel de la marea, con “olas” subsecuentes de hasta 66 cm de altura a intervalos de entre 21 y 45 minutos durante al menos las 48 horas siguientes.

En el puerto de Manzanillo, Colima, el tsunami llegó con altura inicial de 17 cm a las 5:40 horas, con “olas” subsecuentes de entre 50 y 80 cm de altura, a intervalos regulares de 30 minutos durante al menos las 48 horas siguientes.

En el puerto de Acapulco, Guerrero, el tsunami llegó con altura inicial de 13 cm a las 7:30 horas, con “olas” subsecuentes de hasta 30 cm de altura a intervalos regulares de 30 minutos durante al menos las 48 horas siguientes.

En contraste, el tsunami fue apenas perceptible, sin sobrepasar los 10 cm de altura, en la Bahía de San Quintín, Baja California; en la laguna Ojo de Libre en Guerrero Negro, Baja California Sur, y en el puerto de Cabo San Lucas, Baja California Sur.

El Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis de México (SINAT), está conformado por instituciones gubernamentales y académicas, a saber: la Secretaría de Gobernación (SEGOB), la Secretaría de Marina (SEMAR), la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE).

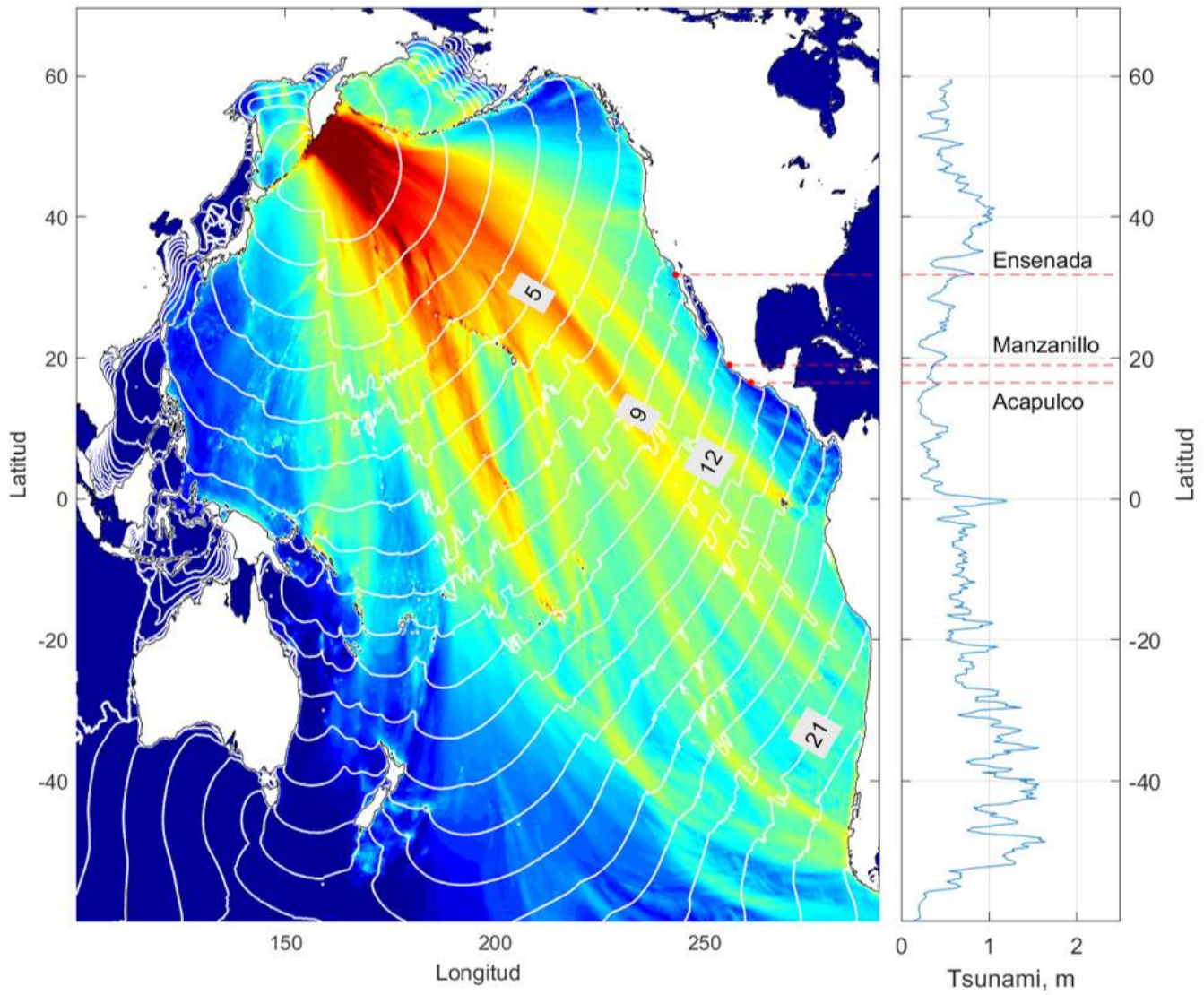


Figura 1. Esquema de propagación del tsunami de Kamchatka, Rusia del 29 de julio, 2025. Las mayores alturas del tsunami se indican hacia el color rojo. El tiempo de propagación se indica con líneas de fase a intervalos de una hora. En el panel de la derecha se indica le altura esperada del tsunami a lo largo de la costa.

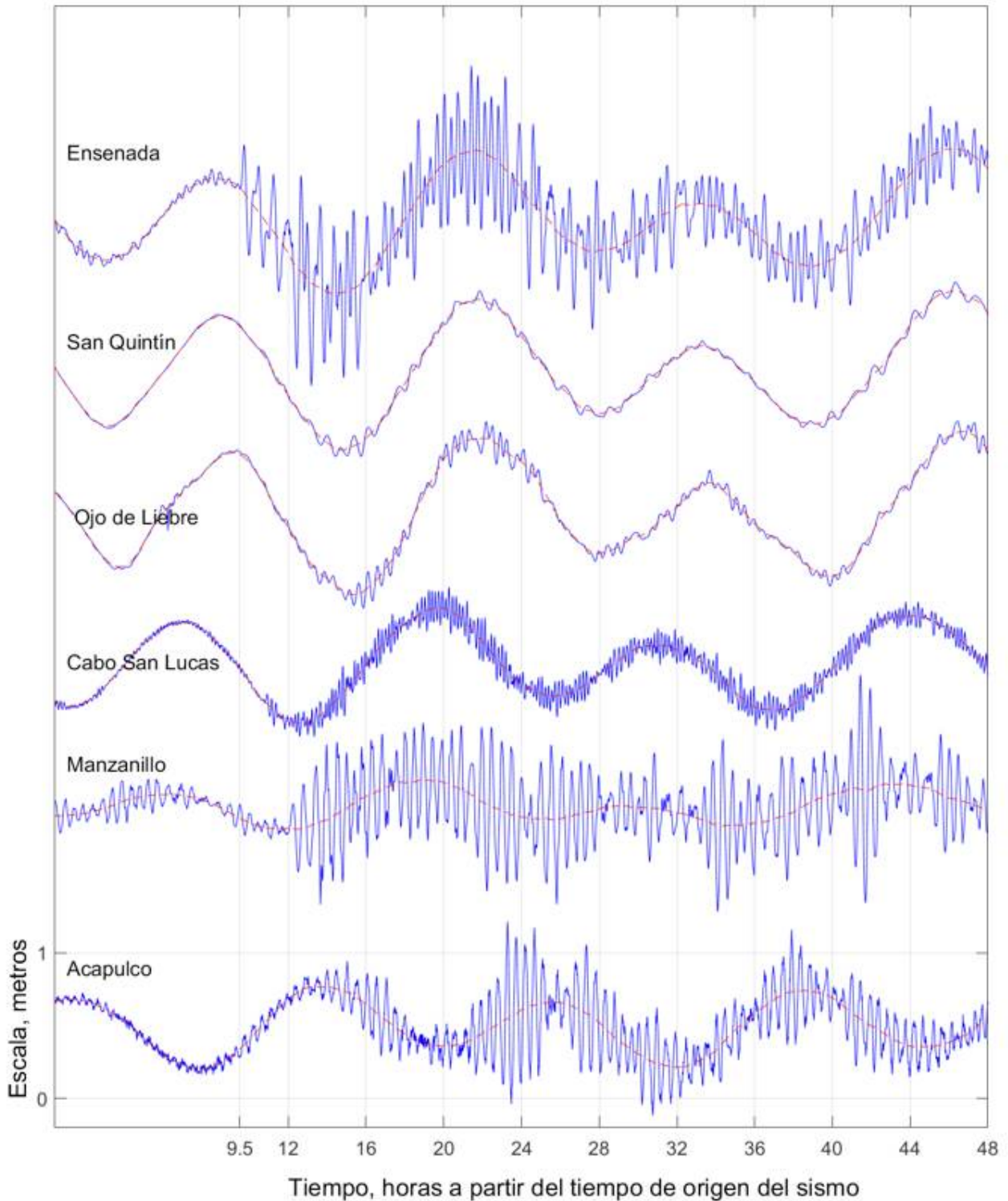


Figura 2. Registros o mareogramas del Tsunami de Kamchatka, Rusia del 29 de julio, 2025, en la costa occidental de México. El nivel del mar o marea esperada se indica con línea roja. La línea azul indica el nivel del mar observado en tiempo real en las estaciones de la Red Mareográfica de apoyo al Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis, operada por las siguientes instituciones mencionadas en orden alfabético: CICESE, IMT-SICT, SEMAR, UNAM.

El sistema Nacional de Alerta de Tsunamis opera en el marco del Convenio General de Coordinación publicado en el Diario Oficial de la Federación el 17 de enero del año 2013. En este convenio se establece que el centro de operaciones del SINAT es el Centro de Alerta de Tsunamis (CAT), operado por la SEMAR las 24 horas de los 365 días del año. Corresponde única y exclusivamente al CAT la emisión de los boletines de alerta y de cancelación de la alerta, con el apoyo de los miembros del SINAT.

En las Figuras 3 y 4 se muestra, a manera de computadora analógica, la altura máxima esperada de tsunamis a lo largo de la costa occidental de México. Tsunamis producidos por sismos de magnitud M 9.3 que pudiesen ocurrir al rededor del cinturón de fuego del Pacífico. Estas estimaciones tienen fundamento en modelos matemáticos que han sido validados con los registros históricos y recientes de tsunamis que han impactado la costa occidental de México, y constituyen uno de los criterios para emitir los boletines de alerta de tsunamis.

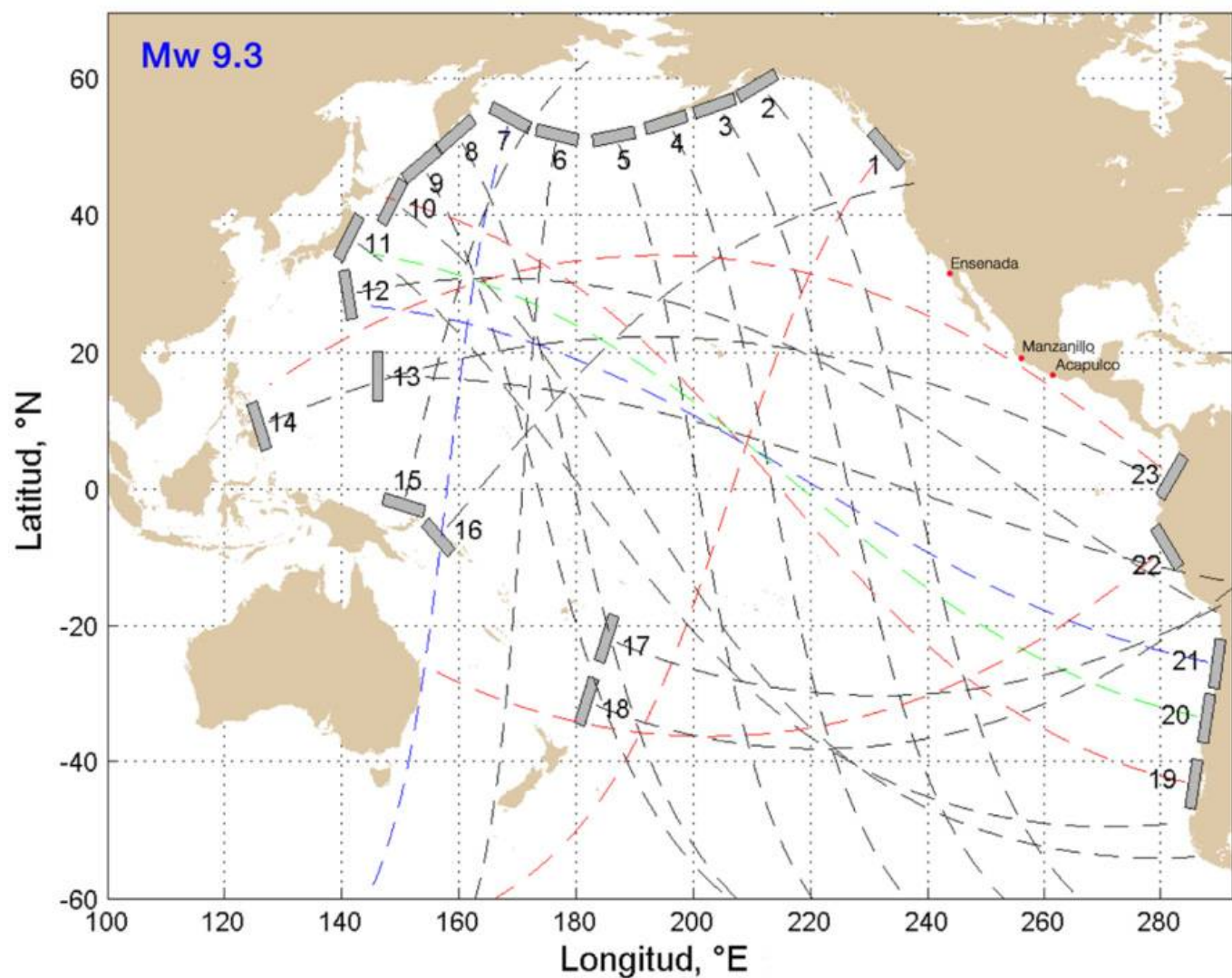


Figura 3. Los rectángulos grises indican las áreas de ruptura hipotéticas de terremotos de magnitud M 9.3 en las 23 regiones de subducción del Cinturón de Fuego del Océano Pacífico. Las líneas a trazos indican de manera aproximada la direccionalidad del tsunami a lo largo del Gran Círculo perpendicular al área de ruptura correspondiente (Ortiz-Huerta *et al.*, 2018; Ortiz-Huerta y Ortiz, 2021).

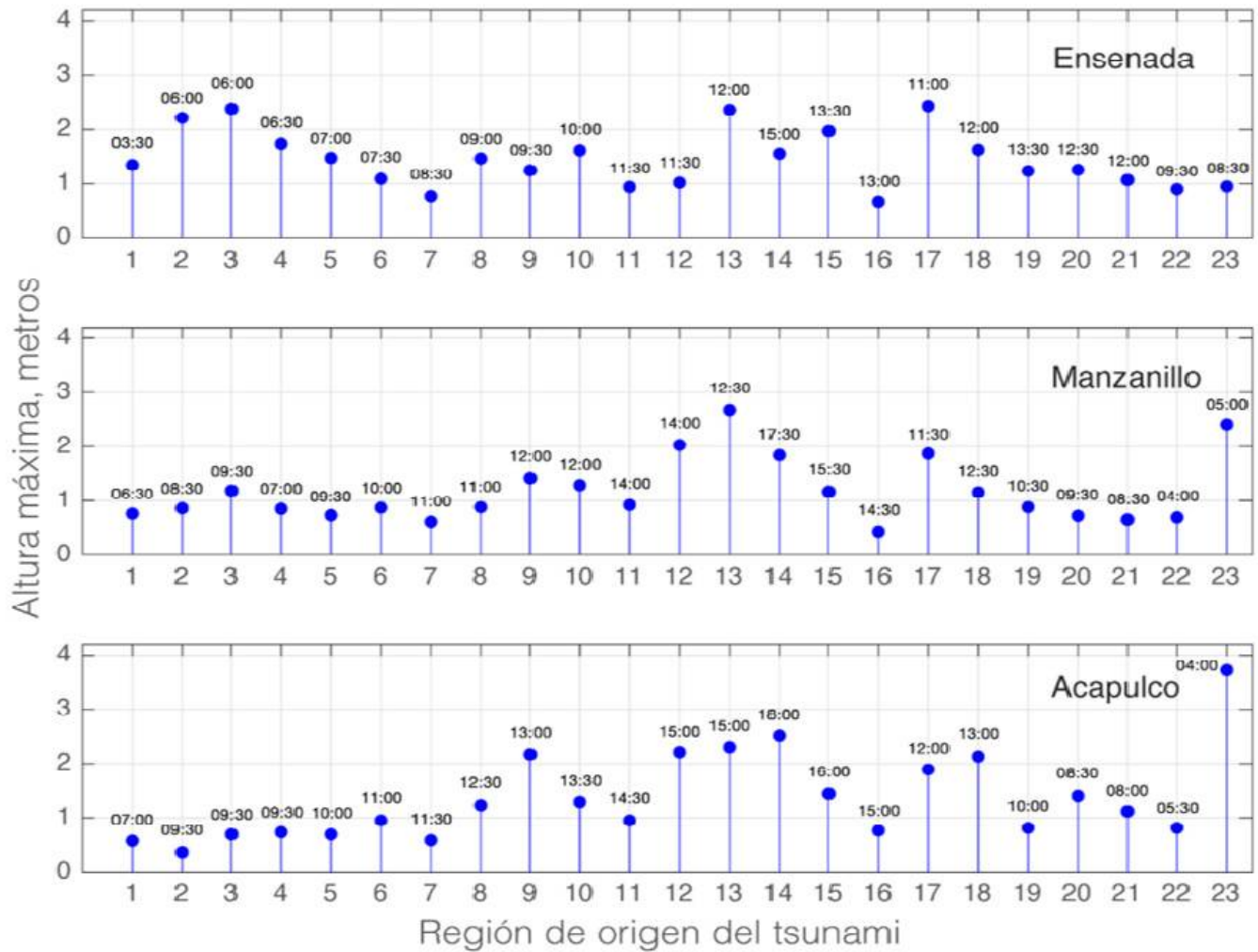


Figura 4. Altura máxima estimada, sobre el nivel de la marea, de los tsunamis sintéticos provenientes de cada una de las 23 regiones que se indican en la Figura 3. El tiempo de arribo de los tsunamis correspondientes se indica en horas y minutos (hh:mm) a partir del tiempo de origen del tsunami (Ortiz-Huerta et al., 2018; Ortiz-Huerta y Ortiz, 2021).

El rectángulo número 8 que se indica en la Figura 3, corresponde a la región de Kamchatka, Rusia, zona de origen del reciente tsunami.

Agradecimientos

A los Oficiales de la SEMAR miembros de Centro de Alerta de Tsunamis por su vigila perene y por aceptar con temple de acero la responsabilidad de emitir los boletines de pronóstico de tiempos de arribo y de alturas esperadas de tsunami. A los operadores de las redes mareográficas por su constancia, tanto en el campo, como en el laboratorio, haciendo posible las observaciones del nivel del mar en tiempo real como apoyo al Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis.

Referencias

- Ortiz-Huerta L. G., Ortiz M., García-Gastélum A. (2018). Far-field tsunami hazard assessment along the Pacific coast of Mexico by historical records and numerical simulation. *Pure and Applied Geophysics*, 175(4), 1305-132. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1816-y>.
- Ortiz-Huerta L. G. (2019). Far-field tsunami hazard assessment along the Pacific Coast of Mexico by historical records and numerical simulation. PART II: Tsunami-Induced currents in the Port of Ensenada, Baja California. *Pure and Applied Geophysics*, 177, 1569– 1581. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02319-9>.
- Ortiz-Huerta L. G., Ortiz Modesto. (2021). Tsunamis en la Costa Occidental de México y en el mar de Cortés. José Gómez Valdés, Editor. Editorial CICESE. 113 pp. ISBN 978-607-8811-21-2. Disponible en www.cicese.edu.mx en la sección de consultas públicas ¿Cómo me puedo preparar ante un tsunami?

Manuscrito recibido: 5 agosto 2025

Manuscrito aceptado: 5 agosto 2025

El reloj de Sol del majestuoso convento de Santo Domingo de Guzmán, Oaxaca y la ciencia novohispana en el siglo XVII

¹Campos-Enríquez, J.O., ²Noria-Sánchez, J.L.

¹Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

²Museo de las Culturas de Oaxaca, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.

j.oscarcampos@hotmail.com

Resumen

Un reloj de sol fue construido por Fray Diego Rodríguez, fraile de la orden de Nuestra Señora de la Merced, Redención de los Cautivos, quien de 1637 a 1668 fue propietario de la cátedra de matemáticas de la Real y Pontificia Universidad de México. El reloj fue elaborado ex-profesamente para adornar el convento de Santo Domingo de Guzmán, Oaxaca. Aquí se relata brevemente la historia de este instrumento que nos permite considerar el alto nivel de la ciencia novo-hispánica del siglo XVII. Este reloj de sol puede ser contemplado y apreciado en el actual Museo de las Culturas de Oaxaca.

Abstract

A sun horologe was constructed by Fray Diego Rodríguez, friar of the order of Our Lady of Mercy, Redemption of Captives, who from 1637 to 1668 was owner of the chair of mathematics of the royal and pontifical university of Mexico. The sun clock was expressly elaborated to decorate the convent of Santo Domingo, Oaxaca City, Mexico. Its, here summarized history illustrates the high level of the science in new Spain in the XVII century. The sundial can be appreciated in the present Oaxaca Cultures Museum of Oaxaca City.

Presentación

El tiempo ha sido y es un elemento fundamental de nuestras civilizaciones. Desde muy tempranas épocas el ser humano encontró empíricamente que el ritmo del día estaba controlado por la salida y la puesta del Sol, y que las estaciones del año estaban regidas por los movimientos del Sol y la siembra y la cosecha se hacen conforme a estos ciclos estacionales. La observación de los astros fue sistematizada por las sociedades humanas y ya en la antigüedad, alcanzó un notable desarrollo en las grandes civilizaciones prehispánicas, como la Maya, la Inca y muchas otras en América, paralela e independientemente a las de otros continentes. El reloj de Sol constituyó un desarrollo tecnológico que se logró gracias a los conocimientos de la astronomía, y jugó un papel de importancia en el desarrollo de

nuestras sociedades. Existen relojes verticales y horizontales. En la Figura 1 se indican las partes de un reloj solar vertical. Las partes de un reloj de Sol son el cuadrante donde se ubican las líneas horarias, el estilete, llamado gnomón y las líneas horarias.

En la Figura 2 se ilustra como la sombra del estilete, llamado gnomón, se va desplazando a lo largo del cuadrante del reloj conforme el Sol se desplaza de oriente a occidente. Las líneas horarias cubren el periodo de 12 horas que inicia con el amanecer y termina al anochecer. La posición horaria central correspondiente al medio día, así como de las otras líneas horarias, y de la inclinación del gnomon con respecto al plano vertical, se determinan mediante técnicas astronómicas.

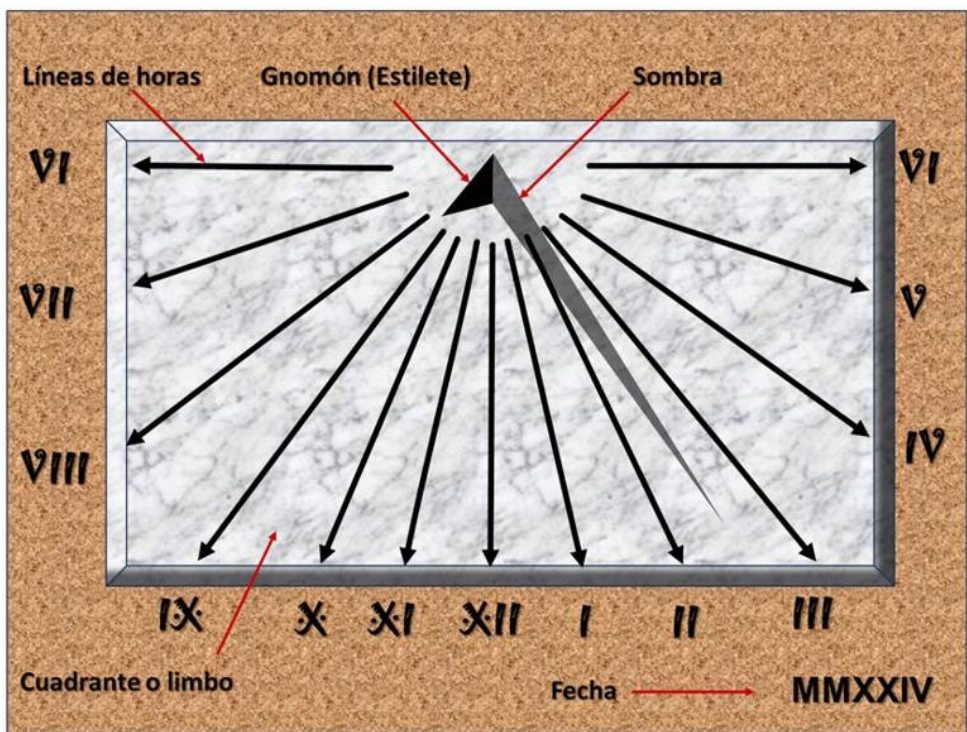


Figura 1. Esquema de un reloj de Sol de pared y sus partes.

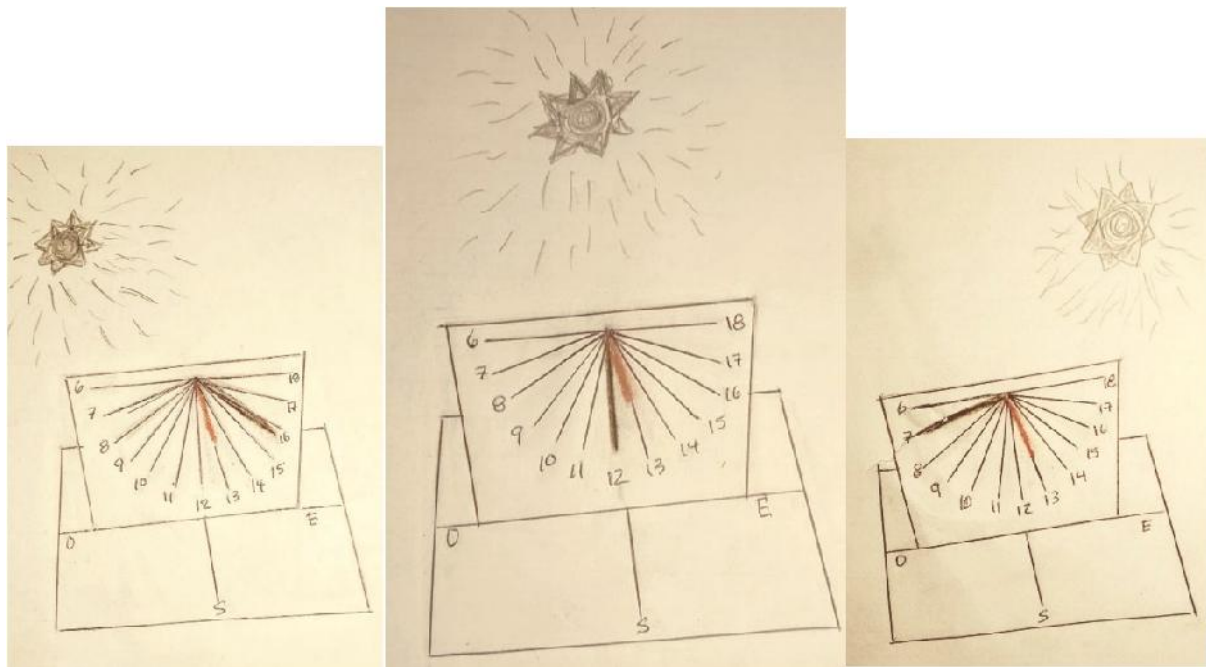


Figura 2. Ilustración de cómo un reloj solar indica la hora del día en función de la posición del Sol. En la figura de la derecha se ilustra cómo se indican las horas durante la mañana. En la figura central se tiene la indicación del medio día (12 horas) y, en el esquema de la izquierda, se ilustra un ejemplo de las horas vespertinas.

Benito María de Moxó, historiador que publicó su obra *Cartas Mejicanas* en 1806, reporta que en la zona de Chapultepec, en el jardín botánico de Moctezuma, se encontró un reloj de Sol labrado en roca y presuntamente usado por los mexicas. Ese reloj fue destruido para emplear la roca como material de construcción en las edificaciones de la ciudad de México. Parte de la sabiduría de la astronomía prehispánica se perdió con las guerras de conquista y la colonización española.

En el siglo XVII la ciencia moderna basada en el método científico se desarrolló en Europa. Su difusión e impulso también tiene lugar en la Nueva España. La invención del telescopio permitió la observación de los astros y así la astronomía tuvo un auge que estimuló el desarrollo de la ciencia moderna, en particular, en el México colonial.

La astronomía de observación de principios del siglo XVII permitió elaborar en Nueva España, calendarios, efemérides y almanaques que ayudaron a fijar los periodos de siembra, de lluvia y cosecha, se estudiaron eclipses solares y lunares, así como a los cometas. Las observaciones astronómicas de los eclipses eran usadas para determinar la longitud geográfica de ciudades o de regiones, que son datos útiles para la navegación marítima y la cartografía.

En el mencionado siglo, varios sabios novohispanos se dedicaron a la tarea de determinar la longitud geográfica de la ciudad de México. Entre ellos podemos mencionar a Henrico Martínez, Diego de Cisneros, Fray Diego Rodríguez, y a Carlos de Sigüenza y Góngora.

En la ciudad de Oaxaca, en la iglesia de Santo Domingo de Guzmán, se encuentra un reloj de Sol cuya historia está ligada con el desarrollo de la ciencia moderna en México. Fue construido durante la colonia por Fray Diego Rodríguez, fraile de la orden de Nuestra Señora de la Merced, Redención de los Cautivos, quien de 1637 a 1668 fue propietario de la cátedra de matemáticas

de la Real y Pontificia Universidad de México. Fray Diego Rodríguez, de 1630 a 1670, junto con Carlos de Sigüenza y Góngora, de 1670 a 1700, son dos figuras prominentes del pensamiento científico en el siglo XVII de la Nueva España.

La obra de Fray Diego Rodríguez, la más vasta producida por una sola persona durante el siglo XVII, constituye un testimonio del desarrollo de la ciencia en el México colonial. Comprende seis manuscritos y un impreso. Además, elaboró un manuscrito sobre logaritmos que se tiene perdido. Su obra incluye tablas astronómicas y trigonométricas. Uno de sus manuscritos versa sobre la construcción de relojes de Sol. Basado en sus observaciones astronómicas de los eclipses de Luna del 20 de diciembre de 1638 y de Sol del 9 de mayo de 1641, Fray Diego calculó, en 1638, la longitud geográfica de la ciudad de México en 112° al oeste del observatorio de Uranienburgo ubicado en la isla Hveen de Dinamarca. Este observatorio fue concebido por el famoso astrónomo Tycho Brahe. Resultados similares fueron obtenidos independientemente por Carlos de Sigüenza y Góngora, y Gabriel López de Bonilla.

Cabe mencionar que más tarde, en el siglo XVIII, no existía consenso sobre el valor de la longitud geográfica de la Ciudad de México. L'Isle, en 1720, obtuvo $104^\circ 45'$, Hire, en 1727, daba una longitud de $107^\circ 30'$, Cassini en 1740 reportaba el valor de 106° . En España, Villaseñor, daba la longitud de $105^\circ 50'$. En México, José Antonio Alzate reportaba $100^\circ 30'$. Velázquez de León obtuvo un valor de $101^\circ 45'$ y en 1778, junto con León y Gama, obtiene $101^\circ 30'$.

Desde la azotea del Palacio de Minería, Alejandro von Humboldt determinó la longitud geográfica de la ciudad de México en 101 grados $25'' 30''$. Esta determinación la realizó siglo y medio después de la determinada por Fray Diego Rodríguez. Al analizar las longitudes del fraile, así como la de Sigüenza y Góngora, con bastante

desconcierto, las desestimó considerando que las habían “adivinado bastante bien”, pues consideró que los sabios novohispanos no poseían la capacidad para obtener tales resultados.

Francisco Díaz Covarrubias, en 1859, reporta el valor más preciso de $99^{\circ} 7' 8''$ con relación al observatorio de Greenwich. En 1881, teniendo en cuenta que Diego Rodríguez calculó la longitud con respecto a Uranienburgo (ubicada $32^{\circ} 30'$ más al este de Greenwich), Orozco y Berra, hombre de ciencia e historiador mexicano, estimó una diferencia de tan sólo doce segundos de arco entre estas respectivas determinaciones.

Más aún, al comparar la longitud geográfica establecida por los astrónomos novohispanos con la obtenida por Francisco Díaz Covarrubias a mediados del siglo XIX, concluye que la determinación geográfica de la longitud obtenida 165 años antes era más precisa que la estimada por el estudioso alemán.

Manuel Orozco y Berra al analizar el desdén de Humboldt hacia las determinaciones astronómicas de los sabios novohispanos del siglo XVII, encontró que este sabio no había considerado los verdaderos datos y cálculos de Fray Diego.

Como se ha mencionado, la determinación de la longitud geográfica constituía un problema. La divergencia entre los valores reportados en el siglo XVII indica que la determinación de la longitud geográfica de un lugar constituía un problema limitado por la precisión de los instrumentos de observación (telescopio) y de medición del tiempo (relojes de Sol).

Fray Diego Rodríguez tenía un profundo conocimiento de la astronomía y usó el método de diferencia horaria en que un fenómeno astronómico era observado en la ciudad de México y otro lugar. Como ya se mencionó, se basó en su observación del eclipse lunar ocurrido

el 20 de diciembre de 1638, la cual fue referida a observatorios en Venecia, Graz, Hveen-Uranienburgo, Fráncfort, y Roma. La diferencia horaria es traducida a grados.

Fray Diego fue un excelente matemático, lo que le permitió elaborar sus propias tablas de funciones trigonométricas y de logaritmos de mucha precisión, 30 años antes que en la España misma. Construyó aparatos matemáticos como compases de proporciones y de reducción, escalas graduadas y otros instrumentos que facilitaban cálculos topográficos y de navegación, engorrosos de realizar con base en tablas, y que fueron usados en labores de agrimensura.

El desarrollo de la ciencia moderna en el siglo XVII exigió la construcción de nuevos instrumentos de medición y de observación. Como los hombres de ciencia de esa época, Fray Diego construyó sus propios instrumentos de medición y de observación. Con máquinas especiales como tornos, husos y taladros, fabricaba en cobre, bronce, latón y plata las piezas necesarias para estos instrumentos. Su biógrafo reporta que muchos de estos aparatos los construyó con sus propias manos. Entre los instrumentos astronómicos que fabricó podemos citar ballestillas, sextantes, astrolabios, telescopios y relojes de Sol. Los relojes de Sol constituían el instrumento de medición del tiempo usado en las observaciones astronómicas de ese siglo.

En la ciudad de Oaxaca, los frailes dominicos adornaron la puerta sur de la iglesia de su majestuoso convento de Santo Domingo de Guzmán con un reloj de Sol obsequiado por la orden de los mercedarios y que para ese fin expreso le fue solicitado a Fray Diego. La fachada donde se adosó verticalmente el instrumento da a la antigua calle del “Relox”, hoy calle 5 de Mayo. El reloj fue mudado al interior del convento y se colocó en la parte superior del claustro alto. Hoy en día el espléndido edificio del ex convento está ocupado por el Museo de las Culturas de Oaxaca.

El reloj está esculpido en una loza de basalto de 1.73 m de alto por 0.74 m de ancho. En su parte inferior tiene grabado: "Año 1639". El orificio del gnomón está posicionado a 32 cm de la parte superior y a 37 cm de los lados. Las líneas horarias se encuentran entre los centímetros 15 y 12. Este reloj es del tipo vertical declinante diseñado para una posición que no fuera la este-oeste. En su parte izquierda tiene marcadas las líneas horarias matutinas 5, 6, 7, 8, 9, 10, y 11. A la derecha de la línea que marca el medio día, y que corta oblicuamente las líneas horarias, se tiene la zona de las horas vespertinas.

Para elaborar este reloj, Fray Diego debió establecer tanto la longitud como la latitud de Oaxaca, ya que para que la sombra del gnomón caiga al medio día sobre la línea meridiana, el gnomon debe formar junto con la horizontal del lugar un ángulo en grados igual a la inclinación geográfica del lugar. Para construir relojes de Sol se requería un conocimiento profundo de astronomía. Afortunadamente la descripción de este interesante reloj de Sol se encuentra en la obra legada por este sabio matemático y astrónomo del siglo XVII.

Nota bibliográfica: Este trabajo de divulgación está basado en la Historia de la Ciencia en México del historiador contemporáneo Elías Trabulse.

Nota del editor: Este trabajo fue revisado por un árbitro anónimo.

Referencias

- Mendoza Vargas, H., 1991, Humboldt y la Geografía de Latinoamérica, Memoria del III Encuentro de Geógrafos de América Latina, Toluca, México. 18 al 22 de marzo 1991. INEGI-Universidad Autónoma del Estado de México, Escuela de Geografía. T. I. p. 30-43.
- Moreno Corral, M.A. (comp.), 1995, Historia de la Astronomía en México, Col. La Ciencia desde México, 2da. Ed., México, Fondo de Cultura Económica.
- Moreno y de los Arcos, R., Joaquín Velázquez de León y sus Trabajos Científicos Sobre el Valle de México, 1773-1775, México, UNAM, Facultad de Filosofía y Letras, 1973 (tesis), pp.144 ss.
- Orozco y Berra, M., 1881, Apuntes para la Historia de la Geografía en México, México, Imprenta de F. Díaz de León, Facsímil, México: Biblioteca Mexicana de la Fundación Miguel Alemán, 1993.
- Rodríguez, Diego, Tratado del modo de fabricar relojes Horizontales, Verticales, Orientados con declinación, inclinación o sin ella; por senos rectos, tangentes etc., para por vía de Números fabricarlos con facilidad. Por el P. F. Diego Rodríguez Mercedario Calzado de Mejico. (145 f.), Biblioteca Nacional de México, Sección de Manuscritos, Signatura: MS, 1521
- Tellez Fabiani, E., 2003, Observatorio Astronómico Nacional, Trabajos Fotográficos y Geográficos bajo la dirección de Angel Anguiano (1877-1899), Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana, México, pp.154.
- Trabulse, E. (ed.), 1985, Historia de la Ciencia en México. Estudios y textos, Cinco Tomos, México, CONACYT y Fondo de Cultura Económica.
- Trabulse, E., 1984, El Círculo Rojo: Estudios históricos sobre la ciencia en México, Secretaría de Educación Pública/Fondo de Cultura Económica, México, pp.247.

Manuscrito recibido: 22 mayo 2024

Recepción del manuscrito corregido: 29 enero 2025

Manuscrito aceptado: 26 marzo

Plataforma virtual para evaluar la vulnerabilidad sísmica: ciencia, tecnología e innovación al servicio del Perú

Leandro Rodríguez Valverde

Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS)

email: ceresis.direccionejecutiva@gmail.com

Presentación

En un país como el Perú, ubicado en pleno Cinturón de Fuego del Pacífico, el riesgo sísmico es una amenaza permanente. Cada generación recuerda tragedias como el terremoto de Áncash en 1970 o el de Pisco en 2007, eventos que marcaron la memoria colectiva y dejaron una lección urgente: anticipar y mitigar los efectos destructivos de los sismos es una necesidad impostergable.

En este contexto, la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), a través de la Red Acelerográfica del Centro de Investigación en Transformación Digital en Ingeniería (CITDI), en alianza con el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), presenta un avance tecnológico sin precedentes en la región: la Plataforma Virtual de Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones, disponible en:

<https://vulnerabilidad-sismica.uni.edu.pe/vulne/create>.

Se trata de una herramienta innovadora, gratuita y accesible, diseñada para acercar la ciencia a la ciudadanía y poner la prevención sísmica al alcance de todos.

Palabras claves: Plataforma virtual; vulnerabilidad sísmica; Perú.

¿Qué es la Plataforma Virtual de Vulnerabilidad Sísmica?

La plataforma permite que cualquier usuario —desde un ciudadano hasta un municipio o institución pública— pueda evaluar, en pocos minutos, el nivel de vulnerabilidad sísmica de una edificación.

A través de un formulario simple e intuitivo, se recopilan datos como:

- Uso de la edificación (vivienda, comercio, institución, etc.).
- Ubicación geográfica.
- Tipo de suelo.
- Número de pisos.
- Materiales predominantes.
- Presencia de elementos estructurales críticos.
- Estado de conservación y mantenimiento.

Con esta información, la plataforma genera un resultado inmediato, clasificando la edificación en tres niveles de vulnerabilidad: baja, media o alta. Este diagnóstico preliminar constituye una alerta temprana que puede guiar acciones cruciales, como reforzamientos estructurales, estudios técnicos detallados o incluso medidas extremas, como la reubicación.

Fundamentos Técnicos y Metodologías Aplicadas

La solidez científica de esta herramienta radica en la integración de metodologías internacionales de evaluación rápida, adaptadas a la realidad peruana:

- Índice de vulnerabilidad para edificaciones de mampostería y concreto armado (Benedetti y Petrini, 1982).
- Sistema de puntuación que evalúa cimentación, geometría y tipo de suelo (Chang, 1995).
- Inspección visual rápida para priorizar edificaciones críticas (FEMA P-154, 2015).

El equipo del CITDI y del CERESIS ha realizado la adaptación contextual de estos modelos, considerando factores propios del país, como la diversidad constructiva, pues la alta informalidad en el sector de la construcción es un factor transversal que condiciona la vulnerabilidad sísmica de nuestras ciudades. Cuando hablamos de “informalidad” no nos referimos solo a la ausencia de licencias o planos aprobados, sino a todo un conjunto de malas prácticas que van desde el desconocimiento de las técnicas constructivas adecuadas, el uso de materiales de baja calidad o sin control, hasta fenómenos más estructurales como la corrupción en la fiscalización y la permisividad normativa, así como condiciones geotécnicas variables.

Una Herramienta Transformadora para la Mitigación del Riesgo Sísmico

1. Perú, un país altamente sísmico

Con antecedentes devastadores, la capacidad de identificar edificaciones vulnerables antes del desastre marca la diferencia entre la pérdida y la preservación de vidas.

2. Soporte a políticas públicas y planificación urbana

Gobiernos locales, regionales y entidades del Estado pueden emplear la plataforma para diagnósticos urbanos masivos, bases de datos de microzonificación sísmica y planes de inversión en infraestructura segura.

3. Educación y empoderamiento ciudadano

Cada usuario se convierte en protagonista de la prevención, al reconocer riesgos en su vivienda o lugar de trabajo. Esta experiencia pedagógica fomenta una cultura de resiliencia comunitaria.

Complementariedad con la Red Acelerográfica del Perú

La plataforma se nutre de la información registrada

por la Red Acelerográfica del Perú, un sistema con estaciones distribuidas a lo largo del territorio nacional. Estos datos permiten:

- Ajustar los niveles locales de amenaza sísmica.
- Mejorar el diseño estructural sismorresistente. Es correcto precisar que el análisis e interpretación de los datos registrados por las redes sísmicas permiten mejorar los reglamentos de diseño sismorresistente, lo que a su vez impacta en construcciones más seguras. En otras palabras, los datos no cambian por sí solos el diseño de un edificio, pero son la evidencia que alimenta el marco normativo sobre el cual se diseñan las estructuras.
- Actualizar los estudios de microzonificación urbana.

La combinación de esta red instrumental con la plataforma virtual consolida a la UNI como un referente regional en ciencia aplicada a la prevención de desastres.

CERESIS: una visión regional

La participación del CERESIS asegura la proyección regional porque es un organismo intergubernamental con más de cinco décadas de experiencia articulando esfuerzos científicos en sismología en América del Sur. Su papel no es imponer un modelo único, sino ofrecer una metodología flexible y transferible que cada país pueda adaptar a su propia sismicidad, tipología constructiva y normatividad. El plan contempla primero validar la herramienta en el Perú, luego documentarla y ponerla a disposición de los países miembros y, finalmente, acompañar su adaptación nacional mediante cooperación técnica y el intercambio de experiencias. De este modo, la iniciativa trasciende lo local y se convierte en un recurso compartido, que fortalece la cooperación regional y contribuye a enfrentar de manera conjunta la vulnerabilidad sísmica.

Conclusión

La Plataforma Virtual de Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones es mucho más que un desarrollo tecnológico, es un instrumento estratégico para salvar vidas, democratiza el acceso a evaluaciones técnicas, promueve una cultura de prevención, integra ciencia, tecnología y política pública.

Hoy, la prevención ya no es un ideal lejano, sino una posibilidad concreta al alcance de todos. El llamado es claro: Ingresar, evaluar y compartir. La seguridad sísmica es un deber colectivo, y gracias a la ciencia peruana, ahora también es una realidad accesible.

Accede a la plataforma aquí:

<https://vulnerabilidad-sismica.uni.edu.pe/vulne/create>

Referencias

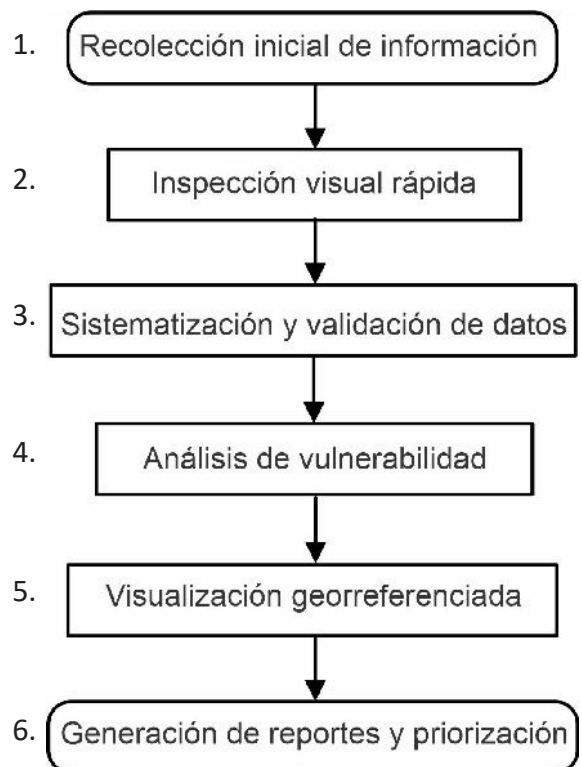
- Benedetti, D., and Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni*, (149), 66–74.
- Chang, T. S., Pezeshk, S., Yiak, K. C., and Kung, H. T. (1995). Seismic vulnerability evaluation of essential facilities in Memphis and Shelby County, Tennessee. *Earthquake Spectra*, 11(4), 527–544.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2015) - FEMA P-154: Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards, a Handbook. Edition 3.

Apéndice

En este apéndice se incluye un esquema explicativo que representa de manera clara y visual el funcionamiento integral de la plataforma, permitiendo comprender sus principales componentes y la forma en que interactúan entre sí.

El proceso metodológico no solo se describe en el cuerpo del documento, sino que también se resume en un flujo esquemático que facilita su comprensión y aplicación práctica. Dicho esquema sintetiza de manera secuencial las etapas necesarias para lograr una evaluación exitosa mediante la plataforma, desde la recolección inicial de información hasta la priorización de edificaciones críticas. La representación gráfica, presentada a continuación, permite visualizar con claridad la lógica del procedimiento y resalta la interdependencia de cada fase:

Esquema del flujo metodológico



Este diagrama constituye una guía de referencia rápida para investigadores, profesionales y autoridades locales, asegurando que el proceso pueda ser replicado y adaptado en distintos contextos urbanos y geográficos.

Este flujo asegura que la herramienta no sea un simple cuestionario, sino un proceso técnico y replicable que contribuye a la mitigación del riesgo sísmico y a la construcción de una cultura de prevención.

Texto sobre el flujo metodológico

El uso de la plataforma para obtener una evaluación exitosa se desarrolla a través de un flujo metodológico estructurado en seis etapas:

1. **Recolección de información inicial:** El usuario ingresa los datos básicos de la edificación en el formulario en línea, incluyendo uso, ubicación y número de pisos.
2. **Inspección visual rápida:** Se hace la caracterización estructural y no estructural registrando los materiales predominantes, la presencia de elementos críticos y el estado de conservación.
3. **Sistematización y validación de datos:** Se hace procesamiento automático de datos donde la plataforma aplica metodologías de evaluación rápida según Benedetti y Petrini (1984), Chang et al. (1995), FEMA (2015) adaptadas al contexto peruano.
4. **Análisis de vulnerabilidad:** Se calcula el índice de vulnerabilidad, donde se asigna un puntaje que clasifica la edificación en niveles bajo, medio o alto de vulnerabilidad sísmica.
5. **Visualización georeferenciada:** El sistema presenta los resultados en pantalla y de forma georeferenciada en mapas urbanos.
6. **Generación de reportes y priorización:** Para la toma de decisiones, los resultados pueden ser utilizados por ciudadanos, técnicos y autoridades para decidir acciones inmediatas, como el reforzamiento estructural, estudios adicionales o planes de reubicación.

Al entrar a la plataforma aparecerá el siguiente enlace:



Luego dar click en “ir a la encuesta”







Figura 1. Interfaz inicial de la Plataforma Virtual de Vulnerabilidad Sísmica. Permite a cualquier usuario acceder al formulario en línea para iniciar la evaluación rápida de una edificación.



Se identifica automáticamente la ubicación de la vivienda

Tipo de Suelo

Seleccione una opción si conoce el tipo de suelo

	
Roca	Grava con bolonería
	
Grava arenosa	Arena
	
Arcilla	Tierra de cultivo

Datos Generales

- Aspectos Estructurales
- Aspectos Geométricos
- Aspectos Constructivos

Seleccione la opción de tipo de suelo.

Seleccione la opción de tipo de suelo.

Área de la edificación

Área del primer piso (m²)

Cuatro dígitos como máximo. e.g. 2334

Número de habitantes en la edificación

Número de habitantes


Tres dígitos como máximo. e.g. 124

Uso de la edificación

Residencial

ASPECTOS ESTRUCTURALES

Asesoramiento técnico
Seleccione una opción



SI NO

Sistema estructural
Seleccione una opción



Adobe Albañilería confinada

Año de la construcción

2020

Número de pisos

1 piso

Datos Generales

Aspectos Estructurales

Aspectos Geométricos


Aspectos Constructivos

Figura 2. Formulario de ingreso de datos básicos de la edificación. Incluye variables como uso, ubicación, número de pisos, tipo de suelo y materiales predominantes.


Escoja las opciones que le muestra la plataforma y continúe

ASPECTOS GEOMETRICOS


Irregularidad horizontal
Seleccione una o más opciones



Regular



Irregular: Espinas invertidas




Irregular: Proyecciones laterales




Irregular: Desmembrado del piso


Irregularidad en altura
Seleccione una o más opciones




Regular



Irregular: Geometría en escalera




Irregular: Pisos de nivel




Irregular: Alturas de piso

Cantidad de muros
Seleccione una opción



Muchos muros confinados



Pocos muros confinados

Aspectos Estructurales

Aspectos Geométricos

Aspectos Constructivos

Datos Generales

Aspectos Estructurales

Aspectos Geométricos

Aspectos Constructivos

Presencia de techo inclinado

Seleccione una opción



SI



NO



No soy un robot



reCAPTCHA
Privacidad · Condiciones

GUARDAR ENCUESTA

Luego el resultado de la encuesta le indicará el nivel de vulnerabilidad que tiene su vivienda.

Resultado de la evaluación de vulnerabilidad de su edificación

Mapa de Vulnerabilidad

Datos de la edificación

Ubicación:

Latitud: -12.0979°

Longitud: -76.9982°

Fecha de realización de la encuesta:

25/08/2025 7:27am

El resultado PRELIMINAR obtenido luego de completar la encuesta de vulnerabilidad de su edificación, es que posee **BAJA VULNERABILIDAD SÍSMICA** de sufrir daños frente a un evento sísmico de gran magnitud, si desea una evaluación más detallada que determine apropiadamente el comportamiento de su edificación ante una sollicitación sísmica, comuníquese con la Red Acelerográfica.

Agradecemos su participación.



Contacto: Central Telefónica (01) 4811070 Anexo:3909, Lima - Perú
Email: red-acelerografica@uni.edu.pe - ceresis.direccionejecutiva@gmail.com
Ubicación: Av. Túpac Amaru 210 - Rímac.



Contáctanos

Figura 4. Visualización del resultado de la evaluación. La plataforma clasifica la edificación en un nivel de vulnerabilidad (bajo, medio o alto), generando una alerta preliminar.

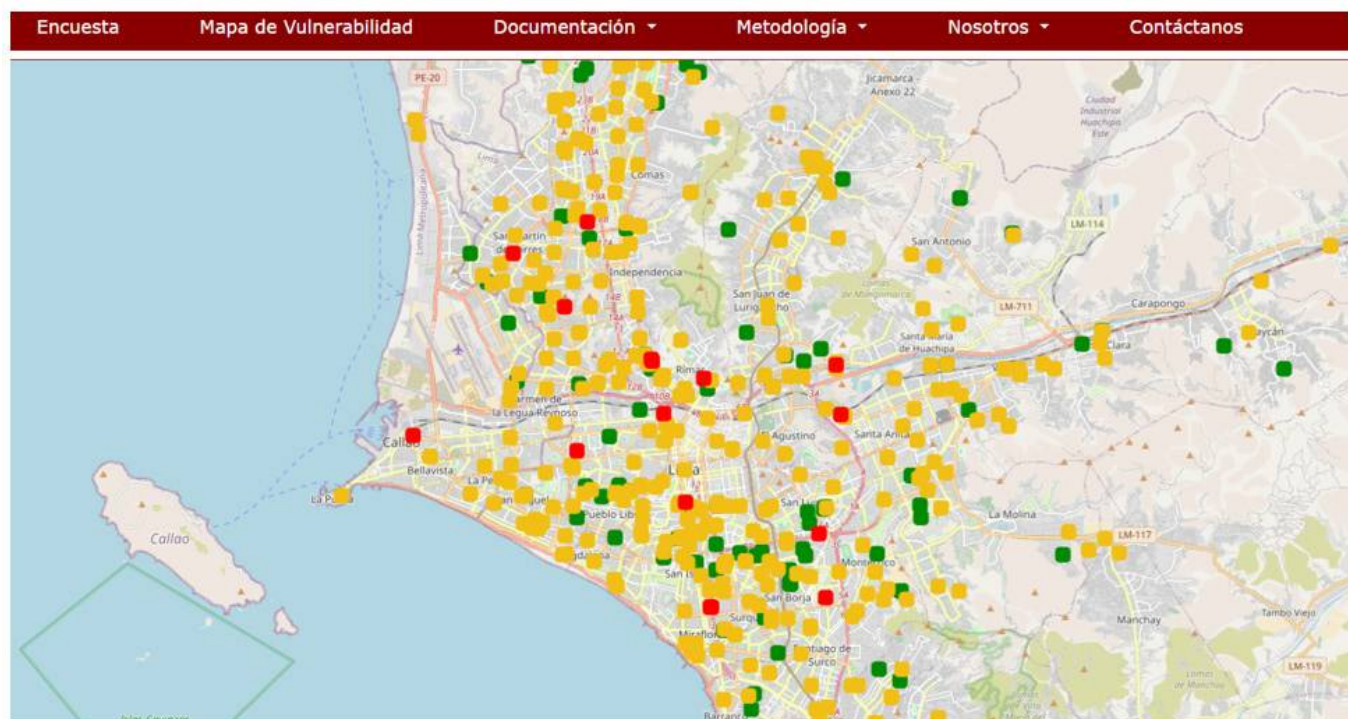


Figura 5. Ejemplo de salida georreferenciada. Cada edificación evaluada puede vincularse a un mapa, permitiendo análisis comparativos y la planificación urbana.

Finalmente, la plataforma genera un mapa temático de la ciudad en el que se representan los niveles de vulnerabilidad de las viviendas correspondientes a los encuestados. Esta herramienta constituye un insumo clave para la gestión del riesgo y la planificación urbana, y puede consultarse ingresando a la opción: “Mapa de vulnerabilidad”.

Manuscrito recibido: 25 agosto 2025

Recepción del manuscrito corregido: 11 septiembre 2025

Manuscrito aceptado: 22 septiembre 2025

CORAZÓN DE CENOTE

Claudia Jocelyn Ramírez Ramírez

Estudiante de 7º semestre del programa de Ing. Geólogo

Unidad Académica de Ciencias de la Tierra

Universidad Autónoma de Zacatecas "Francisco García Salinas"

claudia.ramirez12@gmail.com

Hace mucho tiempo, incluso antes de que existiera la palabra "ciencia", ya había ciencia. Y si la ciencia existía, había personas, como tú y como yo, escogidas para entender lo que pasaba en su mundo. ¿Alguna vez te preguntaste por qué tienes esa inquietud de entender tu planeta? Bueno, déjame contarte una historia...

Érase una vez una civilización al sur de Mesoamérica, ubicada entre selvas, jaguares, cenotes y pirámides, así es, la civilización maya. En esta sociedad ocurría algo muy especial: cada que nacía una niña, era llevada frente a una sacerdotisa, se hacía un círculo ceremonial, y al eco de cantos y plegarias a Itzamná (Dios del sol y la sabiduría) una parte del cuerpo de la bebé se iluminaba, en caso de que se iluminara el pecho, la niña había nacido para ser parte de las Ts'ono'ot Puksi'ik'al (corazón de cenote). Esto significaba que habían sido elegidas para cuidar, amar, aprovechar y entender el funcionamiento de su mundo. Esta niña se iba a su aldea sin saber cuál era su destino hasta que una noche, se le revelaba en un sueño su misión; el pecho se le iluminaba de nuevo, su mente se llenaba de admiración, curiosidad y pasión por lo que le esperaba. Y solamente en ese momento, se integraba con sus hermanas Ts'ono'ot Puksi'ik'al y empezaba su trabajo.

Ellas eran las encargadas de entender la naturaleza, los fenómenos naturales o astronómicos, los ciclos de suelos, localizar gemas, rocas para construcción y minerales útiles para la sociedad, cuidar los cenotes y sus cuerpos de agua. ¿Te suena conocido? Bueno, todas ellas eran las que sostenían el equilibrio entre humanos y naturaleza, pedían permiso para extraer recursos de la naturaleza y luego reparaban el escaso daño que pudieran hacer.

Este equilibrio se mantuvo durante varios siglos; hasta que, Bluc Chabtan (Dios de la muerte violenta y sacrificios humanos), celoso de la devoción que los mayas le tenían a Cháak (Dios de la lluvia) en

agradecimiento por las lluvias que hicieron florecer los campos, recargar los acuíferos, cenotes y el esplendor de las ciudades; tuvo una idea.

El plan era sencillo, raptaría a Cháak para que no lloviera en el mundo, los humanos le ofrecerían más sacrificios y cuando ya estuviera satisfecho, liberaría a Cháak, volverían las lluvias y él sería el salvador de la humanidad. Y así lo hizo, atrajo con engaños a Chaak, lo puso en un calabozo y esperó a que el caos llegara.

Al inicio, los humanos no se dieron cuenta de la falta de lluvias, ya que tenían reservas y eso enojó más a Bluc Chabtan; ya que su plan no estaba funcionando. Pero, pasó un año y las lluvias no aparecían, las reservas de acuíferos se agotaban, los cenotes agonizaban y todas las personas recurrieron a sus traductoras de la naturaleza: las Ts'ono'ot Puksi'ik'al. Ellas, no entendían ni se podían explicar la falta de lluvias, así que, como primera medida, decidieron aumentar los sacrificios a Bluc Chabtan.

Con esos sacrificios creían que la crisis terminaría pronto, pero no fue así. A Bluc Chabtan lo motivaba la envidia y la codicia, y al ver que su plan ya estaba funcionando, decidió que Cháak debía continuar cautivo para que él recibiera lo que quería.

Las Ts'ono'ot Puksi'ik'al hicieron uso de siglos de conocimiento de la madre naturaleza para poder controlar la terrible sequía, pero nada funcionaba. Las ciudades peligraban y el equilibrio que con tanto amor habían cuidado, estaba ya casi roto. Entonces, las personas comenzaron a desafiarlas y a cuestionarlas; creían que ellas no hacían su labor adecuadamente y que eran las culpables de la agonía de la civilización.

Así que una noche, mientras ellas seguían buscando respuestas, una multitud enojada las cautivó y las

mandó a un calabozo en medio de la selva. Al cabo de dos días iban a ser sacrificadas por alta traición a su labor y a su pueblo. En el calabozo, siguieron buscando respuestas, hasta que Xaman Ek (Dios de la estrella polar) se les manifestó a mitad de un ritual, les dijo que llevaban tres años buscando a Cháak, sin éxito. Les pidió que advirtieran a todas las personas de su pueblo, él mismo los guiaría a un lugar seguro mientras continuaban su búsqueda. Ellas así lo hicieron, pidieron hablar con jefes, sacerdotes, guerreros y con cualquiera que las pudiera escuchar; pero nadie les quiso creer; decían que solamente estaban buscando cómo justificar su traición. Al no escuchar las advertencias, en unos meses la civilización maya había desaparecido.

Xaman Ek se volvió a manifestar, pero en esta ocasión llevó a las Ts'ono'ot Puksi'ik'al hasta un lugar seguro, ocultas de todas las civilizaciones. Pensaron en romper el juramento que hicieron de cuidar, proteger y mantener el equilibrio con la naturaleza; así que hicieron un ritual para deshacer su pacto sagrado, pero, Itzamná al ver que estaban por rendirse les dio una última misión.

Les dijo que, así como recibieron al nacer el don sagrado, ahora su misión era encontrar sucesoras que cuidaran y administraran los recursos que la madre naturaleza les daba; pero que tendrían que ocultarse, ya que, Bluc Chabtan las seguía buscando para capturarlas, ya que eran las únicas que tenían el conocimiento de rocas, minerales, agua, clima, temblores, volcanes y eclipses.

Desde ese momento, acordaron dispersarse por todos los lugares habitables para reconocer y encontrar a sus sucesoras. Estuvieron en la sociedad y se les llamó de todas maneras: madres, esposas, amigas, curanderas, brujas, emperatrices, costureras; ricas o pobres, ocultas en un pueblo o en una gran ciudad, las Ts'ono'ot Puksi'ik'al estuvieron escondidas y dejando su legado a mujeres que, sin saberlo, tenían el don para conservar el equilibrio con la naturaleza.

Cuando estaban en las calles o plazas, veían pasar a mucha gente, pero Itzamná, les había otorgado la capacidad de reconocer a sus sucesoras. Así, fueron encontrando cada vez a más mujeres, que debían

continuar con la misión, pero sin ser descubiertas. No fue nada sencillo, debían esconderse de sus maridos, padres, religión, costumbres y hasta de las leyes para ejercer su encomienda. Muchas fueron descubiertas y castigadas; otras huyeron y desde lejos siguieron su destino. Pero todas tenían una motivación: la curiosidad y deseo de entender qué era lo que las llamaba en su interior.

Con los siglos, se inventaron las universidades y se abrió una oportunidad de poco a poco dejarse de esconder y mostrar su conocimiento al mundo. Pero había un problema, las mujeres no entraban a las universidades. Así que, muchas de las Ts'ono'ot Puksi'ik'al entraron vestidas de varones para poder acceder a los libros.

Hasta que, una de ellas, cansada de estar en las sombras, pudo acceder y entrar a la universidad, siendo así que, Josefa Cuevas de Sansores se convirtió en la primera mujer en obtener el título de Geólogo en el país. Trabajando y colocando a una mujer en espacios completamente prohibidos para nosotras. Gracias a Josefa, más mujeres pudieron empezar a soñar con entrar a una universidad. María Alba Paz Molina, se convirtió en la primera mujer en ser ingeniero minero, rompiendo con el mito de que las minas se ponen celosas si entraba una mujer.

Gracias a su don, pudieron sobresalir en sus trabajos. Pero su misión no terminó allí; todas siguieron buscando sucesoras para continuar el legado que las mujeres cuidaron desde casi diez siglos atrás. Ahora, era más sencillo encomendar la misión, en las universidades reunían a mujeres que tenían oportunidad de asistir, pero también buscaron a todas aquellas que tenían el don sagrado, sin importar clase social, ubicación, idioma u origen.

¿Cómo fue tu primer acercamiento a las geociencias? Tal vez te ponías a recoger rocas bonitas en el camino o veías películas de dinosaurios, tal vez nunca sentiste el llamado para las ciencias de la salud o ciencias sociales, incluso puede que hayas llegado aquí por accidente; te gustan los volcanes o eras esa niña que veía documentales en la televisión sobre terremotos, desastres o historia de la Tierra; pero había algo, no sabías muy bien qué, pero te trajo a este camino. Y cuando

empezaste a estudiar ¿recuerdas esa sensación de saber que estabas en el lugar correcto? Es como si de repente, se te hubiera revelado tu destino y misión. Esa misión de cuidar, entender, monitorear, plantear y solucionar problemas y asuntos de nuestra Tierra.

Así es, tú y yo, somos descendientes de todas esas mujeres que, ocultas o no, ingenieras o no, prometieron proteger y preservar las ciencias de la Tierra. Ahora que conoces esta historia...

¿Estás lista para tu misión?

Políticas editoriales

GEOS es el boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, contiene artículos de investigación originales así como artículos de divulgación y notas cortas sobre aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM; se publican tres números en el año en forma impresa como electrónica.

Los artículos de investigación publicados en **GEOS** deben ser **originales** y son **arbitrados** por al menos dos expertos del tema; mientras que los trabajos de divulgación son arbitrados por un especialista del tema. Los editores se reservan el derecho de decidir sobre la publicación de notas o reportes.

Son particularmente bienvenidas todas aquellas contribuciones que coadyuven a la difusión y a la enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

Una vez concluido el proceso de arbitraje, el manuscrito será devuelto al primer autor con los comentarios de los árbitros y del editor. El manuscrito corregido en forma final será editado por el Editor Técnico de **GEOS** para su publicación impresa y electrónica. El autor principal tendrá oportunidad de revisar la versión final de su trabajo antes de publicarlo en WEB de la UGM (www.ugm.org.mx).

Cualquier cambio a la política editorial de GEOS se publicará en el primer número de cada volumen.

Instrucciones para los autores

Publicar en GEOS es gratuito, todos los manuscritos deberán enviarse en forma electrónica al editor principal:

Luis Alberto Delgado Argote (CICESE)
ldelgado@cicese.mx

Preparación de texto:

Podemos procesar manuscritos en formato WORD, texto ASCII o LaTeX. Se recomienda que los manuscritos no excedan 12 páginas en el formato de la revista (una página contiene aproximadamente 900 palabras).

Preparación de figuras e ilustraciones:

Las ilustraciones y figuras se pueden enviar en cualquiera de los siguientes formatos: **TIF, EPS, PS, DXF, DWG, PDF, JPG o WMF**; y deben enviarse en archivos individuales y separados del texto.

La publicación de figuras a color en la versión impresa de GEOS no es posible por ahora, sin embargo la versión electrónica puede contener ilustraciones a todo color, se recomienda a los autores preparar sus figuras pensando en ambas ediciones.

Secciones:

Con excepción de las notas, todas las contribuciones deberán incluir: título, resumen (en español y en inglés), introducción, una sección de métodos, una sección de resultados, una sección de discusión y/o conclusiones y una sección de referencias bibliográficas.

Resumen:

El no deberá exceder 350 palabras. Al prepararlo haga énfasis en los objetivos de la investigación, los resultados más importantes y las conclusiones alcanzadas. En el resumen no deben aparecer citas bibliográficas.

Introducción:

La introducción deberá destacar la relevancia del problema e incluir una revisión adecuada de publicaciones antecedentes sobre el tema. El objetivo de la introducción es enmarcar el problema dentro del estado general del conocimiento en el área que le corresponde, destacar la contribución del trabajo y motivar la lectura del artículo completo.

Metodología:

La metodología empleada en el trabajo deberá ser descrita con suficientes detalle para que otros miembros de la comunidad puedan comprenderla, pero al mismo tiempo, debe ser sencilla para que un lector inexperto pueda comprender las ideas fundamentales. Los desarrollos demasiado detallados, pero necesarios, deben diferirse a una sección apéndice.

Resultados:

Usualmente, los resultados de la aplicación de cualquier metodología pueden presentarse en forma de tablas o figuras. Evite redundancias mediante una adecuada selección de sus resultados. Los pies de figura deberán ser lo suficientemente explicativos para resaltar la importancia de lo que se ilustra sin necesidad de acudir al texto.

Discusiones y conclusiones:

En esta sección se deben discutir las implicaciones de los resultados, su concordancia o divergencia con hipótesis anteriores, construir nuevas hipótesis

derivadas de ellos, discutir sus aplicaciones prácticas y posibles limitaciones.

Referencias

Se debe incluir la lista de referencia de las fuentes utilizadas en el artículo.

Las referencias deberán estar agrupadas en orden alfabético por apellido del primer autor. Sugerimos utilizar el estilo de citación recomendado por Harvard University. Presentamos algunos ejemplos para facilitar la citación.

Si la citas textuales tienen 40 palabras o menos, utilice comillas al principio y al final de la misma y mencione el apellido del autor, el año y la página de donde proviene la cita. Si tiene más palabras, utilice párrafo con diferente sangría. Si un autor es citado más de una vez el mismo año, utilice el sufijo: a, b, etc. para distinguir el trabajo.

Aquellos manuscritos que no estén en publicados (aceptados o en prensa) no deberán incluirse en la referencias. Los artículos de divulgación podrán agregar una sección de referencias recomendadas.

Formato para citas:

Para cada autor o co-autor, escriba con mayúscula únicamente la primera letra del apellido y después las iniciales, agregue el año entre paréntesis. Utilice letras mayúsculas sólo en la primera letra del título y para nombres propios.

Cuando haga la referencia de un artículo de publicación periódica, incluya el nombre completo de la revista, volumen y páginas. Por ejemplo:

Alvarez-Borrego, S. (1996). Satellite derived photosynthetic pigment surveys: A review of marine phytoplankton biomass and productivity, *Geofísica Internacional*, v. 35(1), 51-61.

Ripa, P., y Velázquez, G., (1993), Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, v. 32(1), 41-56.

www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf

Sánchez-Sesma, F. J., and Luzón, F., (1995), Seismic response of three-dimensional alluvial valeys for incident P, S, and Rayleigh waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 85(1), 269-284.

Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (México). <https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=inegi>

Cuando haga referencia de un libro completo, incluya los siguientes datos.

Presentaciones gráficas (gráficas, diagramas, mapas, dibujos, figuras, ilustraciones en general, fotografías, etc.)

Winkler, H.G.F. (1967). *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 2nd ed. New York, 237 p.

Cuando las presentaciones gráficas son tomadas de otro autor o página web, debe mencionarse la fuente de donde fue tomada.

Cuando haga la referencia de una parte de un documento o capítulo de libro, incluya los siguientes datos.

Ejemplos:
Tomado de Google Hearth (2014).
Modificado de Pérez (2014) p. 234.

Lomnitz, C., (1995), Diez años después: una reinterpretación de la catástrofe de 1985. En: F. Medina-Martínez, L. A. Delgado-Argote y G. Suárez-Reynoso, editores, *la Sismología en México: 10 años después del temblor de Michoacán del 19 de Septiembre de 1985 (M=8.1)*, (p. 61-67). Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 2.

Unidades

Con algunas excepciones, todas las unidades físicas deberán expresarse en el Sistema Internacional de unidades (SI). Las siguientes excepciones son aceptables:

densidad en g/cm³
presión en bar

Cuando haga la referencia de una tesis, debe hacer mención al grado. Ejemplo:

Gutiérrez Carmona, D.M. (2014). Estudio magnetotelúrico de la Falla Agua Blanca, Baja California, México. Tesis de maestría. Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada, Baja California. México.

Expresiones matemáticas

Escriba sus ecuaciones en la forma más simple posible, utilizando signos de puntuación. Utilice itálicas para todos los símbolos, exceptuando las letras griegas. Vectores y matrices se escribirán con negrillas. Numere en forma consecutiva y entre paréntesis todas las ecuaciones que aparezcan en el texto.

Cuando haga la referencia de recursos electrónicos, incluya los datos completos y la dirección electrónica. Ejemplo:

Ripa, P. y Velázquez, G. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, 32 (1), 41-56. Recuperado de: <http://>

$$\mathbf{u}_h(x, z, t) = (U_j^x(t)\phi_j(x, z), U_j^z(t)\phi_j(x, z))^T \quad (1)$$

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Avith Mendoza Ponce
Editores



geos

Información con:

Ivonne Pedrín Morales
División de Ciencias de la Tierra
Tel: 01(646)174-5050
Ext: 26004
Correo electrónico: ipedrin@cicese.edu.mx



geos

