

Unión Geofísica Mexicana, A.C.

geos



**Volumen 37
No. 2
Junio de 2018**

GEOS

<http://www.ugm.org.mx/geos.html>

BOLETÍN INFORMATIVO DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C.

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 2016-2017

Dra. Xyoli Pérez Campos
Instituto de Geofísica, UNAM
Presidenta

Dra. Ligia Pérez Cruz
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidenta

Dra. Vanesa Magar Brunner
División de Oceanología, CICESE
Secretaria General

Dr. Edgardo Cañón Tapia
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretario de Investigación

Dra. Dora Carreón Freyre
Centro de Geociencias, UNAM
Secretaria de Difusión

Dra. Marina Manca
Centro de Geociencias, UNAM
Secretaria de Educación

Dr. Juan Américo González Esparza
Instituto de Geofísica, UNAM
Vinculación

Dr. Víctor Manuel Wong Ortega
Unión Geofísica Mexicana
Tesorero

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Dora C. Carreón Freyre
freyre@geociencias.unam.mx
UNAM

Comité Editorial

Harald Böhnelt, UNAM
Noel Carbajal Pérez, IPICYT
Oscar Campos, UNAM
Gerardo Carrasco, UNAM
Ana Luisa Carreño, UNAM
Carlos Flores Luna, CICESE
Juan García Abdeslem, CICESE
René Garduño, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Gustavo Tolson, UNAM
Felipe Escalona, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, UAZ

Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez
Angel Daniel Peralta Castro
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 apoyo a la investigación a finales de un sexenio peculiar** ...315

ARTÍCULOS

- Interpretación geológica y geoelectrica de un deslizamiento rotacional relacionado con paleodrenaje en el fraccionamiento Valle del Sur, en Tijuana, Baja California**
Delgado Argote, Luis A., Marco A. Pérez Flores, Fernando Herrera Barrientos, Olga Sarychikhina, Manuel Contreras López, Luis Ochoa Tinajero, Thalia A. Avilés Esquivel ...317

DIVULGACIÓN

- Modelado cinemático de la fuente sísmica en 2D con ondas de volumen telesísmicas (Guía de Usuario)**
Gómez González, J.M., C. Mendoza, S. Hartzell y T. Heaton ...335

- Criterios de clasificación espacial para discriminar datos que incrementan la incertidumbre en la respuesta de modelos determinísticos**
Díaz-Torres, J. J., L. Hernández-Mena, M.A. Murillo-Tovar, C. Suárez-Plascencia, C., E. Aviña-Rodríguez ...349

REPORTE

- La Olimpiada XXII de Ciencias de la Tierra: El Cosmos y Nuestro Planeta**
Frez José y Daniel Peralta ...365

COMUNICACIONES

- POLÍTICA EDITORIAL** ...383

El apoyo a la investigación a finales de un sexenio peculiar

El CONACYT, el más importante órgano administrador del quehacer académico de México, tuvo un arranque interesante en 2013. Sin embargo, en el último tercio del sexenio se desfiguró, o su ímpetu se desvaneció. Tal vez los esfuerzos de la federación en ese periodo se dirigieron más a la propaganda a favor de las llamadas reformas educativa, laboral, energética y ocho más, o de obras como el Nuevo Aeropuerto de la Cd. de México. Dicha propaganda, o maquillaje de estado, sólo cubre las apariencias ya que los apoyos, por ejemplo a la ciencia, a la educación, al campo, o a la salud, no son distintos o, incluso, son menores que en administraciones anteriores. En nuestro editorial del Vol. 36-2 se mencionó que del 2016 al 2017 la reducción al presupuesto para Educación Pública, Salud y CONACYT (para mencionar sólo tres) fue de 10.6, 10.8 y 23.3 por ciento, respectivamente y, en 2018, las cosas se enturbiaron un poco más porque apareció el tema electoral. Si bien los porcentajes son escandalosos, impactan sobremanera los más de 1,960 millones de pesos gastados por la SEP, en publicidad, en 2017, bajo el cargo de Aurelio Nuño. Otros sobreejercicios en el mismo rubro se observaron en varias secretarías, mientras sus titulares fueron aspirantes a la candidatura presidencial (190 Mp de Hacienda, 1,134 de Salud, etcétera).

Se ha insistido en que México debe transitar hacia una sociedad del conocimiento, pero la inversión para CONACYT se estancó de 2017 a 2018, no así la inflación y la devaluación. La administración científica oficial ahora tomó en serio la intención de manejar la investigación a través de *modelos de consorcios* para “acompañar el desarrollo regional, el crecimiento de sectores industriales clave, hacer más efectivo el aparato científico y tecnológico del país”. Estas declaraciones resultan preocupantes pues es evidente que el Estado se ha estado desentendiendo de su compromiso por la educación y la salud públicas, por la infraestructura básica y la administración de los recursos naturales en general, y ha perdido la visión de generar riqueza para la nación en su conjunto. El crecimiento de las ciudades parece no seguir diseño alguno. Las más grandes son cada vez más peligrosas y más vulnerables a los fenómenos naturales.

Sería conveniente analizar si las instituciones cuyo diseño original es la investigación básica deben reorientar sus objetivos hacia actividades que otras instituciones del Estado han estado abandonando, tales como la prospección y manejo de recursos naturales, el conocimiento del territorio nacional, la producción de alimentos y la salud. Cabe preguntarse también por qué se detuvo la creación de nuevas instituciones de educación superior e investigación donde los nuevos investigadores formados en nuestras instituciones puedan emprender y ampliar el ambiente de investigación y

docencia. Los nuevos temas ahora reciben etiquetas como “problemas nacionales” y otras, descuidándose las convocatorias de Ciencia Básica e Infraestructura. De un reporte de proyectos solicitados y aprobados por el CONACYT en el periodo 2002-2011, llama la atención que el promedio de los aprobados sea de 722 anuales, sin que se especifique su etiqueta. Durante este agonizante sexenio, en 2013 y 2017 se apoyaron 398 proyectos en todos los temas, mientras que el pico sexenal fue en 2014 con 494, en todos los temas de investigación. Aún se desconocen los resultados de los proyectos de 2018, pero resulta que durante seis años, sólo hubo cinco convocatorias. Si cada proyecto de tres años en promedio fuera favorecido con un millón de pesos, también en promedio, resultaría que el Estado solamente comprometió aproximadamente 2,000 millones de pesos durante su gestión, esto es, sólo 333 millones anuales. Es deseable que esta tendencia se corrija. Es deseable que la Ciencia Básica no quede en manos de la iniciativa privada cuyo fin es obtener la mayor tasa de ganancia, más allá de los buenos propósitos de valor público.

Aprovechamos este espacio para anunciar que a partir de 2018, iniciaremos una reestructuración editorial de Geos con la intención de darle mayor visibilidad. Estamos gestionando el ISSN para revistas electrónicas y manejaremos una nueva plataforma de recepción y respuesta para contribuyentes y árbitros, con el fin de agilizar los procesos editoriales. Esperamos que pronto podamos hacer realidad el viejo proyecto de ingresar en el padrón del CONACYT. Sirva este editorial para invitarlos a participar con nuestros propósitos.

Interpretación geológica y geoeléctrica de un deslizamiento rotacional relacionado con paleodrenaje en el fraccionamiento Valle del Sur, en Tijuana, Baja California

Luis A. Delgado-Argote*, Marco A. Pérez-Flores, Fernando Herrera-Barrientos, Olga Sarychikhina,

Manuel Contreras-López, Luis Ochoa-Tinajero, Thalia A. Avilés-Esquivel

División de Ciencias de la Tierra,

CICESE

*ldelgado@cicese.mx

Resumen

Durante el periodo de lluvias del primer trimestre de 2017 ocurrió un deslizamiento rotacional en el talud norte del Fracc. Valle del Sur (FVS) en la ciudad de Tijuana, Baja California. De acuerdo con las imágenes históricas de Google Earth, en diciembre de 2006 el terreno estaba preparado para la construcción de un desarrollo de más de 70 casas habitación y, en junio de 2008, 16 de las 17 casas, cuyo peso aproximado es de 60 ton cada una, ubicadas en el borde de dicho talud, estaban terminadas. La pendiente del talud de 160 m de longitud es de 40° y 18 m la diferencia de altura. No hay reportes de inestabilidad durante el periodo 2008-2016, coincidente con un periodo de lluvias escasas en la región. Durante las lluvias invernales (diciembre 2016-febrero 2017) un rápido deslizamiento rotacional dañó severamente las 12 casas de los primeros 100 m del lado W del talud. El deslizamiento es asimétrico y está más pronunciado a los 70 m desde el margen W, definido por estrías de movimiento hacia 320°/62° y 325°/47°, con componente lateral en la dirección de las estructuras geológicas regionales. Se midieron fracturas en las obras civiles y la resistividad eléctrica en perfiles E-W en la base del talud N, en el margen sur del FVS y en un perfil N-S en el centro del fraccionamiento. Se efectuó la inversión conjunta de los datos geoeléctricos con los métodos Dipolo-Dipolo y Wenner, los cuales muestran el nivel freático horizontal y posibles paleocanales que se bifurcan hacia el sur, topográficamente hacia arriba. En la parte baja del talud del norte, el principal cuerpo de conductividad alta está delimitado por una falla normal en el este con caída hacia el oeste, y otra de desplazamiento lateral izquierdo con caída al este, las cuales corresponden a los flancos laterales que definen el cuerpo principal del deslizamiento rotacional. En los costados de dichos planos la permeabilidad aumenta por la formación de fracturas asociadas con el movimiento de bloques. Existe una buena correlación entre discontinuidades de cuerpos conductivos del perfil norte con la geometría del deslizamiento rotacional, el cual se desarrolla básicamente en un cuerpo de limos y arcillas que se interpreta fueron depositados en un paleocanal o drenaje antiguo que, al saturarse de agua, tuvo un comportamiento plástico. Las características geológicas interpretadas son características de gran parte del subsuelo tijuanense, por lo que se recomienda la obligatoriedad de estudios geológicos y geofísicos en los desarrollos inmobiliarios futuros en gran parte del NW de Baja California.

Palabras clave: Deslizamiento rotacional; perfiles geoeléctricos; Fraccionamiento Valle del Sur, Tijuana.

Antecedentes y localización

El fraccionamiento Valle del Sur se ubica en el sur de la zona densamente poblada del norte de la Delegación San Antonio de los Buenos, en una zona de colinas donde se registra un desarrollo urbano acelerado (Figura 1). Hasta la fecha de publicación del Atlas de Riesgos del Municipio de Tijuana, B.C. (DMPCT, 2000), en el área de estudio no estaban identificadas “zonas susceptibles a deslizamientos de terreno en caso de ocurrencia de un sismo hipotético en la falla La Nación Mw=6.5”, ni zonas afectables por “agentes perturbadores de origen meteorológico”. Aproximadamente desde ese año inició el desarrollo urbano en la zona y, en consecuencia, la modificación de su morfología.

Según los reportes meteorológicos mensuales en <https://weather.com> para San Ysidro, California, que corresponderían prácticamente a las de la zona de estudio, las precipitaciones acumuladas entre diciembre de 2016 y enero de 2017 alcanzaron los 125.7 mm, superando en 47% la precipitación histórica promedio de 85.59 mm

(Tabla 1 y Figura 1). Según los datos de CONAGUA (proporcionados por S. Higareda, agosto de 2017) las lluvias acumuladas en la estación La Presa, al oriente de la ciudad, para el mismo periodo alcanzaron los 96.5 mm. Como resultado de dichas lluvias, desde finales de enero y durante febrero, diferentes lugares de la zona urbana de Tijuana sufrieron deslizamientos del terreno, entre ellos la parte norte del Fraccionamiento Valle del Sur (Figura 2). Aproximadamente el 20 de febrero y la primera semana de marzo, cuando varias casas de la zona norte del fraccionamiento mostraban desplazamientos laterales de más de un metro y verticales mayores a 1.5 m, personal de Protección Civil Municipal visitó la zona.

A petición de los colonos del fraccionamiento, a través de su representante, Sra. Carolina Ricárdez, se efectuó un estudio geológico y geoelectrico con el objetivo de identificar las características geológicas del terreno sobre el que se asienta el desarrollo inmobiliario. Los trabajos de campo de las brigadas de geología y geofísica se desarrollaron durante los días 15 y 16 de marzo.

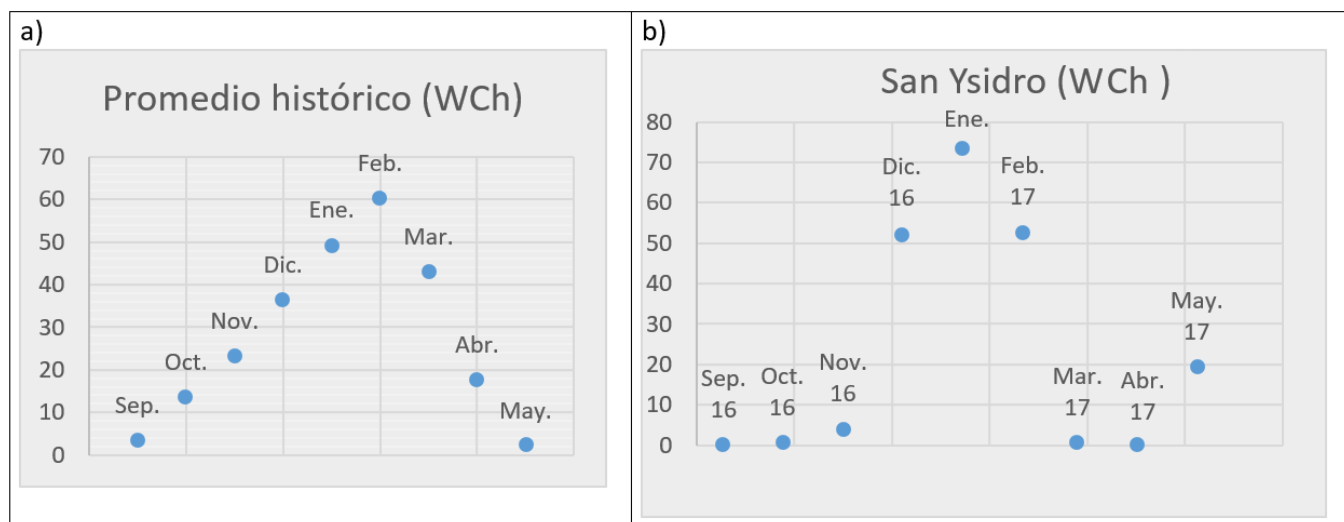


Figura 1. Precipitación mensual en la región del sur de San Diego, California. a) Promedio histórico en San Ysidro, California, E.U.A. y b) Precipitación mensual para el periodo de septiembre de 2016 a mayo de 2017 en San Ysidro. Ambos reportes se tomaron de Weather Channel (WCh; <https://weather.com/>).

Tabla 1. Precipitación en mm registrada en San Ysidro, California, La Presa (E de Tijuana) y promedio histórico en San Ysidro, California.

Septiembre, 2016	29.9	0.0	3.56
Octubre, 2016	0.0	0.5	13.46
Noviembre, 2016	4.5	4.06	23.11
Diciembre, 2016	84.8	52.34	36.32
Enero, 2017	11.7	73.4	49.27
Febrero, 2017	26.2	52.6	60.2
Marzo, 2017	Sin datos	0.51	42.93
Abril, 2017	Sin datos	0.0	17.53
Mayo, 2017	Sin datos	19.3	2.28

*Weather Channel: San Ysidro; diciembre 2016 y enero 2017 = 125.74; promedios históricos San Ysidro, CA: diciembre+enero = 85.59

** CONAGUA a través de Santiago Higareda, División Oceanología, CICESE: Presa de Tijuana: diciembre 2016+enero 2017=96.5 mm



Figura 2. Panorámica del fraccionamiento Valle del Sur, Delegación San Antonio de los Buenos, Tijuana, Baja California. La fotografía tomada en febrero de 2017 desde el Libramiento Sur de la ciudad, mirando hacia el sur. En el talud norte del fraccionamiento se observa el movimiento de las primeras 12 casas del lado oeste. En primer plano está una planta maquiladora industrial BBS.

Para alcanzar el objetivo se hizo un análisis geomorfológico del terreno en un área de 2 x 2 km, dentro del que se asienta el fraccionamiento Valle del Sur, el cual cubre un área de 15,165 m² (Figuras 3 y 4). Para identificar rasgos del drenaje que pudieran indicar la asociación entre el relieve y estructuras de fallas y fracturas se interpretaron imágenes de satélite recientes y anteriores al desarrollo inmobiliario y posteriormente se cartografió la litología, posición de los estratos, fracturas y fallas. En el fraccionamiento, se midieron fracturas y separaciones en las obras civiles que pudieran asociarse con el

movimiento del terreno. El estudio geoelectrico se hizo en los extremos norte, sur y parte central del fraccionamiento para buscar zonas de concentración de humedad o discontinuidades asociadas con espacios vacíos que pudieran relacionarse con fracturas y pudieran promover la inestabilidad del terreno. La intención del estudio es de, a través de la descripción física del terreno, presentar un marco geológico de referencia para la identificación de rasgos causantes de la inestabilidad del terreno el cual sirva, además, para el diseño de obras de remediación.

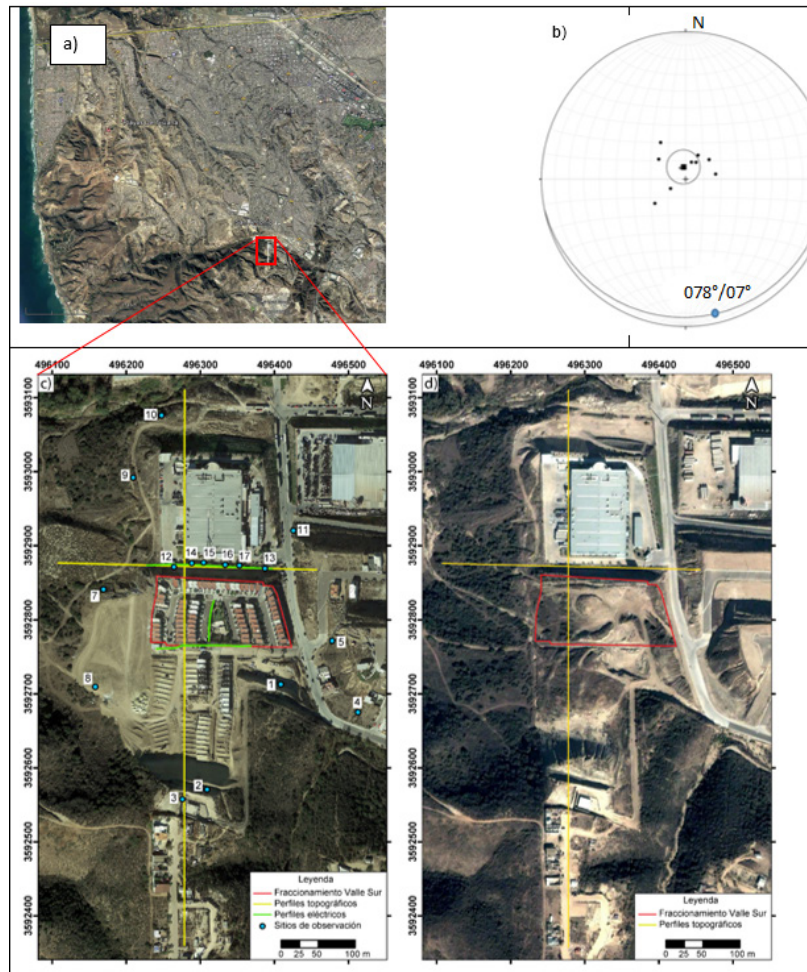


Figura 3. a) Ubicación del fraccionamiento Valle del Sur en el cuadro en rojo sobre la imagen Google Earth del 17 de noviembre de 2016. b) Polos de los planos de estratificación de los estratos de los alrededores del fraccionamiento. El punto más grande representa el polo del promedio de las capas y la línea en el estereograma es el plano promedio de las capas (078°/07°). c) Se cartografió geológicamente un área de aproximadamente 350 x 750 m. d) Imagen de Google Earth de enero de 2006. Las líneas amarillas N-S y E-W son los perfiles topográficos obtenidos a partir de datos LIDAR (2006), el polígono rojo delimita el área del fraccionamiento, las líneas verdes son las de prospección geoelectrica y los puntos con número son sitios de medición geológica estructural.

Geográficamente, el fraccionamiento Valle del Sur se ubica al sur del entronque del Blv. Gustavo Aubanel Vallejo y el Periférico o Libramiento Sur (Figura 3a). Las coordenadas UTM (WGS84) de las esquinas son: NW: 3,592,857 N/ 496,243 E; NE: 3,592,845 N/ 496,243 E; SW: 3,592,772 N/ 496,232 E; SE: 3,592,769 N/ 496,418 E.

Metodología

Geológica y geomorfológica

Se efectuaron caminamientos en los alrededores del fraccionamiento para identificar las unidades litológicas y medir estructuras geológicas dominantes, tales como fallas, fracturas y orientación de los estratos. La información recabada en los puntos de la Figura 3c se georeferenció con un GPS Garmin etrex y la edición de las imágenes se realizó por medio de Adobe Illustrator, Microsoft Excel y ArcMap 9.3.

Se consideró que los rasgos topográficos lineales están asociados con discontinuidades estructurales (fallas o fracturas), o litológicas, como las producidas por los contrastes entre materiales, por ejemplo, entre capas de arena con las limo-arcillosas, o conglomeráticas con las arenosas. De dichos rasgos lineales pueden interpretarse drenajes antiguos que se desarrollan a su vez en discontinuidades estructurales que caracterizan a zonas tectónicamente activas, como las que se han cartografiado en el norte de la península de Baja California y particularmente en Tijuana (Delgado-Argote et al., 2012 y referencias en él). La imagen de Google Earth de 2006, en la que se hicieron las interpretaciones geomorfológicas de la Figura 4, muestra el área de estudio antes del desarrollo inmobiliario (Figura 3d).

Para realizar el análisis geomorfológico se obtuvieron los datos de topografía de diferentes fuentes, formatos, resolución y años de elaboración/adquisición de datos. Se analizaron

tanto las cartas topográficas (.pdf), como Modelos Digitales de Elevación (MDE), que son los arreglos continuos de valores numéricos que corresponden con los valores estimados de elevación de puntos en la superficie del terreno. Del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se obtuvieron Modelos Digitales de Elevación (MDE) de 1978 y 1996, cuyas fuentes son cartas topográficas escala 1:50,000 con equidistancia entre las curvas de nivel de 20 m y resolución espacial de 50 m; cartas topográficas escala 1:50,000 de 1980, 1996 y 2005, en formato .pdf, con equidistancia entre las curvas de nivel de 20 m; MDE de alta resolución LIDAR (Light Detection And Ranging) de 2006 con resolución espacial de 5 m. También se analizó el MDE de SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 2000 con resolución espacial de 30 m. Debido a su alta resolución espacial, el MDE de LIDAR fue el de mayor utilidad. Se analizaron tanto el Modelo Digital de Superficie (MDS) que representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra (vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente), como el Modelo Digital de Terreno (MDT), que reproduce la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al terreno, como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del mismo. A partir de MDS y MDT se elaboraron imágenes de relieve sombreado, mapas de pendiente, curvas de nivel con equidistancia entre ellas de 20, 10 y 2 m, así como perfiles topográficos.

La topografía de la zona de estudio antes de la construcción del fraccionamiento muestra varios drenajes naturales rectilíneos que reflejan los rasgos estructurales de la zona, con base en los datos de LIDAR (MDT) de 2006 (Figura 4). En la naturaleza, el drenaje rectilíneo puede desarrollarse, tanto a lo largo de planos de falla o fractura, como en los límites entre unidades de roca o sedimentos. Para el periodo correspondiente a los depósitos del último millón de años de la región de San Diego-

Tijuana, el ambiente era el de una costa con topografía suave caracterizada por un drenaje pluvial trezado. Dependiendo del régimen de lluvias, el sistema de drenaje cambiaba la distribución de canales, siendo frecuente la disección de paquetes sedimentarios formando sistemas de canales o drenajes rellenos por materiales con sedimentos más o menos gruesos, dependiendo del régimen de lluvias. En un ambiente tectónicamente activo, muchos de estos canales se desarrollaron en zonas con fallas y fracturas, como se ha documentado en lugares como los alrededores de los fraccionamientos El

Valle y Hacienda Acueducto, al oriente del área de estudio (Delgado-Argote et al., 2011). En la Figura 3d se muestran los rasgos más notables en los alrededores de la zona del fraccionamiento Valle del Sur. El rasgo más prominente es la línea casi N-S que corresponde al arroyo de la calle Villas de San Antonio, el cual da acceso al fraccionamiento. Otros rasgos más pequeños son ortogonales entre sí y se orientan principalmente hacia el NW y NE. Dos de ellos se ubican en la zona del fraccionamiento, en particular el orientado hacia el NW, paralelo a la tendencia estructural dominante en la región.

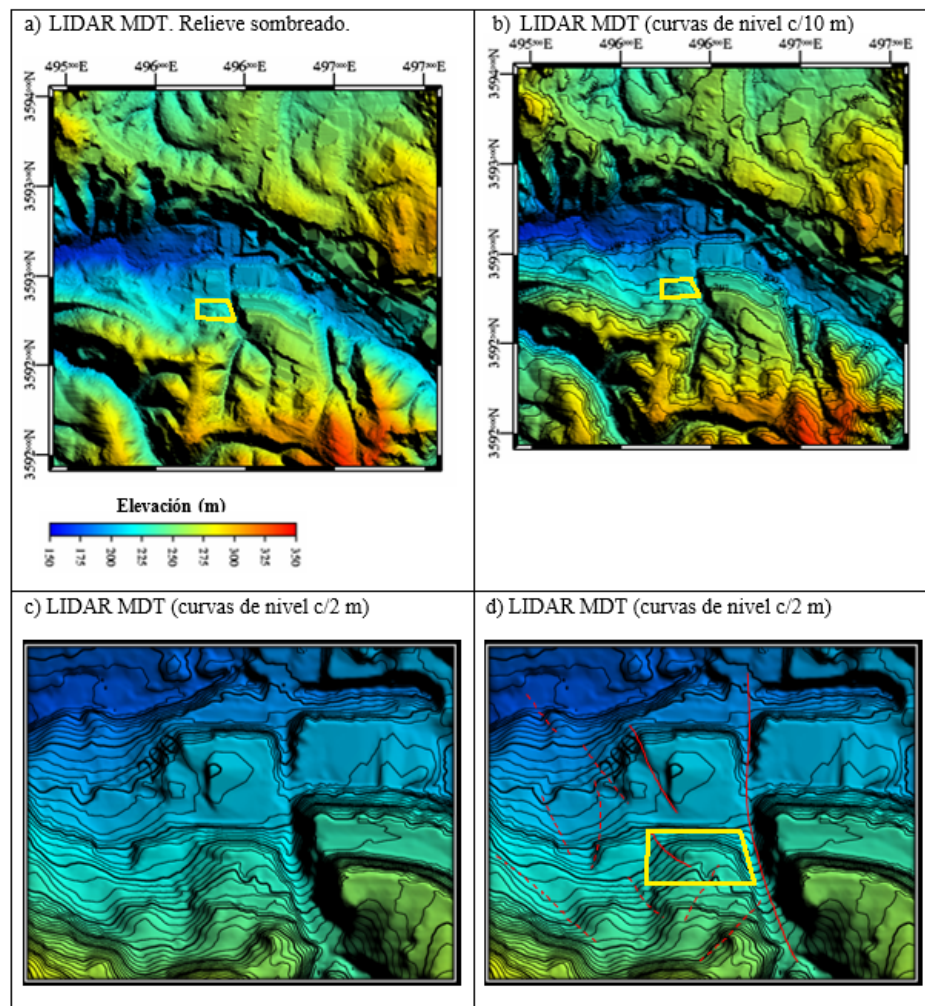


Figura 4. a) Imagen de relieve sombreado obtenido a partir de Modelo Digital del Terreno (MDT) de LIDAR (Light Detection And Ranging) del INEGI de 2006. Las alturas están en metros sobre el nivel medio del mar. b) Imagen de relieve sombreado con curvas de nivel cada 10 m. c) Detalle paleotopográfico de la zona del fraccionamiento con curvas de nivel cada 2 m. d) Lineamientos rectilíneos principales. El rasgo dominante es casi N-S en el arroyo de la calle Villas de San Antonio. Los lineamientos principales se orientan hacia el NW y pueden estar relacionados con el drenaje pluvial natural antiguo. La información topográfica es consistente con las cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI El Rosarito (Playas de Rosarito; I11C79) de 1980,1996 y 2005.

Geofísica

El estudio geoelectrico consistió en la inyección de corriente continua al subsuelo con una fuente artificial para medir su resistividad eléctrica, una propiedad intrínseca de las rocas medida en ohm-metro, equivalente al grado de dificultad que encuentran las corrientes eléctricas para transmitirse en el medio. En principio, la resistividad está relacionada con el grado de humedad en el subsuelo, por lo que las rocas ígneas cristalinas característicamente tienen resistividades altas (conductividad baja). Las rocas sedimentarias de grano grueso (conglomerados y areniscas), cuya porosidad y permeabilidad son altas, también se caracterizan por tener resistividades altas (conductividad baja), mientras que las rocas sedimentarias de grano fino, ricas en minerales arcillosos, aunque son poco permeables, tienden a concentrar la humedad y a comportarse de manera poco resistiva y ser buenas conductoras de la electricidad.

La prospección eléctrica se realizó con un resistivímetro Supersting R1/IP de la empresa AGI y cables con sensores inteligentes activos cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 2. Se instalaron arreglos tetrapolares con dos electrodos de corriente y dos de medición de potencial de los tipos Dipolo-Dipolo y Wenner. En

el arreglo Dipolo-Dipolo, el dipolo de potencial (electrodos M, N) se aleja del dipolo de corriente (electrodos A, B; Figura 5.a). Al alejar los dipolos se profundiza más y, al mover lateralmente los dipolos, se observan variaciones laterales de la resistividad (Telford et al., 1990). En el arreglo Wenner los electrodos tienen un espaciamiento uniforme a lo largo de la línea de prospección (Figura 5.c). Este arreglo es un caso particular del arreglo Schlumberger en el que, manteniendo los electrodos equidistantes, al incrementar la distancia "a", la penetración es mayor (Telford et al., 1990). De acuerdo con el patrón de corrientes, con cada método o arreglo se obtiene una "imagen" del subsuelo distinta, por lo que cada uno nos dará una versión distinta de medio. Ninguno de los tres arreglos ofrece una visión completa de la realidad, pero al reunirlos, de las fortalezas de cada uno se obtiene un modelo con la versión más cercana al medio real.

Durante el trabajo de campo se inyectó corriente continua con una fuente artificial para medir la resistividad eléctrica a lo largo de tres perfiles, los cuales se ubicaron de forma tal que pudieran dar una visión de las condiciones en que se encuentran las zonas afectadas por el movimiento del terreno. El perfil más extenso es el 1, con 161 m de longitud, ubicado debajo del talud que delimita la zona de deslizamiento donde se encuentran las casas más dañadas (Figuras 1 y 6).

Tabla 2. Características del resistivímetro utilizado para la prospección geoelectrica.

Rango de medición	+/- 10 V
Resolución de la medida	Máximo 30 nV dependiendo del nivel de voltaje
Intensidad de corriente de salida	1mA-2000mA
Voltaje de salida	800 Vp-p dependiendo de la transmisión de la corriente y resistividad del suelo
Potencia de salida	200 W
Ciclos de medida de Resistividad	0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 3.6, 7.2 o 14.4
Supresión de ruido	Mejor a 100 dB en $f > 20$ Hz
Configuraciones disponibles	Schlumberger, Wenner, Dipolo- dipolo, Polo-dipolo, Polo-polo, SP, IP
Rango de temperatura para operar	(-5, +50) °C

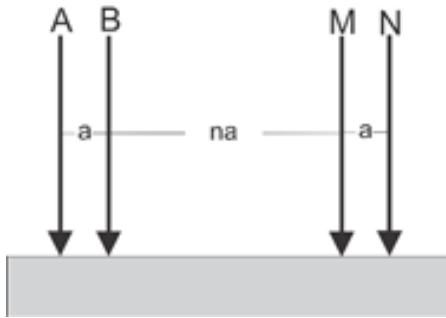


Figura 5a. Arreglo de electrodos con geometría dipolo-dipolo, con los electrodos de inducción de corriente A y B separados una distancia a en pares. La distancia na separa A-B de los electrodos de medición de potencial M-N, cuya separación es a .

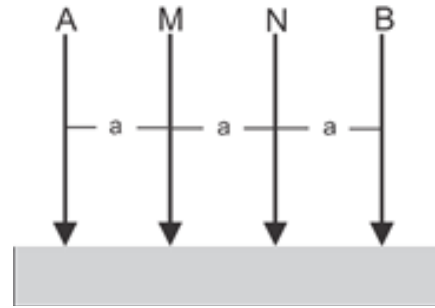
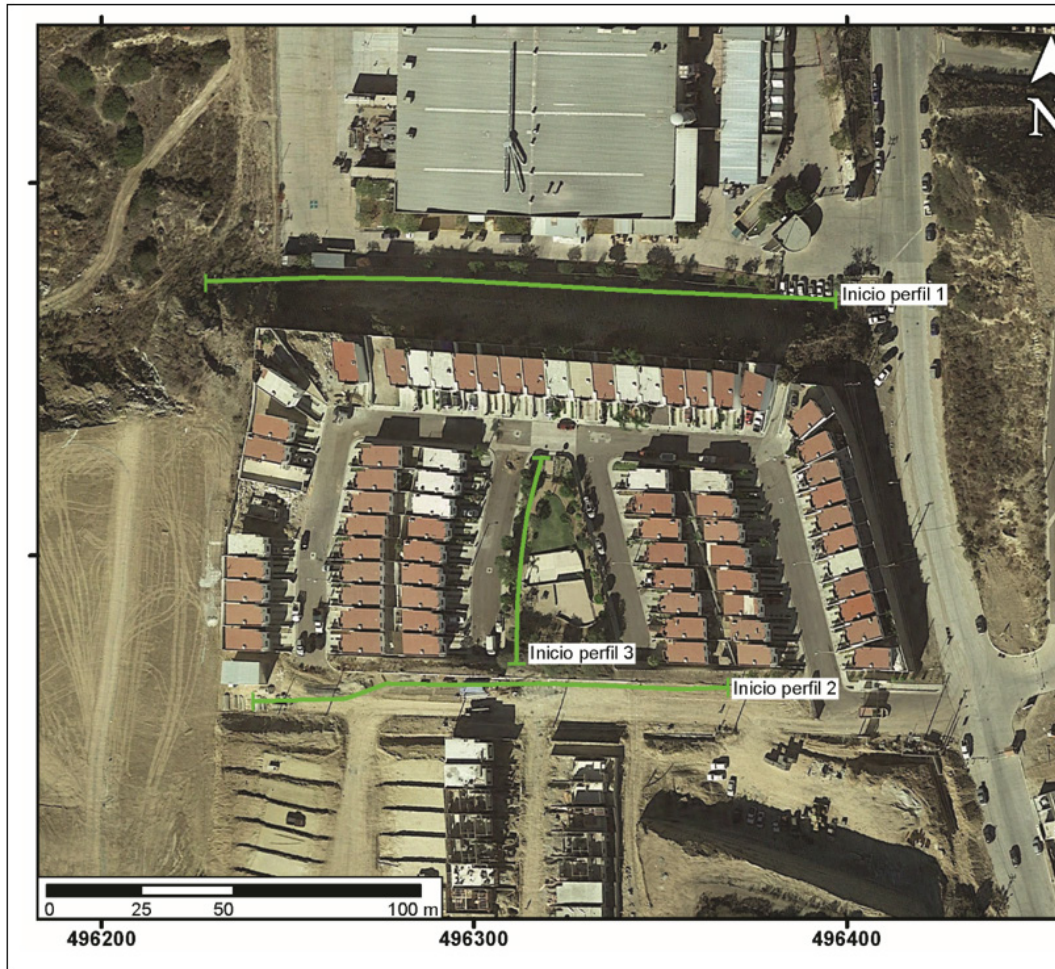


Figura 5b. En el arreglo tetraelectrónico Wenner, los cuatro electrodos tienen una separación uniforme de a . Las letras A, B, M y N tienen el mismo significado que en la Figura 5.a.



	Coordenadas de inicio	Coordenadas finales	Longitud (m)	Distancia entre electrodos (m)
Perfil 1	496400 E, 3592871 N	496238 E, 3592875 N	161	7
Perfil 2	496360 E, 3592757 N	496224 E, 3592761 N	135	5
Perfil 3	496310 E, 3592772 N	496314 E, 3592827 N	54	2

Figura 6. Ubicación de las líneas de sondeo geoelectrónico indicando el inicio de cada perfil. El perfil 1, o norte, se encuentra en la parte baja del talud a un costado de la cerca del predio de la planta industrial BBS. El perfil 2, o sur, se ubica en la parte alta del talud del sur del fraccionamiento y el perfil 3, o parque, en el lado oeste del parque.

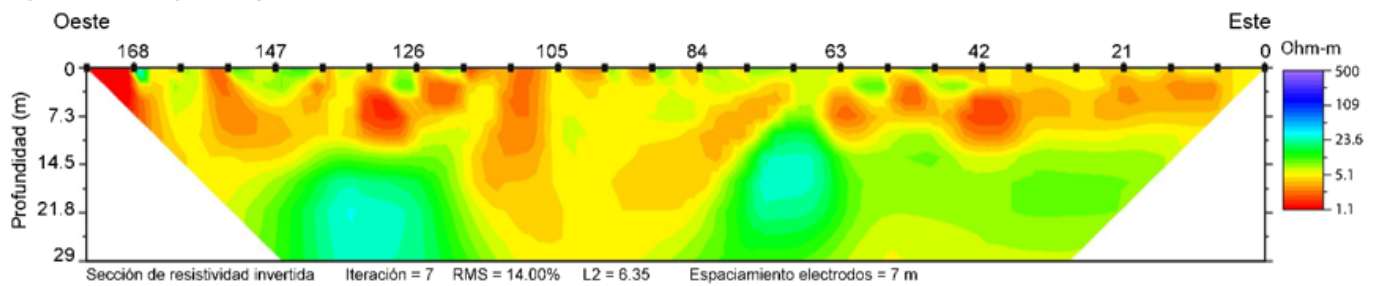
Procesado y resultados de los datos geofísicos

La interpretación de los datos de resistividad aparente obtenidos en el campo se realizó por medio de Imaging (Pérez-Flores et al., 2001), que es un método que utiliza aproximación de bajos contrastes en la resistividad aplicando un método de inversión con el que se convierten las resistividades aparentes en reales. Bajo esta forma de aproximación se puede ver que las resistividades aparentes obtenidas en el campo representan el promedio ponderado de las resistividades verdaderas que hay en el subsuelo, en un volumen que encierra al conjunto de los

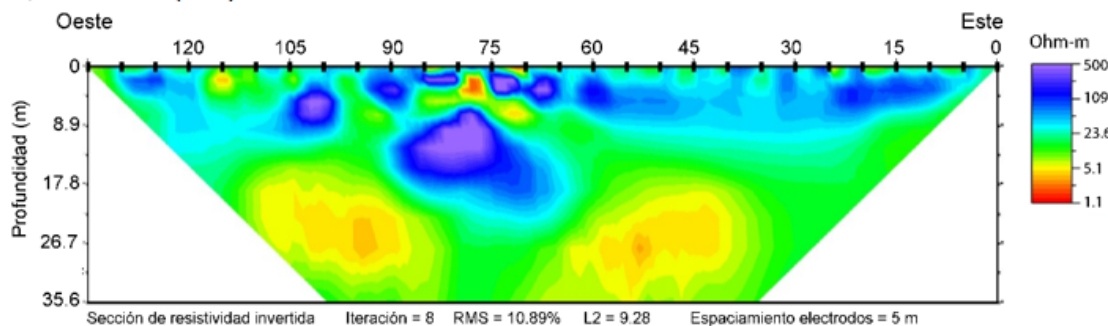
cuatro electrodos.

El resultado de la inversión conjunta es un modelo de resistividad que ajusta mejor los dos arreglos de datos obtenidos (Dipolo-Dipolo y Wenner). Ésta técnica de inversión o de Imaging produce buenos resultados cuando existen contrastes de resistividad bajos y moderados (Pérez-Flores et al., 2001). Se debe tomar en cuenta la fuerte dependencia de muchas de las propiedades eléctricas con respecto a la humedad, de forma que la asignación de valores de conductividad es compleja (Keller, 1989) y debe ponderarse a partir de criterios geológicos.

a) Perfil 1 (norte)



b) Perfil 2 (sur)



c) Perfil 3 (centro)

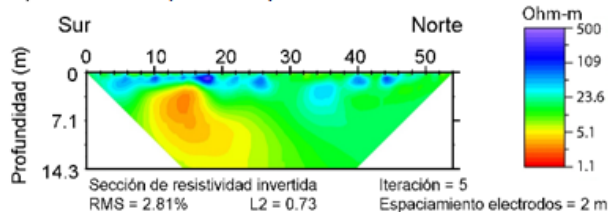


Figura 7. a) Sección eléctrica del perfil 1 o norte. b) Sección eléctrica de perfil 2 o sur. c) Sección eléctrica del perfil 3 o parque. La distancia y la profundidad están en metros. Los valores de resistividad en Ω -m están graficados en escala logarítmica.

Los resultados de la inversión conjunta de los datos adquiridos con los métodos Dipolo-Dipolo y Wenner se muestran en los perfiles geoeléctricos de la Figura 7. En los perfiles a-c de conductividad ($\Omega\text{-m}$) se hace referencia a cuerpos resistivos o poco conductores como sinónimos, ya que la conductividad es el inverso de la resistividad. En el perfil norte resaltan las estructuras con alta conductividad (1.1 a 5.1 $\Omega\text{-m}$; Figuras 5 y 6a), la cual se debe a la saturación de agua. En la parte central del perfil norte esta característica es más notoria y alcanza hasta 29 m de profundidad, la cual corresponde además, a la zona con mayor afectación por deslizamiento. En el perfil sur (Figuras 6 y 7b) son notables las estructuras resistivas (23-500 $\Omega\text{-m}$) en la parte más superficial, mientras que las estructuras más conductivas

(1.1-5.1 $\Omega\text{-m}$) se encuentran por debajo de 17 m. En la Figura 7c del perfil localizado en el parque, que es perpendicular a los anteriores, se observa una estructura conductiva al sur, la cual se extiende hacia el centro del perfil. Esta estructura también tiene una resistividad variable entre 1.1 y 5.1 $\Omega\text{-m}$.

Rasgos geológicos de referencia e interpretación conjunta

Geología regional

La respuesta del terreno a modificaciones en la topografía o a cambios en el grado de humedad está en concordancia con los rasgos estructurales (fallas y fracturas) y litológicos regionales. La

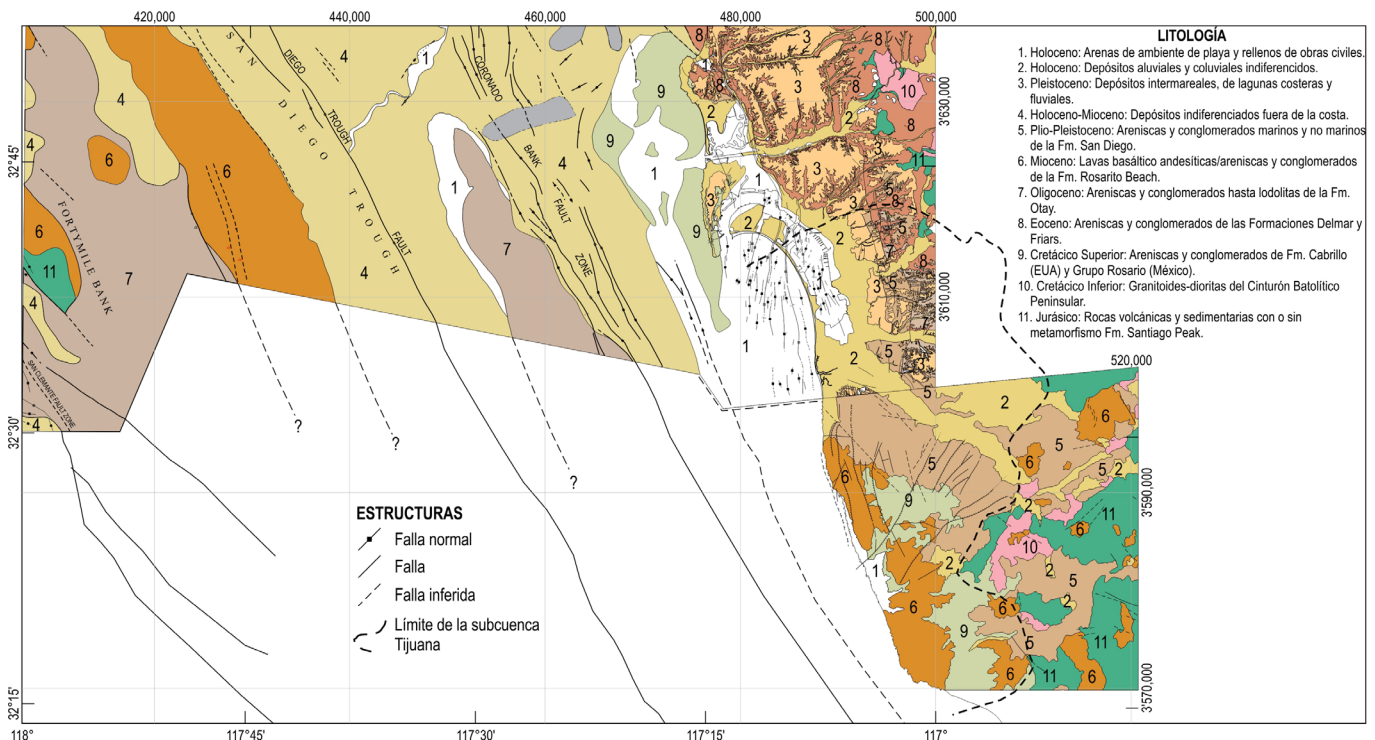


Figura 8. Mapa geológico del NW de Baja California y área de San Diego, California, E.U.A. La descripción litológica sintetiza la información de Kennedy y Tan (2008) y de Delgado-Argote et al. (2012). Las principales unidades litológicas de Baja California son a partir de los datos vectoriales geológicos del INEGI (2000) escala 1:250,000, y los rasgos estructurales en tierra son de Gastil et al. (1975) y los marinos de Legg et al. (1991). Se indican las áreas donde se han desarrollado trabajos similares al de este estudio: A) fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto (Delgado-Argote et al., 2011), B) Fracc. Jardines de Agua Caliente (Delgado-Argote et al., 2012), C) fraccionamiento Valle del Sur (este trabajo). Las tres áreas se encuentran en la Formación San Diego. A y B entre fallas principalmente normales y pliegues paralelos orientados hacia el NE. El Fracc. Valle del Sur (C) se encuentra entre estructuras no diferenciadas paralelas a las fallas normales del oeste de la ciudad que se interpreta que se formaron por levantamiento regional.

litología sobre la que se asienta la mayor parte de Tijuana se presenta de forma sintetizada en el mapa de la Figura 8. En ella se observa que las rocas más antiguas son las del basamento constituido por rocas volcánicas e intrusivas (unidades 10 y 11), tanto del arco volcánico Jurásico correspondiente a la Formación Santiago Peak, como a los granitoides cretácicos del Cinturón Batolítico Peninsular, más antiguos que 110 Ma (Kennedy y Tan, 2008). Después de ese periodo geológico, la región estuvo sujeta a una serie de levantamientos que provocaron la erosión de las rocas cristalinas, de cuyos sedimentos se desarrollaron la Formación Cabrillo y Grupo Rosario, en California, E.U.A. y Baja California, respectivamente. Estas unidades litológicas del Cretácico superior-Eoceno (9 en la Figura 8) profundizan hacia el oeste y se reconocen fuera de la costa en el condado de San Diego, California, E.U.A., donde les sobreyacen las Formaciones Lusardi, Point Loma y Cabrillo, formadas por sucesiones de areniscas y conglomerados (Kennedy y Tan, 2008). De acuerdo con Ashby (1989), durante el Mioceno, gran parte de Tijuana se localiza en la subcuenca Tijuana, la cual, según el autor, se extiende hasta la ciudad de San Diego, California. En esta cuenca se depositó la Formación Rosarito Beach (unidad 6 en la Figura 8), que está constituida por sedimentos epiclásticos y volcanoclásticos sobreyacidos por derrames de lava. En la zona fronteriza México-E.U.A. la Formación Rosarito Beach descansa sobre depósitos continentales de lodolitas y areniscas lacustres con fósiles de mamíferos (Kennedy y Tan, 2008). Sobre la secuencia anterior, en la transición del Plioceno al Pleistoceno, durante un periodo de una gran transgresión marina se depositó la Formación San Diego (5 en la Figura 8), formada por dos unidades litoestratigráficas: una inferior compuesta predominantemente de areniscas finas, y una superior formada de areniscas y conglomerados (Deméré, 1982). En el área de Tijuana Minch (1967) también reconoce dos miembros: el

inferior, compuesto de areniscas finas a grano medio con lentes ocasionales de conglomerados, y el superior, de areniscas medias a gruesas y conglomerados arenosos. En esta unidad litológica se manifiestan cambios en el nivel del mar y levantamientos regionales (Kennedy y Tan, 2008) representados por abundantes cambios de facies y desarrollo de paleocanales. Aunque no se cuenta con una cartografía detallada, es probable que los canales hayan tenido anchuras mayores a 1,000 m y relieves de varias decenas de metros, desarrollados bajo condiciones topográficas con pendientes de 1° a 2°, como los descritos en varios lugares de la costa de California, E.U.A. (Nardin, 1983). Dependiendo de la energía de las corrientes fluviales, los sedimentos que rellenaron los canales son de granulometría variable que, en el área de estudio, varía desde conglomerados gruesos y areniscas con matriz limo-arcillosa, hasta capas de limos y arcillas. Las unidades de la Formación San Diego y otros depósitos marinos y continentales interdigitados (parálisis) del Pleistoceno (Kennedy y Tan, 2008) están agrupados dentro de la unidad 5 de la Figura 8 de areniscas y conglomerados ya que no se cuenta con una cartografía de detalle de la región.

El conocimiento de la paleogeografía permite entender por qué las capas sobre el basamento cristalino no forman rocas, sino secuencias de sedimentos arenosos y conglomeráticos que fueron sepultados someramente, por lo que no alcanzan a consolidarse y por lo tanto se disgregan fácilmente al contacto con el agua. Además, los levantamientos sucesivos del terreno por factores tectónicos desarrollaron drenajes favorecidos por estructuras de fallas y fracturas, como los mostrados en la Figura 4. Tales estructuras de falla son paralelas a las regionales del mapa de la Figura 8.

Los trabajos geológicos sobre Tijuana son escasos. La mayoría tratan sobre riesgos

geológicos (p. ejem. Delgado-Argote et al., 1996; 2012), en los que se destaca la existencia de fallas sísmicamente activas orientadas NW y una sismicidad de magnitud menor con epicentros alineados con dirección NE, perpendiculares a las fallas regionales (Frez y Frías-Camacho, 1998). Además, levantamientos regionales a lo largo de la costa durante el Cenozoico (continúan hasta la actualidad) están ampliamente documentados tanto en la costa (Rockwell et al., 1989) como fuera de ella (Legg, 1991; Legg et al., 1991).

Rasgos geológicos de la zona de estudio e interpretación del deslizamiento

Estudios sobre deslizamientos en Tijuana (Delgado-Argote et al., 1996), muestran la frecuencia de los de tipo rotacional debidos a la conjunción de factores como la presencia de fallas o fracturas, pendientes del terreno mayor o igual a 18% (10°) y litologías poco competentes por su pobre consolidación, como las de la zona de estudio. Los trabajos anteriores también mencionan que los factores disparadores importantes de los deslizamientos son el grado de saturación de agua en los sedimentos, la sismicidad y otros factores de naturaleza antrópica, principalmente asociados con cortes pronunciados en el terreno y la carga por edificaciones.

Litológicamente, los alrededores del fraccionamiento están formados por capas alternadas de conglomerados y areniscas de espesores variables. Los polos de los planos de estratificación se muestran en la Figura 3.b, cuyo promedio está representado por el plano 078°/07°, el cual es inverso a la pendiente del talud norte donde ocurre el deslizamiento rotacional. Los efectos de este movimiento en dicho talud se muestran en la serie de fotografías de la Figura 9, en donde se incluye el modelo de bloques rotacionales de Highland y Bobrowsky (2008). En las zonas más elevadas hacia el sur, se observa un

aumento en la proporción de arena con respecto a conglomerado (tanque de la CESPT en el punto 3 de la Figura 3c) mientras que en el talud donde se localiza el deslizamiento rotacional principal, los limos y arcillas forman un depósito continuo entre los sitios 12 y 17 de la Figura 3c, interpretándose como depósitos en un arroyo o drenaje excavado en conglomerados. Los limos debieron depositarse en un periodo de relativa calma, con flujos suaves que transportaban sedimentos limosos y arcillosos. Hacia arriba, el relleno del paleodrenaje se enriquece en sedimentos arenosos hasta formar una capa de areniscas con conglomerados que se extienden lateralmente y caracterizan a la mayor parte de las capas que sobreyacen gradualmente a los depósitos del talud norte del fraccionamiento.

Los lineamientos interpretados de la topografía antigua que se muestran en la Figura 4d, los cuales tienen una orientación similar a las estructuras regionales del mapa geológico de la Figura 8, permiten inferir que los arroyos antiguos pudieron desarrollarse en estructuras similares. El buzamiento de los estratos de conglomerados hacia el sur, hacia el fraccionamiento, en sentido contrario al talud, mantuvo estable el terreno antes de la saturación de agua.

En el talud, dentro de la capa de limos del sitio 12 de la Figura 3c, se cartografiaron planos de deslizamiento orientados 290°/75°/53° y 315°/80°/50° con estrías de movimiento hacia 320°/62° y 325°/47°, lo que significa que son de movimiento por gravedad, con desplazamiento lateral izquierdo en la dirección de las estructuras regionales (Figura 8 y 10). Se interpreta que dichas fallas laterales se producen cerca del contacto entre limos y los conglomerados que los encajonan y que el movimiento se debe a que los sedimentos finos, en contraste con los conglomerados y arenas, retienen el agua, se comportan como un cuerpo coherente y se deslizan en la dirección de la pendiente por



Figura 9. Identificación de las diferentes partes del deslizamiento rotacional entre el fraccionamiento Valle del Sur y la planta BBS de acuerdo con el modelo de Highland y Bobrowsky (2008). Los nombres en *italicas* se refieren a los nombres del modelo de deslizamiento.

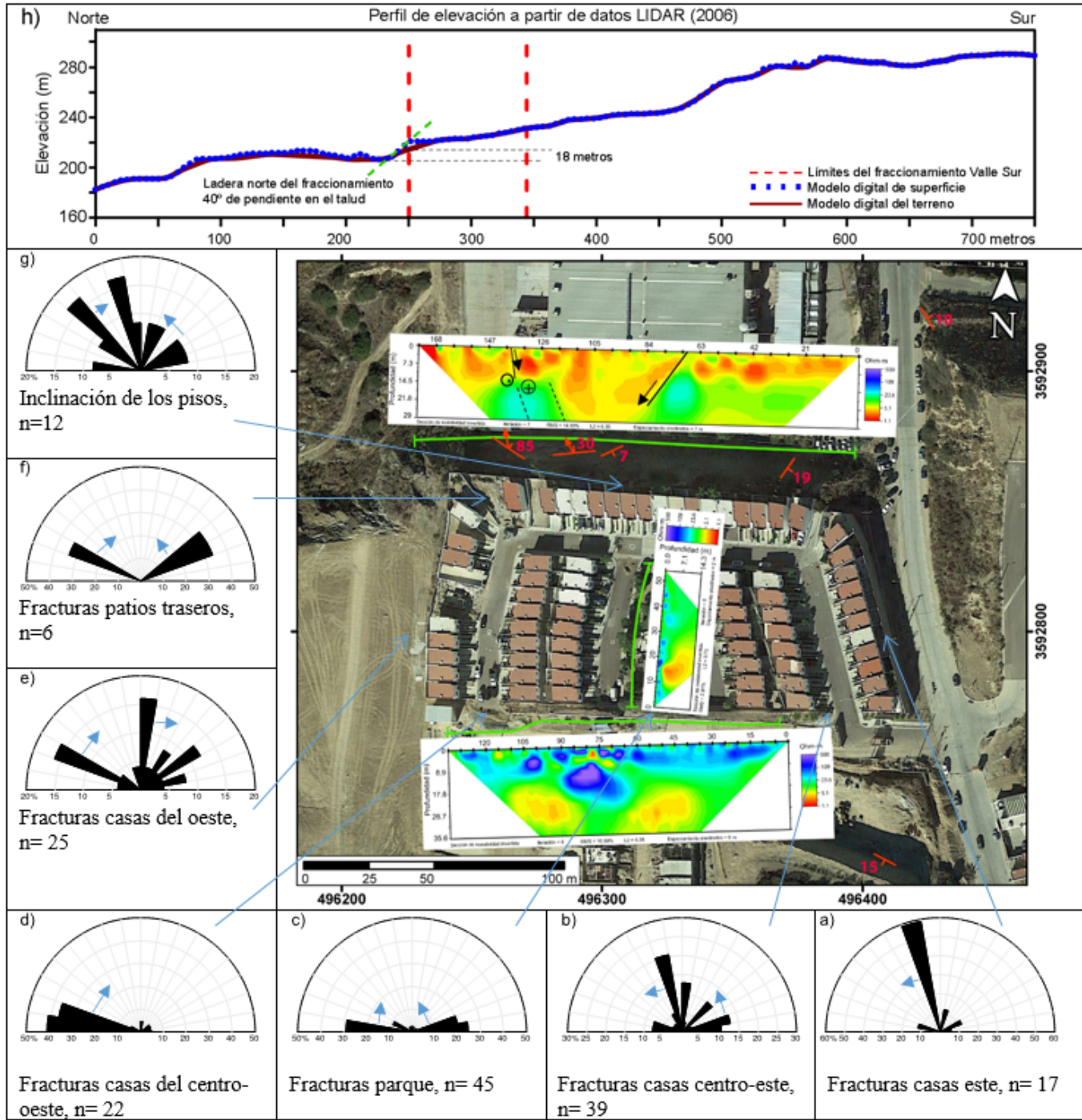


Figura 10. Mapa del fraccionamiento Valle del Sur y rosas de fracturas en casas y pisos (Tablas 1 y 3) e inclinación de pisos en el bloque de casas del norte (Tabla 2). Las flechas en el perfil norte indican dirección de movimiento y el punto y cruz en los círculos la dirección de movimiento lateral acercándose o alejándose del observador. Las flechas azules en los diagramas de rosa indica dirección de movimiento del terreno. El perfil en h) corresponde a la línea N-S de la Figura 3c.

el borde del paleocanal o arroyo antiguo. En el sitio 14 (figuras 3c y 10) se midió un plano de deslizamiento equivalente a una falla normal de bajo ángulo orientada $265^{\circ}/30^{\circ}/65^{\circ}$ con estrías de movimiento orientadas $325^{\circ}/30^{\circ}$. Es importante resaltar que las estrías de los dos planos de deslizamiento son casi paralelas y que el segundo plano tiene un ángulo bajo y es casi paralelo a las capas de limos del sitio 15 (Figura 3c), orientadas $065^{\circ}/07^{\circ}$. De acuerdo con el modelo de deslizamiento rotacional de Highland y Bobrowsky (2008) de la Figura 9, el plano $265^{\circ}/30^{\circ}/65^{\circ}$ se localiza cerca de la parte baja del cuerpo principal del deslizamiento rotacional, mientras que los planos de movimiento lateral, en el mismo modelo, corresponden al flanco lateral. Las diferentes partes del deslizamiento rotacional en el talud norte del fraccionamiento se muestran en las fotografías de campo de la Figura 9.

En el interior del fraccionamiento se midieron separaciones y fracturas en pisos y bardas, para estimar la zona de influencia del deslizamiento y, en su caso, identificar la dirección del movimiento en las diferentes zonas. En la Figura 10 se presenta una síntesis gráfica de dichos rasgos, los datos estructurales medidos en el talud que se describen en el párrafo anterior, así como los perfiles geoeléctricos y el perfil topográfico N-S de las figuras 3c y 7. En la rosa de fracturas de la Figura 10a se grafican los datos del conjunto de casas del extremo E del fraccionamiento, de los cuales, 10 de los 17 datos (60%), se orientan hacia el NNW (345°), con dirección probable del movimiento hacia el W. La Figura 10b muestra la misma dirección preferente en las casas del centro-este, además de fracturas orientadas E-W que sugieren que los movimientos deben estar dirigidos hacia N y W. Las fracturas en la parte central, en el parque (Figura 10c) refuerzan la sugerencia de 10b indicando que el movimiento en ese sector es hacia el N. El conjunto de casas del centro-oeste (Figura 10d),

con fracturas de separación WNW, sugieren que su origen se asocia a movimientos hacia el N-NE. El movimiento hacia el E y NE se deduce del bloque de casas del extremo oeste (Figura 10e). Esta serie de observaciones muestra un arreglo de aspecto cónico que coincide con la zona de mayor afectación en las primeras 10 casas del lado oeste y mínima o nula afectación en las casas localizadas lejos del talud (figuras 2 y 10). Las fracturas en los patios traseros de las casas ubicadas en el margen del talud (Figura 9) se orientan únicamente hacia el NE y NW (Figura 10f), indicando separación hacia el NW y NE, respectivamente, lo cual coincide con la distribución de las fracturas en el interior del fraccionamiento, que también es consistente con la inclinación medida en los pisos de las 10 primeras casas basculadas del W en la zona del talud norte (Figura 10g).

Los perfiles geoeléctricos levantados en la parte baja del talud del norte del fraccionamiento, en el parque del centro y en la parte topográficamente alta del extremo sur del mismo se muestran en la Figura 10. En el perfil del norte se muestran cuerpos de conductividad alta (rojo) por el contenido alto de agua. El cuerpo con la más alta conductividad se observa debajo de 126 m, donde se cartografiaron limos y arcillas saturadas con en agua. Este cuerpo contrasta con el de menor conductividad (azul) localizado inmediatamente al oeste. Dicho contraste corresponde también con un plano de deslizamiento con echado de 85° E y estrías de deslizamiento lateral dirigidas hacia el NW ($315^{\circ}/55^{\circ}$; sitio 12 de la Figura 3c). Arriba del punto de 63 m del perfil geoeléctrico en la base del talud (figuras 7a y 10) se cartografió una falla normal de bajo ángulo desarrollada también en un estrato limo-arcilloso que indica el movimiento de la masa hacia el norte (estrías orientadas hacia $325^{\circ}/30^{\circ}$; sitio 14 de la Figura 3c). Se interpreta que el cuerpo de más alta conductividad puede estar delimitado por debajo de los 30 m de profundidad por fallas normales

que forman un cuerpo con permeabilidad más alta. En el lado oeste del talud el movimiento horizontal es mayor, produciendo una falla de desplazamiento lateral en el flanco lateral oeste del modelo de deslizamiento rotacional de la Figura 9, mientras que en el este del cuerpo deslizado, donde la conductividad es alta, la falla normal con poco movimiento es la dominante, razón por la que las casas del lado este están menos movidas. La parte baja del cuerpo de aspecto tabular horizontal de conductividad alta localizado al este de la falla normal, a aproximadamente 14 m, se interpreta que corresponde al nivel freático local. Durante la exploración, este nivel alcanzaba la superficie del talud y mantenía húmedo el suelo desarrollándose musgo en toda la zona impregnada. En el perfil geoelectrico del parque se observa que la cima del cuerpo con conductividad alta se encuentra a aproximadamente 3 m de profundidad y tiene sólo 15 m de anchura, mientras que en el perfil del sur los dos cuerpos de conductividad alta se ubican a cerca de 18 m de profundidad. Tomando en cuenta el perfil topográfico de la Figura 10h, se interpreta que dichas profundidades de la cima de los cuerpos conductivos representan la profundidad del nivel freático y que la impregnación de un paleocanal rico en sedimentos limo-arcillosos debió promover el deslizamiento rotacional en la zona del talud cuya inclinación es de 40°. El peso de las 17 casas construidas en el borde del talud se estima en 60 ton cada una, debió ser un promotor importante en el movimiento de la masa.

Conclusiones

El análisis geomorfológico con base en imágenes de Google Earth, cartas topográficas, Modelos Digitales de Elevación (MDE) de 1978 y 1996 cuyas fuentes son cartas topográficas y LIDAR de 2006, muestra un drenaje natural rectilíneo que refleja estructuras asociadas con fallas o fracturas. El fraccionamiento Valle del Sur se asienta principalmente sobre

terreno natural y termina en su parte norte en un talud de aproximadamente 40° de inclinación. Litológicamente, los alrededores del fraccionamiento están formados por capas alternadas de conglomerados y areniscas de espesores variables de la Formación San Diego. Dichos estratos tienen una orientación promedio 078°/07°, buzando en sentido contrario a la inclinación del talud, el cual se conservó estable mientras no se saturó de agua. El área de estudio se ubica entre estructuras regionales orientadas NNW (~350°), como las fallas normales paralelas a la línea de costa. Localmente, se cartografiaron planos de deslizamiento con estrías de movimiento hacia 320°/62° y 325°/47° en el talud norte del fraccionamiento, con componente lateral que coincide con la dirección de las estructuras regionales. La geometría de los planos de movimiento y la deformación en la parte baja del talud corresponden con un modelo de deslizamiento rotacional. Dicha geometría también es consistente con el sentido de movimiento interpretado a partir de la distribución de fracturas en el interior del fraccionamiento.

Los perfiles geoelectricos levantados en la parte baja del talud del norte, en el parque y en la parte alta del límite sur del fraccionamiento muestran un nivel freático horizontal y posibles paleocanales que se bifurcan hacia el sur, topográficamente hacia arriba. En la parte baja del talud del norte, el principal cuerpo de conductividad alta está delimitado por una falla normal en el este con caída hacia el oeste, y otra de desplazamiento lateral izquierdo con caída al este, las cuales corresponden a los flancos laterales que definen el cuerpo principal del deslizamiento rotacional. En los costados de dichos planos la permeabilidad aumenta por la formación de fracturas asociadas con el movimiento de bloques.

Existe una buena correlación entre las discontinuidades de los cuerpos conductivos del

perfil norte con la geometría del deslizamiento rotacional, el cual se desarrolla básicamente en un cuerpo de limos y arcillas que se interpreta fueron depositados en un paleocanal o drenaje antiguo durante la depositación de la Formación San Diego y que, al saturarse de agua, tuvo un comportamiento plástico. Los conductivos más someros, desde la superficie hasta aproximadamente 14 m, corresponden al nivel freático en la zona norte del área de estudio. La anchura del cuerpo conductivo principal dominado principalmente por sedimentos finos es de por lo menos 70 m, por lo que es conveniente disminuir la pendiente y remover peso para evitar el avance de fracturas y eventual deslizamiento en la corona del deslizamiento rotacional.

Dada la frecuencia con que ocurren movimientos de masa en la ciudad de Tijuana, aún en temporadas de sequía, es altamente recomendable que en futuros desarrollos inmobiliarios se exijan estudios geológicos y geofísicos a detalle para evitar pérdidas materiales y, en el peor de los escenarios, humanas.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a los colonos del fraccionamiento Valle del Sur por su confianza y, a la Sra. Carolina Ricárdez, su representante, por la autorización para publicar los resultados de este estudio de diagnóstico. Agradecemos también a Víctor Frías por la elaboración del mapa geológico con información del California Geological Survey (Kennedy y Tan, 2008) bajo el permiso por escrito del Dr. John G. Parrish (16 de febrero de 2018), así como a Humberto Benítez por su apoyo editorial. La versión final de este trabajo mejoró enormemente gracias a las revisiones críticas de Felipe de Jesús Escalona y Miguel Téllez.

Referencias

- Ashby, J.R., 1989, A resume of the Miocene stratigraphic history of the Rosarito Beach Basin, Northwestern Baja California, Mexico. En *Geologic Studies in Baja California* (Patrick L. Abbott, Editor), The Pacific Section of the Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, p. 37-46.
- Delgado-Argote, L.A., Hinojosa-Corona, A., Aragón-Arreola, M., y Frías-Camacho, V., 1996, Estudio de riesgo geológico en Tijuana, Baja California, con base en rasgos estructurales y la respuesta del terreno, *GEOS*, vol. 16, no.2, p. 57-89.
- Delgado-Argote, Luis A., Juan Carlos Hurtado-Brito, Porfirio Avilez-Serrano y Gemma Gómez-Castillo, 2012, Factores geológicos y antrópicos de riesgo en Tijuana, Baja California: el caso del Fracc. Jardines de Agua Caliente, *GEOS*, v.32-2, p. 342-366. (<http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos12-2/JardinesTijuana.pdf>).
- Delgado-Argote, L.A., G. Gómez-Castillo, T.A. Peña-Alonso, X.G. Torres-Carrillo y P. Avilez-Serrano, 2011, Rasgos geológicos y morfológicos asociados con peligros naturales en los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, Tijuana, Baja California. *GEOS*, v.30-2, 1-16 pp. (<http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/2010/vol30-2/05.pdf>).
- Deméré, T.A., 1982, Review of the lithostratigraphy, biostratigraphy and age of the San Diego Formation, in Abbott, P.L., editor, *Geologic studies in San Diego: San Diego Association of Geologists*, p. 127-134.

- DMPCT (Dirección Municipal de Protección Civil de Tijuana), Editor, 2000, Atlas de Riesgos del Municipio de Tijuana, B.C., versión 1.0, 36 pp.
- Frez, J. y Frías-Camacho, V.M., 1998, Distribución de energía sísmica en la región fronteriza de ambas Californias, GEOS, 18-3, p. 189-196.
- Gastil, R. G., Phillips, R. P., and Allison, E. C. (1975), Reconnaissance geology of the state of Baja California. Geological Society of America Memoirs, 140, 1-201.
- Highland, L.M., and Bobrowsky, P., 2008, The landslide handbook –A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.
- Keller, G.V., 1989, Electrical properties, en: R.S. Carmichael, editor, Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals, CRC Press, pp. 361-427.
- Kennedy, M.P. and Tan S.S., 2008, Geologic Map of the San Diego 30' x 60' Quadrangle, California, California Geological Survey, Regional Geologic Map No. 3, scale 1:100,000 (<http://www.quake.ca.gov/gmaps/rgm/sandiego/sandiego.html>).
- Legg, M. R., 1991, Sea beam evidence of recent tectonics activity in the California Continental Borderland. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The gulf and peninsular province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 179-196.
- Legg, M. R., Wong, V. and Suárez, F., 1991, Geologic structure and tectonics of the inner Continental Borderland of northern Baja California. En: Paul Dauphin and Bernard Simoneit, Editors, The gulf and peninsular province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47, p. 145-177.
- Minch, J.A., 1967, Stratigraphy and structure of the Tijuana-Rosarito Beach area, northwestern Baja California, Mexico, Geological Society of America Bulletin, v.78, no. 9, p. 1155-1178.
- Nardin, T.R., 1983, Late Quaternary depositional systems and sea level change –Santa Monica and San Pedro basins, California continental borderland, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V.67-7, p. 1104-1124.
- Pérez-Flores, M. A., Méndez-Delgado, S., y Gómez-Treviño, E., 2001, Imaging low-frequency and dc electromagnetic fields using a simple linear approximation. Geophysics, 66, p. 1067-1081.
- Rockwell, K. T., Muhs, D., Kennedy, G., Hatch, M., Wilson, S. and Klinger, R., 1989, Uranium series ages, faunal correlations and tectonic deformation of marine terraces within the Agua Blanca fault zone at Punta Banda, northern Baja California, México. En: Patrick Abbott, editor, Geologic Studies in Baja California, The Pacific Section Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Los Angeles, California U.S.A., p. 1-16.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1990, Applied Geophysics. Cambridge University Press, p. 283-289.

Recibido: 15 febrero de 2018

Recibido corregido por el autor: 29 de mayo de 2018

Aceptación: 30 de mayo de 2018

Modelado cinemático de la fuente sísmica en 2D con ondas de volumen telesísmicas (Guía de Usuario)

J.M. Gómez-González¹, C. Mendoza¹, S. Hartzell² y T. Heaton³

¹Centro de Geociencias, Campus UNAM-Juriquilla, Blvd. Juriquilla 3001, Querétaro 76230, Qro.

gomez@geociencias.unam.mx

²U.S. Geological Survey, Denver Federal Center, Denver CO 80225, USA

³California Institute of Technology, Pasadena, CA

Resumen

Ponemos a disposición de la comunidad interesada en la Sismología los programas de inversión y modelado de falla finita. Se trata de un método lineal de inversión de ondas P y SH registradas a distancias telesísmicas. El método utiliza una serie de ventanas de tiempo para describir las características espacio-temporales de la fuente sísmica. Dichas ventanas permiten extraer la duración del desplazamiento en cada punto de la falla. El análisis cinemático de los parámetros de la fuente sísmica ha permitido examinar detalladamente la distribución del desplazamiento cosísmico sobre el plano de falla de varios terremotos de California, México y Sudamérica, entre otros. Dada la utilidad de estos programas de inversión en dos dimensiones nos interesa difundir e incentivar su uso entre la comunidad latinoamericana. Incluimos los datos reales y la inversión completa de un sismo. Con ello el lector podrá reproducir dicha inversión y comparar sus resultados con los nuestros. El programa modela fallas planas simples. Para ello requiere de un modelo físico de corteza, el cual influye en la calidad de la solución. Describimos los pasos esenciales para usar los programas. Su uso correcto permitirá aprovechar la gran cantidad y calidad de datos proporcionada por el creciente número de estaciones sísmicas alrededor del mundo. Incluimos una breve descripción de los códigos, archivos de datos y comandos utilizados en la inversión. La mayoría de los códigos están escritos en lenguaje FORTRAN, se pueden compilar sin mayor dificultad en sistemas operativos como UNIX o LINUX

1. Introducción

La inversión de la fuente sísmica proporciona información sobre el origen, evolución y distribución espacio-temporal del proceso de ruptura. Para ello se pueden modelar ondas de volumen registradas típicamente a distancias telesísmicas o regionales (Hartzell, 1989; Utkucu et al., 2002; Dreger, 2003; Zahradnik et al., 2008; Hsieh et al., 2014). La cinemática de la ruptura se puede estudiar desde una aproximación de fuente puntual (Nábélek, 1984; Dreger, 2003; Gómez-González et al., 2010) o de falla finita (Hartzell y Heaton, 1983, 1986; Mendoza et al., 2011). Los estudios de fuente puntual (FP) proporcionan una estimación de la profundidad

de la fuente, del mecanismo focal, de la duración de la función temporal de la fuente y del momento escalar. En el modelado de falla finita (FF) el hipocentro y mecanismo focal suelen tomarse de las determinaciones hechas por alguna agencia, aunque eso no excluye que éstos se puedan refinar durante la inversión. También se estima el momento escalar, la velocidad de ruptura, la duración de la fuente y la evolución del deslizamiento sobre el plano de falla. En los estudios de FF a estos dos últimos parámetros se les analiza con mayor detalle (Hartzell y Heaton, 1983, 1986; Mendoza et al., 2011; Mendoza y Hartzell, 2013).

Con la llegada de los instrumentos de banda ancha se incrementó la cantidad y calidad de datos. Ello ha permitido una amplia disponibilidad de registros sísmicos digitales, lo que a su vez ha facilitado estudios más detallados de la historia de la ruptura de los terremotos a escala global (Mendoza y Hartzell, 2008; Hsieh et al., 2014). Con ello ha mejorado nuestro conocimiento de la fuente sísmica y del proceso de generación y evolución de los sismos. Sin embargo, el aumento de investigaciones de FF no implica que la comunidad que usa los códigos de inversión sea necesariamente muy grande. De hecho en Latinoamérica sigue siendo pequeña. Por ello ponemos a disposición de la comunidad científica los programas de modelado de FF en dos dimensiones. En este documento ofrecemos una descripción sucinta de los códigos, archivos de datos y comandos utilizados en la inversión, así como un ejemplo de prueba que describe las características de los archivos de entrada, las señales analizadas y los archivos de salida. La mayoría de los códigos están escritos en FORTRAN, mientras que algunas secuencias de comandos están escritas en C-shell. El conjunto está listo para compilarse en los sistemas operativos UNIX o LINUX.

La metodología de inversión de FF que aquí se describe fue desarrollada por Hartzell y Heaton (1983; 1986). Se utiliza una parametrización cinemática de la falla para simular la distribución simple del deslizamiento cosísmico. Esto permite reproducir las formas de onda sísmicas generadas durante un sismo. El método se ha utilizado en el estudio de sismos grandes para modelar sismogramas registrados a distancias de entre 30° y 90° (Hartzell y Heaton, 1983, 1986; Mendoza et al., 2011; Mendoza y Hartzell, 2013). En este intervalo disminuyen considerablemente efectos indeseables como triplicaciones y ondas difractadas en el núcleo externo (Lay y Wallace, 1995; Stein y Wysession, 2003), ello facilita el modelado de prácticamente cualquier sismograma. La simulación del

deslizamiento requiere conocer la geometría de la fuente. El conjunto de programas de FF permite analizar prácticamente todo tipo de fallas planas simples. Una vez que se conocen las características espaciales de la falla, se realiza su parametrización. Ello incluye el cálculo de las funciones de Green de las fuentes puntuales de todas y cada una de las subfallas que componen el plano de falla (Figura 1), las cuales se requiere conocer con precisión. La inversión se encarga de estimar la duración y velocidad de la ruptura, entre otros parámetros (Hartzell y Heaton, 1983; 1986). Para ello se requiere de un modelo físico de corteza, el cual influye en la calidad de la solución.

Por otro lado, el uso práctico de los programas de inversión puede no ser trivial. Reconocemos que en general al utilizarse programas de cómputo de otros autores es común encontrar dificultades, ya sea en su compilación o en su instalación en el sistema operativo que se trabaja, debido a la falta de algunas bibliotecas, la omisión de algunas definiciones, etc. La dificultad puede aumentar al tratar de comprender la estructura interna de los códigos. Es posible que sean poco claros o poco amigables en su descripción o secuencia de uso. Por su parte, la falta de información en la introducción de parámetros representa la confrontación de la funcionalidad de los algoritmos con la posibilidad de obtener soluciones físicamente válidas. Por si fuera poco, la dificultad puede aumentar si durante el análisis de un evento específico surgen dudas. No siempre es sencillo obtener asesoría a distancia, y de lograrla no siempre ésta será muy efectiva, básicamente porque el autor de los códigos desconoce la secuencia que ha seguido el usuario durante su análisis. Tampoco es sencillo identificar o entender si la dificultad proviene de un error en los programas o en la forma en que se han procesado los datos.

Esta guía busca entonces ayudar a reducir algunas dudas. El documento contiene los elementos

básicos para utilizar los programas de inversión y modelado de ondas sísmicas en 2D. Se incluye una inversión completa con datos reales. Con ello buscamos facilitar la comprensión entre la teoría y la aplicación de la misma. Los programas de inversión, junto con un ejemplo de prueba con datos reales y la versión de esta guía en inglés se pueden encontrar en el portal de GITHUB del USGS (<https://github.com/usgs/finite-fault>). Los mismos programas, junto con esta guía en español, también se pueden obtener en el portal del Boletín Virtual Bol-e del Centro de Geociencias de la UNAM (<http://www.geociencias.unam.mx/~bole/bole/page2/page33/page33.html>). Con ello el usuario podrá explorar el uso de los programas, tratar de reproducir las inversiones y autoevaluar la calidad de sus resultados.

Recomendamos al usuario aprender a construir e interpretar mecanismos focales. También es importante que tenga nociones de procesamiento digital de señales y conozca el significado de un tensor. Para hacer la lectura más fluida los acrónimos se definirán al final del texto, citándolos con sus respectivas ligas.

2. Esquema de la Inversión

El método utiliza una falla plana rectangular, cuya orientación está predefinida por el mecanismo focal de la fuente sísmica reportado por alguna agencia (v. gr. USGS, ERI). La falla se divide en una malla regular de subfallas (Figura 1) y debe ser lo suficientemente grande para albergar el deslizamiento cosísmico esperado. El hipocentro del terremoto se coloca en una posición y profundidad adecuada dentro del plano de falla. Cada subfalla se compone de una serie de fuentes puntuales distribuidas de manera uniforme (Figura 1). El conjunto de subfallas se distribuyen a lo largo y ancho del plano de falla (Hartzell y Heaton, 1983; 1986; Mendoza, 1994). La función de Green de cada fuente puntual se calcula para todas y cada una de las estaciones disponibles utilizando un modelo de corteza predeterminado,

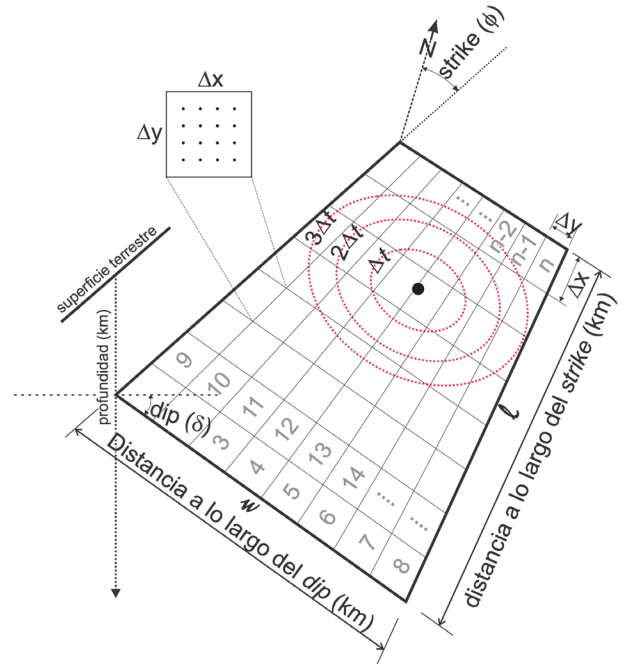


Figura 1. Descripción espacial de la geometría de la falla en profundidad. Se muestra la malla compuesta por las subfallas, cada una definida por Δx y Δy , para el modelado de falla finita. Cada subfalla está definida por un conjunto de fuentes puntuales para generar los desplazamientos al interior de ellas. El punto negro corresponde a la localización del hipocentro sobre la falla; los círculos concéntricos (líneas punteadas en rojo) indican un frente de onda en diferentes tiempos (Δt).

y una “boxcar” (función rectangular o “caja”) de duración finita como función temporal de la fuente puntual.

El método permite estimar el deslizamiento cosísmico de un “rake” (ángulo de deslizamiento) fijo o variable. En el primer caso, las funciones de Green se calculan para un mecanismo focal conocido del sismo. Si se requiere trabajar con un rake variable se calculan dos conjuntos separados de funciones de Green: uno para una falla “dip-slip” (normal o inversa) pura, y otro para la componente “strike-slip” (transcurrente) pura del ángulo de deslizamiento. Por ejemplo, si se espera que el ángulo de deslizamiento de un sismo sea de alrededor de 45° , entonces las funciones de Green se calculan para un rake de 0° y 90° . La inversión calcula la contribución del deslizamiento en la falla de cada componente,

con la identificación de la variabilidad en los ángulos de deslizamiento a lo largo de la falla. Como se verá más adelante, esto necesariamente duplica el número de incógnitas en el problema inverso que se quiere resolver.

Las funciones de Green de cada fuente puntual, en cada subfalla, se suman para producir los respectivos sismogramas sintéticos correspondientes en cada sitio de registro. El procedimiento considera el tiempo de retraso provocado por la propagación de la ruptura a una velocidad específica desde el hipocentro. La figura 2 esquematiza la parametrización para una falla rectangular de 255 km de largo y 165 km de ancho, dividida en 187 subfallas cuadradas de 15 km por 15 km. En este caso usamos una velocidad de ruptura de 3 km/s para calcular los sintéticos de las subfallas. Por convención las fallas se enumeran consecutivamente siguiendo el echado de la falla de arriba hacia abajo, siguiendo el rumbo de la misma (Figuras 1 y 2).

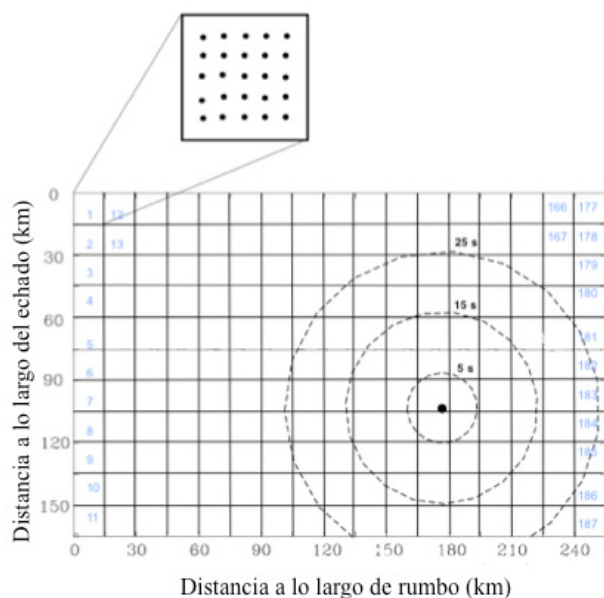


Figura 2. Descripción espacial de la geometría de la falla y su subdivisión en subfallas para el modelado de FF. Falla rectangular de 255 km de largo y 165 km de ancho, dividida en 187 subfallas cuadradas de 15 km por 15 km. Se usa una velocidad de ruptura de 3 km/s para calcular los sintéticos de las subfallas.

El problema por invertir se construye uniendo los sismogramas sintéticos desde un extremo de la falla hasta el otro, para todas las estaciones, y así conformar las columnas de una matriz **A** de coeficientes que contiene los sintéticos de las subfallas. Los sismogramas observados igualmente se unen de extremo a extremo en un vector de datos **b** para conformar un sistema sobredeterminado de ecuaciones lineales $C_d^{-1}Ax = C_d^{-1}b$, donde C_d^{-1} es una matriz de covarianza de datos que normaliza las amplitudes de los registros observados a un valor máximo unitario de 1. Los elementos del vector solución **x** corresponden al deslizamiento necesario en las subfallas para reproducir las observaciones normalizadas $C_d^{-1}b$.

2.1 Ventanas

La inversión usa una aproximación de ventanas de tiempo para discretizar en las subfallas el “rise time” (tiempo de dislocación) y el “rupture time” (tiempo de inicio) durante el deslizamiento. Esto se logra mediante la generación de un conjunto adicional de sismogramas para cada subfalla, con sismogramas sintéticos retrasados en tiempo por la duración de la “boxcar source-time function” (función rectangular temporal de la fuente) utilizada para calcular las funciones de Green iniciales. El número de veces que los sintéticos de las subfallas son retrasados representa por lo tanto, el número de ventanas de tiempo que se utilizarán en la inversión. Este proceso de ventanas de tiempo aumenta el número de incógnitas en el problema lineal, y se utiliza el procedimiento de inversión para resolver la contribución del deslizamiento en cada una de las ventanas de tiempo “prescritas”; ello permite un rise time variable, así como una relajación de las restricciones de una velocidad de ruptura fija. Por ejemplo, si se usa una boxcar de 2 s de duración para construir los sintéticos de las subfallas de la figura 2, y estos sintéticos se retrasan cinco veces por los 2 s del ancho de la boxcar (correspondiente a 5 ventanas de

tiempo), entonces la inversión permitiría un rise-time de hasta 10 segundos en cada subfalla, si así fuera requerido por las observaciones. De igual forma, el tiempo de ruptura en cualquier subfalla podría ser retrasado hasta 8 s, relativo al tiempo requerido por una ruptura propagándose a una velocidad constante. En este sentido, la velocidad de ruptura usada para calcular las funciones de Green originales corresponde a la velocidad máxima permitida en la inversión. Nótese que el número de incógnitas aumenta por un factor correspondiente al número de ventanas de tiempo. En el ejemplo de la figura 2 el número de incógnitas se incrementa de 250 a 1250 cuando se utilizan cinco ventanas de tiempo en la inversión. Esto provoca que las dimensiones de los arreglos de vectores que se usan se tengan que ajustar en cada inversión.

2.2 Estabilidad y Positividad

El problema inverso se estabiliza añadiendo ecuaciones de restricción al sistema lineal, de la forma

$$\begin{bmatrix} C_d^{-1}A \\ \lambda F_1 \\ \lambda F_2 \end{bmatrix} x = \begin{bmatrix} C_d^{-1}b \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde **A**, **x**, **b** y C_d^{-1} son la matriz de coeficientes, el vector solución, el vector de datos y la matriz de covarianza definidos anteriormente. F_1 corresponde a la diferencia en deslizamiento entre subfallas adyacentes, lo que impone una transición suave del deslizamiento entre las subfallas. Por su parte F_2 es la matriz identidad, y su presencia reduce la longitud del vector **x**, minimizando efectivamente el momento sísmico total. El valor del factor de ponderación escalar λ controla el compromiso (trade-off) entre la aplicación de las restricciones y el ajuste de las observaciones.

Ambas restricciones comúnmente se aplican simultáneamente utilizando el mismo valor de λ . El vector solución **x** se obtiene utilizando el

esquema de inversión de mínimos cuadrados no negativos (NNLS) de Lawson y Hanson (1974). Este esquema tiene una restricción de positividad en la que los pesos del deslizamiento, inferidos en las subfallas, sólo permiten valores positivos. Esto elimina la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos negativos a lo largo de la falla, los cuales pueden dar lugar a una interferencia destructiva indeseable entre las subfallas.

La versión original del programa de inversión requiere de múltiples corridas secuenciales utilizando valores incrementales de λ para obtener un valor óptimo que identifique la solución más simple posible. Este procedimiento generalmente involucra una inspección visual de los ajustes de las formas de onda después de cada inversión, como se describe más adelante en la sección 6, y resulta en un solo peso derivado empíricamente que identifica el modelo de deslizamiento inferido para el sismo. El sistema lineal corresponde a un problema inverso tipo Tikhonov, cuya solución puede derivarse a partir de un análisis más cuantitativo de curva L (Hansen, 1998). Dicho análisis identifica el equilibrio entre el ajuste de los datos y el cumplimiento de las restricciones de estabilización. Mendoza y Hartzell (2013) evaluaron este análisis de curva L mediante el uso de ondas P telesísmicas registradas para varios eventos grandes. Ellos encontraron que se puede estimar un peso λ , cercano al valor óptimo, a partir del promedio de los valores absolutos de los elementos de la matriz de coeficientes $C_d^{-1}A$. Ello simplifica la inversión, pues a partir de este peso λ pre-estimado se puede recuperar la historia de la ruptura del terremoto en un solo paso. Esto es útil si se requiere, por ejemplo, obtener soluciones relativamente rápidas y confiables de sismos importantes cuando se tiene acceso a las formas de onda en tiempo real. Ambas inversiones, de estimación clásica de λ , y de pre-estimación automática de λ , se describen en este documento.

3. Códigos de Inversión

Para el análisis de falla finita se requiere ejecutar varios programas de cómputo que leen los datos observados, generan los sintéticos de las subfallas y realizan la inversión (Figura 3). En la secuencia de los códigos los programas CADIN y CADLAC generan los sintéticos de las subfallas, mientras que TELMOD permite procesar los registros de datos observados y sintéticos. El programa JULIEW organiza las observaciones y sintéticos para realizar la inversión. Mientras que el programa LISA lleva a cabo propiamente la inversión lineal. Finalmente, el programa PLISA lee los resultados de la inversión y recupera la distribución del deslizamiento sobre la falla para ser graficados. Estos y otros códigos suplementarios útiles se describen de forma particular en las secciones siguientes (ver Figura 3).

4. Datos de la Forma de Onda

Para llevar a cabo el análisis telesísmico de falla finita, los datos crudos registrados del terremoto que se pretende analizar se obtienen inicialmente de una base de datos global, como el repositorio de formas de onda continuas (CWB, por sus siglas en inglés) del USGS/NEIC (United States Geological Survey/National Earthquake Information Center) o los repositorios del *Incorporated Research Institutions for Seismology* (IRIS). Las bases de datos del CWB están a disposición de la comunidad científica a través de servidores de clientes dedicados, allí se almacenan poco después de que se registran en las diversas estaciones mundiales. Para obtener información sobre la recuperación de datos de la CWB los usuarios pueden consultar la documentación del USGS/NEIC (<ftp://hazards.cr.usgs.gov/CWBQuery/CWBQuery.doc>). Los datos de IRIS están generalmente disponibles a través de su sitio web (<http://ds.iris.edu/ds>); para ello existe una gran variedad de herramientas de recuperación de datos.

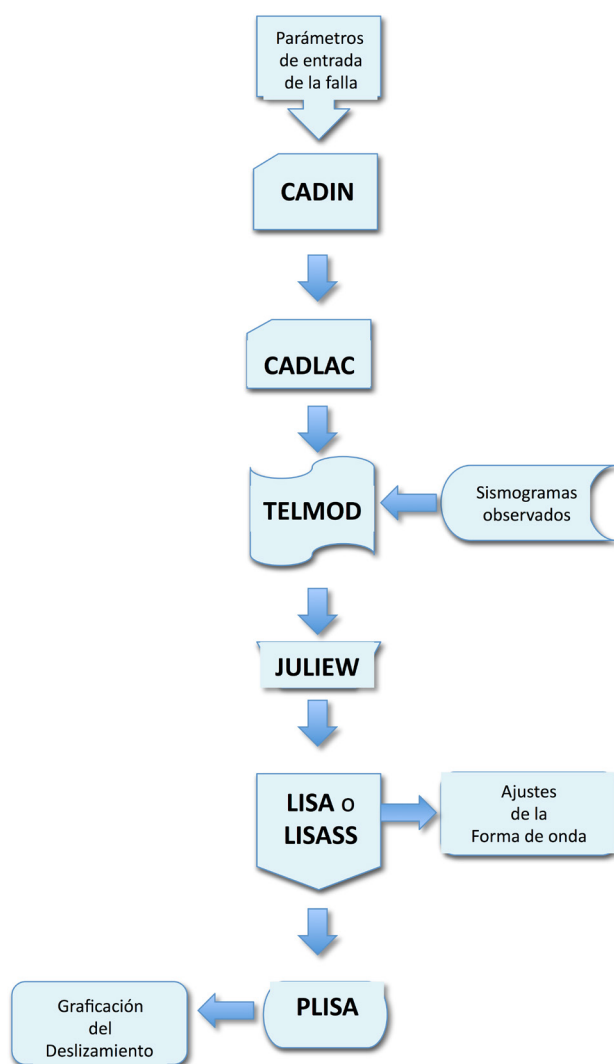


Figura 3. Secuencia de utilización de los programas para el modelado de Falla Finita (FF), los cuales se pueden obtener en:

www.geociencias.unam.mx/~bole/bole/page2/page33/page33.html.

Se omiten en este documento los procedimientos de recuperación y procesamiento de datos, ello debido a que éstos pueden variar según sea el centro del que se obtienen dichos datos, así como del tipo de análisis de señales que requieran aplicar los usuarios. En el caso de los ejemplos que se incluyen en esta guía, los datos sísmicos crudos obtenidos provienen de diferentes centros de acopio. La mayoría de ellos

se obtuvieron en formato SAC (Seismic Analysis Code, Goldstein et al., 2003). Este formato tiene la ventaja de que para su procesamiento existen varias rutinas y scripts disponibles en el portal de IRIS. Una vez procesados los datos, éstos deben transformarse y almacenarse en un archivo en formato binario en el orden requerido por el programa TELMOD. Los códigos están diseñados para invertir amplitudes del movimiento del terreno en velocidad o desplazamiento, de modo que el usuario debe modificar los registros según el tipo de inversión que quiera realizar. Se debe de recordar eliminar la respuesta instrumental de las señales antes del análisis de la forma de onda. Las unidades de las amplitudes de los registros reales deben ser compatibles con las de los sintéticos (ver Sección 5).

Para la inversión de los sismogramas, su tiempo de inicio se puede marcar en el arribo de la onda de cuerpo o en algún tiempo fijo conocido antes de dicho arribo. El tiempo de inicio del registro se puede ajustar numéricamente más tarde con el programa TELMOD (ver más abajo). De ser necesario invertir más de un tipo de datos simultáneamente (por ejemplo, ondas P y SH), entonces se debe preparar un archivo por cada tipo de onda, ya que los sintéticos para los diferentes tipos de datos se construyen por separado. Los archivos se pueden unir posteriormente, antes de la inversión, utilizando el programa CONCAT para crear un solo archivo que contenga las observaciones y los sintéticos que pueden ser leídos por los códigos de inversión. Es preciso aclarar que los registros deben ser lo suficientemente largos para contener todo el intervalo de tiempo a invertir.

4.1 Programa TELMOD

Este programa se ejecuta interactivamente y se usa para procesar tanto los sismogramas observados como los sintéticos. Cuando se procesan datos observados, el código ofrece las siguientes opciones:

1. Eliminar el promedio de las amplitudes de los registros de datos.
2. Filtrar los registros usando un filtro pasa bandas de Butterworth. Considere que cualquier filtro que se aplique a los datos observados se debe aplicar igualmente a las formas de onda sintéticas (ver Sección 5).
3. Eliminar el comienzo de cada registro por una longitud de tiempo definida para alinear adecuadamente los datos observados con los sintéticos. Esta eliminación no es necesaria si el archivo de datos ya contiene registros que empiezan en los arribos de las ondas de cuerpo. Sin embargo, puede requerirse ejecutar TELMOD de nuevo y volver a realizar la inversión si se necesitan ajustes de tiempo para identificar el modelo de deslizamiento más adecuado.
4. Interpolan los registros a un intervalo de tiempo común.
5. Modificar la polaridad de cualquier registro deseado.

5. Sismogramas sintéticos de las subfallas

Los sismogramas sintéticos de las subfallas, para el problema de inversión de datos telesísmicos, se construyen utilizando el programa CADLAC para una estructura de corteza en capas. Éste programa utiliza la teoría generalizada de rayos (Langston y Helmberger, 1975), la cual calcula la respuesta sísmica para fuentes puntuales distribuidas a lo largo y ancho de cada subfalla, para luego sumar las respuestas que permitan construir las señales sintéticas de cada subfalla. El cálculo de la respuesta sísmica toma en cuenta la propagación de la ruptura a una velocidad constante predefinida. La teoría considera la incorporación de reflexiones internas y conversiones de modos dentro de una estructura cortical estratificada, permitiendo así la contribución de las fases de profundidad (pP, sP, sS, pS) en la respuesta telesísmica. CADLAC lee una serie de archivos que contienen los rayos

ubicados en una carpeta nombrada RAYS. La ruta de acceso a dicha carpeta está explícitamente definida dentro del código, y el usuario debe verificar que ésta ruta coincida con la ubicación real de la carpeta RAYS en el disco duro antes de compilar CADLAC. Debido a que el código puede resultar relativamente complicado de seguir en su estructura para entender el formato en el que se deben introducir los datos, utilizamos previamente el programa CADIN para crear un archivo de entrada para CADLAC y así simplificar su uso, tal como se describe a continuación. Los sintéticos de las subfallas generados por CADLAC corresponden al desplazamiento del terreno en micras. Enseguida estos registros se procesan utilizando el programa TELMOD para prepararlos para la inversión. Si los registros de datos a invertir corresponden al movimiento del terreno en velocidad, entonces los registros sintéticos deben ser adicionalmente diferenciados en TELMOD para obtener unidades en micras/segundo, como se indica más abajo.

5.1 Programa CADIN

CADIN se ejecuta interactivamente y requiere varios parámetros de entrada, incluyendo las dimensiones y geometría de la falla, el número de subfallas y la velocidad de ruptura que se utilizará en la inversión. Ello produce los archivos siguientes:

1. *cadin.dat*: archivo ASCII utilizado como entrada a CADLAC.
2. *weight.dat*: archivo ASCII leído por CADLAC que contiene los pesos iniciales de la dislocación de la subfalla a lo largo del strike y el dip de la falla. Por defecto se establecen en 1.0 para todas las subfallas.
3. *arszcad.dat*: archivo ASCII que contiene una declaración PARAMETER utilizada por CADLAC para definir las dimensiones del arreglo para el problema particular de falla finita que se va a resolver. CADLAC debe ser compilado por separado para cada ejecución de inversión

utilizando el archivo *arszcad.dat* apropiado.

5.2 Programa CADLAC

CADLAC además de leer el archivo *weight.dat*, lee un archivo preexistente denominado *inlong.dat* o *inshort.dat* que especifica la duración del tiempo, el número de puntos y la tasa de muestreo de los sintéticos. Este archivo incluye los nombres, distancias, azimuts y parámetros de rayos de las estaciones que se quieren modelar, así como la especificación de la estructura estratificada de la corteza que se utilizara para generar los sintéticos. El archivo *inlong.dat* contiene datos telesísmicos de banda ancha o de período largo. El archivo *inshort.dat* se utiliza para analizar datos de período corto. Para ejecutar CADLAC, se compila primero el código usando el archivo de parámetros *arszcad.dat* correspondiente y luego se teclea:

```
cadlac < cadin.dat
```

para redirigir la entrada desde el archivo *cadin.dat*

CADLAC produce los siguientes archivos de salida:

- 1) *cadbin.dat*: Archivo binario que contiene los registros sintéticos calculados para cada subfalla en cada una de las estaciones listadas en el archivo *inlong.dat*.
- 2) *cadout.dat*: archivo ASCII que imprime los detalles de la ejecución CADLAC. Un parámetro importante enumerado en este archivo es la dislocación (en centímetros por unidad de peso) que corresponde al momento sísmico de entrada. Este valor, llamado factor de escala CADLAC (CSF por sus siglas en inglés), se requiere para más tarde recuperar el deslizamiento real en cada subfalla de los pesos de dislocación identificados en la inversión (ver Sección 7).
- 3) *cadarr.dat*: archivo ASCII que lista el primer arribo de la onda de cuerpo (en segundos) en

cada estación. Corresponden al tiempo entre el inicio de los sintéticos y el arribo de las fases P o S en la subfalla del hipocentro. Antes de la inversión, estos sismogramas sintéticos deben de ser alineados correctamente con las observaciones. El programa TELMOD permite realizar este ajuste en los sismogramas (ver abajo).

5.3 Programa TELMOD

Para los sismogramas sintéticos se utiliza TELMOD para realizar las siguientes tareas:

1. Filtrar los registros de las subfallas utilizando un filtro pasa bandas de Butterworth, si el filtrado se ha aplicado previamente a los sismogramas observados. Los parámetros del filtrado entre los datos observados y sintéticos deben ser los mismos.
2. Interpolarse a un intervalo de muestreo uniforme en el tiempo.
3. Derivar hacia la velocidad del terreno, en caso de que los sismogramas observados estén en velocidad.
4. Eliminar los tiempos *cadarr.dat* desde el extremo frontal de los sismogramas sintéticos en cada estación para alinearlos correctamente con las formas de onda observadas.

Es importante inspeccionar visualmente los sismogramas sintéticos antes y después de ejecutar TELMOD, ello para verificar que están siendo calculados y cortados correctamente, ya que puede haber importantes variaciones en el tiempo (v. gr., cuando los sintéticos de velocidad se cortan usando tiempos especificados en *cadarr.dat* basados en registros de desplazamiento de CADLAC). Después del procesado con TELMOD, el tiempo de inicio del registro sintético, calculado para la subfalla que contiene el hipocentro, debe corresponder a la llegada de la onda de volumen. Si no es así, los tiempos de *cadarr.dat* deben ajustarse manualmente en los momentos apropiados y TELMOD debe ejecutarse de nuevo.

El programa SYNPLT se puede utilizar para ver los sintéticos calculados para subfallas individuales o estaciones individuales. El programa utiliza llamadas de graficado del estilo CALCOMP y debe compilarse con una biblioteca apropiada. Incluimos una biblioteca de graficado CALCOMP, aunque es responsabilidad del usuario compilar e instalar correctamente las bibliotecas y/o hacer las modificaciones necesarias al código existente. Los registros podrían visualizarse alternativamente con cualquier otro código proporcionado por el usuario o rutinas para graficar adaptadas para leer formato binario.

6. Inversión de la forma de onda

La inversión de la forma de onda requiere que los archivos de datos observados y sintéticos estén colocados primero en el formato adecuado mediante el programa JULIEW, del mismo modo es necesario que se especifiquen las longitudes de registro y el número de ventanas de tiempo que se utilizarán en la inversión. JULIEW prepara dos archivos binarios: *juliea.dat*, que contiene los sintéticos de las subfallas y *julieb.dat*, el cual contiene las formas de onda observadas. Estos archivos son leídos por el programa LISA, que es el código que en realidad realiza la inversión usando la rutina NNLS de Lawson y Hanson (1974), teniendo en cuenta el suavizamiento espacial deseado y/o la minimización de momento prescrita por los factores de ponderación λ definidos por el usuario. Para identificar la ponderación adecuada que se requiere, se puede ejecutar LISA varias veces, de forma consecutiva utilizando diferentes valores de λ , la salida se examina en cada ocasión para confirmar el valor de entrada o ajustar el factor para las ejecuciones posteriores. En la práctica, esto se lleva a cabo ejecutando primero la inversión sin restricciones de estabilización para identificar el mejor ajuste esperado entre las formas de onda observadas y predichas. Posteriormente se realiza de nuevo la inversión varias veces, incrementando el valor λ en cada ocasión, hasta que las formas de

onda sintéticas ya no ajusten más los registros observados. Este es el número óptimo de iteraciones, más allá del cual los ajustes de las formas de onda se deterioran y ya no es posible reconocer el modelo más simple (Mendoza y Hartzell, 2013).

Alternativamente, se pueden trazar las normas residuales frente a las normas de suavizado de varias corridas para producir una curva L (Hansen, 1998), ello ayudaría a identificar el valor óptimo del peso λ del suavizado. Un ejemplo de este análisis de curva L para el problema inverso de falla finita se puede encontrar en Mendoza y Hartzell (2013). Si se desea, la inversión se puede realizar en un solo paso usando el programa LISASS, el cual utiliza un valor de λ estimado a partir de la matriz de coeficientes $C_d^{-1}\mathbf{A}$. Para ello el programa LISASS usa la relación empírica $\lambda = 90A_{avg}$ propuesta en Mendoza y Hartzell (2013), donde A_{avg} es el promedio de los valores absolutos de los elementos de la matriz de coeficientes.

Ambas versiones de LISA generan un archivo ASCII llamado *lisaout.dat*, éste contiene los pesos de dislocación de cada subfalla (vector de solución $\mathbf{x}$) necesarios para reproducir los registros observados. Ambos códigos, LISA y LISASS, deben ser compilados específicamente para el problema en cuestión, es decir, el problema debe ser dimensionado exactamente. Esto se hace usando el archivo de parámetros *arszlisha.dat*, donde:

$M = MDA$ = Número total de renglones en la matriz $\mathbf{A}$

N = Número total de incógnitas en la matriz $\mathbf{A}$

$N3 = 327$ (siempre)

El número total de renglones M en la matriz $\mathbf{A}$ está dado generalmente por:

$$M = M_{NP} + M_{RS} + M_{RM}$$

donde M_{NP} es el número total de puntos de todos los registros de datos; M_{RS} es el número de renglones agregados para el suavizado espacial y M_{RM} es el número de renglones añadidos para la minimización del momento. Por lo tanto, M depende de las restricciones de estabilización que se colocan en el problema inverso. Las variables necesarias para identificar las dimensiones apropiadas son:

$$M_{NP} = nrec \cdot sps \cdot rlen$$

$$M_{RS} = Nm \cdot Nt \cdot [Nss \cdot (Nsd-1) + Nsd \cdot (Nss-1)]$$

$$M_{RM} = Nm \cdot Ns \cdot Nt = N$$

donde:

$nrec$ = número de registros de datos

sps = muestras por segundo en los registros de datos

$rlen$ = longitud de los registros en segundos

Nm = número de mecanismos

Ns = número de subfallas

Nt = número de ventanas de tiempo

Nss = número de subfallas a lo largo del strike de la falla

Nsd = número de subfallas a lo largo del dip.

7. Ajustes de la Forma de Onda y Modelo de Deslizamiento

7.1 Programa VANGODSH

El programa VANGODSH se puede utilizar para ver los ajustes entre las formas de onda observadas y sintéticas. Utiliza llamadas de graficación basadas en CALCOMP y por lo tanto requiere configurar una biblioteca de gráficos apropiada o modificar el código para usar las herramientas de graficado disponibles para el usuario. Éste lee los archivos *juliea.dat*, *julieb.dat* y *lisaout.dat*, así como información acerca del modelo de falla, por ejemplo el número de subfallas y el número de ventanas de tiempo, que se proporcionan en una entrada interactiva.

La versión actual del programa produce una serie de archivos postscript que se pueden ver para examinar la calidad de los ajustes. La relación entre las amplitudes sintéticas y observadas (SOA, por sus siglas en inglés) se imprime a la derecha de cada par de registros. Si estas relaciones SOA no promedian alrededor de 1.0 para todas las estaciones, entonces el momento sísmico resultante y los deslizamientos en las subfallas están sobre o subestimados. Para identificar el momento y el deslizamiento adecuados se calcula un factor de escala de amplitud (ASF, por sus siglas en inglés) que ajusta numéricamente las amplitudes predichas en VANGODSH tomando el promedio de los inversos de las relaciones SOA originales. Las relaciones originales deben multiplicarse por este factor ASF para calcular las nuevas proporciones SOA que se distribuyen igualmente por encima y por debajo de 1.0. Este factor ASF se debe incorporar en el escalamiento utilizado por PLISA (abajo) para calcular el momento sísmico adecuado.

7.2 Programa PLISA

Los pesos del deslizamiento en cada subfalla en el archivo *lisaout.dat*, generados por LISA, se listan en el siguiente orden: pesos de deslizamiento para las subfallas de 1 a N para la ventana de tiempo 1, seguidos por pesos de deslizamiento para las subfallas de 1 a N para la ventana de tiempo 2, y así sucesivamente hasta que todas las ventanas de tiempo se envíen al archivo *lisaout.dat*. Estos pesos se convierten a deslizamiento real mediante el uso del programa PLISA, el cual también calcula el momento sísmico correspondiente (en dinas-cm). Para calcular el momento, PLISA requiere las rigideces de cizallamiento (en unidades de 10^{11} gm/cm-sec²) para las subfallas en la dirección del dip. Estas rigideces se pueden inferir de la estructura cortical de entrada, tomando el producto de la densidad de la capa y el cuadrado de la velocidad de la onda S. Para calcular el deslizamiento de las fallas PLISA requiere de un factor de escala

para la dislocación (DSF, por sus siglas en inglés), correspondiente a la dislocación (en centímetros) por unidad de peso para el momento de entrada inicial utilizado para generar los sintéticos de las subfallas. Este factor de escala DSF generalmente corresponde al producto del factor CSF calculado por CADLAC (Sección 5), y el factor ASF obtenido de examinar los ajustes de las formas de onda (ver sección 7.1). El deslizamiento total en centímetros de cada subfalla y el momento sísmico escalar total se imprimen en la pantalla.

PLISA igualmente genera archivos de la forma *contr**.dat*, donde ** es un número de dos dígitos, el cual va desde el 01 al número total de ventanas de tiempo utilizadas en la inversión. Por ejemplo, para tres ventanas de tiempo tendríamos los archivos *contr01.dat*, *contr02.dat* y *contr03.dat*. Éstos contienen los valores de deslizamiento para cada subfalla, con dos opciones posibles, la primera corresponde a los valores acumulados de deslizamiento sumados para ventanas de tiempo consecutivas; la segunda al deslizamiento de cada ventana de tiempo para todas las subfallas. La primera opción es más común y se utiliza de tal manera que el archivo de ventanas temporales final (v. gr., *contr03.dat* para tres ventanas de tiempo) contiene el deslizamiento total a través de la falla obtenida en la inversión. En la versión de PLISA incluida en esta guía, el código genera archivos ASCII que contienen tres columnas x, y, z, donde x e y indican la posición de la subfalla a lo largo y ancho de la falla y z corresponde a los códigos numéricos de la paleta de colores GMT (Wessel y Smith, 1998). Estos códigos se utilizan para trazar cuadros en escala de grises en una malla de fallas, cuyo grado de sombreado depende de la cantidad de deslizamiento. De igual forma se proporciona una opción al ejecutar PLISA para generar los valores de salida como un porcentaje del deslizamiento máximo (en el archivo *contr**.dat*) o relativo a un valor de entrada definido por el usuario.

7.3 Shell script PLTSLIP

Los valores dados en cualquiera de los archivos *contr**.dat* pueden ser graficados usando el shell script de UNIX *pltslip.csh*, el cual usa comandos GMT para generar una gráfica en escala de grises del deslizamiento en una falla rectangular. El shell script utiliza parámetros específicos de la falla utilizados en la inversión para configurar el graficado y entonces puede ser modificado cada vez para acomodar diferentes dimensiones de falla y espaciamientos de las subfallas. El shell script requiere una línea de comandos cuyos argumentos especifiquen cual archivo de *contr**.dat* será graficado. Así, el comando

```
csh pltslip.csh contr01.dat
```

genera una gráfica en escala de grises, en formato postscript, denominado *grdplt.ps*, que muestra los valores de deslizamiento de las subfallas contenidos en el archivo *contr01.dat*. Si se utiliza este shell script, se recomienda al usuario asegurarse de que cualquier cambio a los comandos se realice correctamente.

8. Caso de Prueba

Se incluye un caso de inversión de falla finita que documenta la inversión de ondas P teleseísmicas registradas en 38 estaciones para el terremoto del 9 de octubre de 1995, en Colima-Jalisco, México. Los registros de datos se han preparado previamente en el formato binario de TELMOD y se encuentran en el archivo *telPtp38.dat*. Igualmente se incluye un segundo archivo de datos denominado *telPtp38asc.dat*, el cual contiene estos mismos datos pero en formato ASCII. Este es útil cuando el archivo binario *telPtp38.dat* no es legible o es incompatible con el sistema de cómputo del usuario. En este caso, es necesario ejecutar el programa JULIEW_ASCII, en lugar de JULIEW, para leer y procesar el archivo de datos.

Este caso de prueba utiliza una falla rectangular de 200 km por 100 km, dividida en 200 subfallas de 10 km por 10 km cada una. El hipocentro se encuentra a una profundidad de 15 km y está situado a 50 km del borde izquierdo, y a 50 km de la parte superior de la falla. El strike de la falla y el dip son de 300° y 15°, respectivamente. La inversión se lleva a cabo para un rake fijo de 90°, y se utiliza una ventana única de tiempo asumiendo una velocidad de ruptura de 3 km/s. Se incluyen dos pruebas de inversión: una usa el código LISA sin restricciones lineales; la segunda usa el código LISASS que aplica un valor de suavizado generado automáticamente, ello para un suavizado espacial y minimización del momento.

9. Comentarios Finales

Esta Guía de Usuario representa el primer esfuerzo por distribuir los programas de modelado de falla finita para la inversión de ondas de volumen para telesismos, entre la comunidad de habla hispana. Como ya se mencionó, los programas de inversión y la versión original de esta guía en inglés se pueden obtener en el sitio GITHUB del USGS (<https://github.com/usgs/finite-fault>). La versión en español de esta guía y los programas también se pueden encontrar en la página del Bol-e (<http://www.geociencias.unam.mx/~bole/bole/page2/page33/page33.html>), del Centro de Geociencias de la UNAM. En un futuro elaboraremos un tutorial con el análisis de diferentes sismos, con descripciones más detalladas, para que el usuario pueda practicar y reproducir los resultados. Por lo pronto, deseamos que este material sea de utilidad y facilite su uso entre estudiantes interesados en el modelado cinemático de la forma de onda.

Agradecimientos

Se agradece la revisión crítica de Jonás D. De Basabe, cuyos comentarios enriquecieron este trabajo. También agradecemos a Jesús Silva Corona el diseño de la figura 1.

Referencias

- Dreger, D. S. (2003). 85.11 TDMT_INV: Time Domain Seismic Moment Tensor INVersion, In: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., and Kisslinger, C. (Eds.). International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Academic Press, Amsterdam, Part B, pp. 1627.
- Goldstein, P., D. Dodge, M. Firpo, and L. Minner (2003). SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, Invited contribution to The IASPEI International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (Editors), Academic Press, London.
- Gómez, J.M., B. Bukchin, R. Madariaga, E.A. Rogozhin, and B. Bogachkin (1997). Rupture process of the 19 August 1992 Susamyr, Kyrgyzstan, earthquake. *Journal of Seismology*, 1, 219-235.
- Gómez-González, J.M., C. Mendoza, A. Sladen, and M. Guzmán-Speziale (2010). Kinematic Source Analysis of the 2003 Tecmán, México, earthquake (Mw 7.6) using Teleseismic Body Waves. *Bol. Soc. Geol.*, 62, 249-262.
- Hansen, P. C. (1998). Rank-Deficient And Discrete Ill-Posed Problems, Numerical Aspects of Linear Inversion, SIAM Monographs on Mathematical Modeling and Computation, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 247.
- Hartzell, S. H. and T. H. Heaton (1983). Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1553-1583.
- Hartzell, S. H. and T. H. Heaton (1986). Rupture history of the 1984 Morgan Hill, California, earthquake from the inversion of strong motion records. *Bull. Seism. Soc. Am.* 76, 649-674.
- Hartzell, S. H. (1989). Comparison of Seismic Waveform Inversion Results for the Rupture History of a Finite Fault' Application to the 1986 North Palm Springs, California, Earthquake. *J. Geophys. Res.*, 94, 7515-7534.
- Hsieh, M-Ch., L. Zhao and Ma, K-F (2014). Efficient waveform inversion for average earthquake rupture in three-dimensional structures. *Geophys. J. Int.* 198, 1279–1292.
- Langston, C. A. and D. V. Helmberger (1975). A procedure for modeling shallow dislocation sources. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 42, 117-130.
- Lay, T. and T. C. Wallace (1995). Modern Global Seismology (International Geophysics Series). Academic Press, 521.
- Lawson, C. L. and R. J. Hanson (1995). Solving Least Squares Problems, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 337.
- Mendoza C. (1993). Coseismic slip of two large Mexican earthquakes from teleseismic body waveforms: Implications for asperity interaction in the Michoacán plate boundary segment. *J. Geophys. Res.* 98, 8197- 8210.

- Mendoza, C. (1994). Modelado cinemático de fuentes sísmicas en una falla finita: aplicaciones. *Física de la Tierra* 6, 141-156.
- Mendoza, C., S. Castro Torres, and J.M. Gómez-González (2011). Moment-Constrained Finite-Fault Analysis using Teleseismic P waves: Mexico Subduction Zone. *Bull. Seism. Soc. Am.* 101, 2675-2684.
- Mendoza, C., and S. H. Hartzell (1989). Slip distribution of the 19 September 1985 Michoacan, Mexico, earthquake: near-source and teleseismic constraints. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 79, 655-669.
- Mendoza, C. and S. Hartzell (1999). Fault-Slip Distribution of the 1995 Colima-Jalisco, Mexico, Earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 1338-1344.
- Mendoza, C. and S. Hartzell (2008). Finite-Fault Analysis of the 2004 Parkfield, California, Earthquake Using Pnl Waveforms. *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 1553-1583.
- Mendoza, C. and S. Hartzell (2013). Finite-fault source inversion using teleseismic P waves: Simple parameterization and rapid análisis. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 103, 834-844.
- Nábélek, J., 1984, Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves: Cambridge, Massachusetts, USA, Massachusetts Institue for Technology, , Ph.D. Thesis, 361 p.
- Stein, S. and M. Wyssession (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure*. Wiley-Blackwell.
- Utkucu, M., Pinar, A., and Alptekin, Ö. (2002). A detailed slip model for the 1995, October 1, Dinar, Turkey, earthquake (MS= 6.1) determined from inversion of teleseismic P and SH waveforms. *J. Geophys. Res.*, 151, 184-195.
- Wessel. P. and W.H.F. Smith (1998). New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 79, 579.
- Zahradnik, J., F. Gallović, E. Sokos, A. Serpetsidaki, and A. Tselentis (2008). Quick Fault-plane Identification by a Geometrical Method: Application to the Mw6.2 Leonidio Earthquake, 6 January 2008, Greece. *Seism. Res. Lett.* 79, 653-662.

Lista de acrónimos

ERI – Earthquake Research Institut (Japón)
NEIC – National Earthquake Information Center (USGS, USA)
NNLS - Non-Negative Least Squares
SAC - Seismic Analysis Code
SSN – Servicio Sismológico Nacional (México)
USGS – United States Geological Survey (USA)

Sitios Web

IRIS: <http://www.iris.washington.edu>
NEIC: <http://earthquake.usgs.gov/contactus/golden/neic.php>

Recibido: 31 de enero de 2017

Recibido corregido por el autor: 18 de mayo de 2017

Aceptación: 7 de junio de 2017

Criterios de clasificación espacial para discriminar datos que incrementan la incertidumbre en la respuesta de modelos determinísticos

^{*1}Díaz-Torres, J. J., ¹Hernández-Mena, L., ^{2,3}Murillo-Tovar, M. A., ⁴Suárez-Plascencia, C.,
y ⁴Aviña-Rodriguez, E.

¹Unidad de Tecnología Ambiental, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco

²Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Programa de Cátedras, Ciudad de México, México.

³Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México

⁴Departamento de Geografía y Ordenación Territorial, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.

*Autor de correspondencia: Díaz-Torres, J. J., Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco.

Av. Normalistas 800, C.P. 44270, Guadalajara, Jalisco, México. Teléfono: (+5233) 3345 5200, Ext. 1612, e-mail: jdiaz@ciatej.mx

Resumen

Un modelo de corte determinístico se tomó como ejemplo para evaluar la incertidumbre que genera su respuesta de salida. Este modelo calcula la radiación solar sobre la superficie de la Tierra: Solar Analyst. Se diseñó una propuesta metodológica para clasificar y seleccionar los datos de irradiación diaria media mensual del modelo que mejor explican las magnitudes observadas en una estación meteorológica (Colomos) instalada en la zona centro-noroeste del Área Metropolitana de Guadalajara. La clasificación estuvo basada en el análisis espacial definido por criterios físicos (geomorfológicos) y filtros estadísticos (estandarización y umbrales). Esta clasificación permitió segregar los resultados del modelo en dos grupos: 1) Los datos próximos al valor de irradiación diaria media mensual, los cuales explican la variabilidad de las observaciones de campo, y 2) Los datos que se alejan de esta condición. Los resultados indican que la respuesta Sf-36 explica con mayor aproximación las observaciones de Colomos. La irradiación diaria media mensual calculada fue de $6.55 \text{ kWh m}^{-2}\text{d}^{-1}$ en promedio, con una incertidumbre del 7.6%. Después de la reclasificación de esta respuesta, nuevos límites espaciales fueron establecidos. Se encontró que solo ~79% del área de estudio presenta condiciones topográfica y valores de irradiación diaria media mensual muy semejantes a los que predominan entorno la estación Colomos. La sustracción de los datos extremos de las distribuciones mensuales (~21%) produjo una dramática disminución en la amplitud total de los datos. Una nueva estimación sobre la incertidumbre media mensual del área efectivamente validada por Colomos indica que ésta se redujo a 1.7% respecto al valor medio mensual de irradiación. Esta metodología se propone como una efectiva herramienta de clasificación que ayuda a identificar los resultados de un modelo que mejor explican el comportamiento real de un fenómeno sobre el espacio, aún cuando los datos de validación están limitados a un pequeño número de sitios de monitoreo.

Palabras claves:

Análisis espacial, Criterios físicos, Filtro estadístico, Incertidumbre, Solar Analyst Model, Guadalajara.

I. Introducción

El Sol es la principal fuente de energía sobre la Tierra. Esto tiene importantes implicaciones sobre el medio natural y la salud de los seres vivos. Por ejemplo, la radiación solar puede desencadenar procesos bio-químicos en plantas, tales como la fotosíntesis, que interviene en la generación de compuestos ricos en energía, o la foto-morfogénesis que está estrechamente relacionada con las funciones reguladoras del crecimiento. Por otra parte, el intercambio de energía entre las plantas y el aire, se convierte en el calor que activa el metabolismo y los procesos de transpiración, produciendo un efecto de modulación térmica de microclimas (Adams, 2009; Jones, 2013). Además, la radiación puede producir el calentamiento del aire y del suelo, y evaporación o derretimiento de la nieve (Gates, 1980; Strahler, 2010). La radiación solar también es un factor clave en los estudios del clima y el estado del tiempo, ya que la intensidad y el tiempo de incidencia del flujo radiante pueden detonar diversos fenómenos físicos y químicos en la atmósfera (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000). Hay dos conceptos que debemos describir: 1) La irradiancia, que se define como la cantidad de flujo radiante por unidad de área y por unidad de tiempo (energía instantánea) (W m^{-2}); y 2) La irradiación, que corresponde a la energía solar por unidad de área acumulada durante un periodo de tiempo (kWh m^{-2}) (Hofierka y Šúri, 2002).

En las últimas décadas se han desarrollado una gran variedad de modelos para estimar la proporción de energía solar que alcanza la superficie terrestre (Hetrick et al., 1993; Miklánek, 1993; Kumar et al., 1997; McKenney et al., 1999; Wilson y Gallant, 2000; Hofierka y Šúri, 2002; Pons, 2002; Pons y Ninyerola, 2008). Estos modelos se han adaptado a plataformas computacionales, para mejorar la calidad de sus productos, así como para reducir la incertidumbre y el tiempo de procesamiento. Recientemente,

Ruiz-Arias et al. (2009) evaluaron la respuesta de varios de estos modelos, y demostraron que sus cálculos son bastante aceptables. El modelo Solar Analyst (SA) propuesto por Hetrick y et al. (1993) y Rich et al. (1994) es uno de ellos. Debido a la estructura y el funcionamiento del modelo SA, este se puede clasificar como un modelo de corte determinístico. Los modelos determinísticos resuelven el comportamiento regular de una variable por medio de ecuaciones compuestas por una función objetivo y variables con valores restringidos (Ríos-Insua et al., 2004). Debido a que estos modelos se sustentan en la respuesta de ecuaciones matemáticas condicionadas a ciertos límites, la validación de sus resultados y la determinación de su incertidumbre depende fundamentalmente de observaciones de campo. No obstante que el modelo SA presenta algunas limitaciones operacionales (por ejemplo, para evaluar el comportamiento aleatorio de la irradiación o la simulación de las propiedades anisotrópicas de la atmósfera), el modelo involucra un robusto sistema de ecuaciones y coeficientes que permite obtener resultados con una buena aproximación (Hetrick et al., 1993).

La validación de la irradiación mediante el modelo SA requiere de sistemas de monitoreo regionales; sin embargo, frecuentemente se cuenta con redes compuestas por un reducido número de estaciones meteorológicas. La insuficiencia de estaciones impone limitantes cuando la topografía tiene grandes contrastes. La ciudad de Guadalajara representa un excelente ejemplo ya que se encuentra sobre una planicie rodeada por un profundo cañón y estructuras volcánicas de gran relieve; además, la cobertura espacial de la red de monitoreo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) está restringida para evaluar la respuesta del modelo sobre estos tres tipos de topografías. Este caso ofrece la oportunidad para implementar técnicas de análisis espacial (p.e. Álgebra de

mapas, análisis de geometrías, reclasificaciones o descomposición de propiedades en capas) y estadístico, para identificar las áreas donde la respuesta del modelo SA ofrece una mayor certidumbre.

Este estudio propone un método sencillo para establecer nuevos límites espaciales, pero también para reducir la incertidumbre en la respuesta de dicho modelo. En nuestro caso, las propiedades geomorfológicas del terreno fueron consideradas como criterio de clasificación debido a que caracterizan al factor sobre el cual no se tiene un control (mediciones, estaciones) para validar la respuesta del modelo SA. Adicionalmente, las propiedades estadísticas de la irradiación estimada sobre la superficie de Guadalajara fueron evaluadas para seleccionar datos (superficies) que son conformes a las observaciones de campo.

1. Modelo Solar Analyst

El modelo SA es un sistema eficaz para el cálculo de la irradiación que ha sido probado en regiones tropicales y templadas, así como en zonas con alto relieve (Rich et al., 1992; Fu y Rich, 2000; Tovar-Pescador et al., 2006). Está diseñado para calcular la irradiación global que potencialmente alcanza la superficie de la Tierra bajo condiciones de cielo despejado. Está constituido por un algoritmo (*Hemispherical Viewshed Algorithm*) y tres componentes modulares (*viewshed*, *sunmap* y *skymap*), que en conjunto conforman una herramienta de análisis integrada en la estructura del software de ArcGIS.

El modelo SA hace un análisis segmentado sobre cualquier Modelo Digital de Elevación (MDE), integrando la irradiancia proveniente de todas las direcciones posibles para cada celda del MDE para un periodo determinado. También determina la Irradiación Global (IG) (Ecuación 1) basado en la suma de los dos componentes principales de la radiación solar: la Irradiación Directa Total (IDRT)

y la Irradiación Difusa Total (IDFT) (Ecuaciones 2 y 3); la irradiación reflejada por otras superficies (tercera componente) es discriminada por el modelo debido a que su estimación es bastante compleja y su contribución a la irradiación global es poco significativa (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995).

$$I_G = I_{DRT} + I_{DFT} \quad [Ec. 1]$$

$$I_{DRT} = \sum I_{DR(\theta, \psi)} \quad [Ec. 2]$$

$$I_{DFT} = \sum I_{DF(\theta, \psi)} \quad [Ec. 3]$$

Donde IDR y IDF representan la radiación instantánea directa y difusa, respectivamente, para una posición específica del Sol, definida por el ángulo cenital (θ) y el ángulo azimutal (ψ).

El modelo SA considera tres tipos de factores atenuantes para el análisis de la irradiación solar (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995). Los factores astronómicos consideran las relaciones entre el Sol y la Tierra, tales como: la distancia entre el Sol y la Tierra, el ángulo de incidencia de los rayos solares, la trayectoria de eclíptica solar, o la constante solar (I_{sc}). Por otra parte, los aerosoles y el vapor de agua que se encuentran en la atmósfera son causantes de la disminución de una proporción de la energía incidente, por tanto, la transmisividad y la difusión de la atmósfera representan a los factores atmosféricos. Por lo que toca a los factores topográficos, las superficies con relieves altos producen una disminución en la cantidad de energía que incide sobre áreas contiguas o sea, un efecto de sombra topográfica.

Los factores astronómicos y topográficos producen grandes variaciones espaciales de la irradiación durante el ciclo anual, mientras que los factores atmosféricos lo hacen a corto plazo (horas o días). Los factores astronómicos y topográficos están completamente controlados dentro del proceso de modelado (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995; Hofierka y Šúri,

2002), mientras que los factores atmosféricos, normalmente son determinados bajo el supuesto de una condición predominante a través del tiempo (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995; Fu y Rich, 1999).

2. Área de estudio

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) se localiza en el occidente de México ($20^{\circ}39'55''$ N, $103^{\circ}20'56''$ O). Está asentada sobre una planicie rodeada al sur y oeste por estructuras volcánicas y limitada por un profundo cañón en sus extremo norte y este (Figura 1). Los datos del MDE generados por el programa denominado *Misión de Topografía de Radar* (Shuttle Radar Topography Mission) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration, NASA) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) fueron utilizados para describir los rasgos topográficos y como base para caracterizar la irradiación sobre nuestra área de estudio.

En torno al AMG predominan superficies de bajo relieve con un rango de elevación entre 1,500 y 1,675 msnm (1,585 msnm en promedio). Estas áreas representan amplios valles (Atemajac, Tesistán y Toluquilla) levemente erosionados por sistemas de drenaje poco desarrollados. Por otra parte, las superficies con alto relieve están constituidas por las estructuras del Complejo Volcánico de La Primavera (CVLP) y la Sierra Volcánica del Sur de Guadalajara (SVSG), éstas presentan elevaciones de hasta 2,260 msnm; mientras que la parte más profunda del Cañón de Río Santiago (CRS) en la sección colindante al área de estudio tiene elevaciones de ~ 900 msnm. Estos prominentes rasgos topográficos producen notables contrastes de relieve que se manifiestan en la inclinación de la pendiente. Las superficies con pendiente alta reducen la cantidad de energía solar sobre superficies adyacentes (Hetrick et al., 1993; Fu y Rich, 1999).

El clima del AMG es cálido y húmedo, el periodo de lluvias se presenta durante el

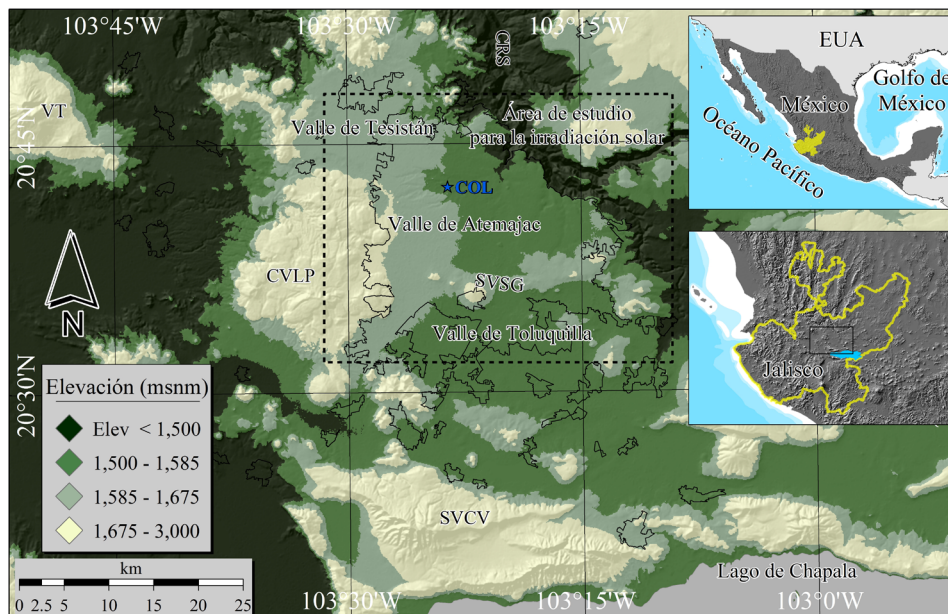


Figura 1. Mapa topográfico del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). La línea punteada muestra la superficie del área de estudio donde se realizó análisis de la radiación solar. La estrella azul indica la posición de la estación Colomos (COL). Otras abreviaturas: Sierra Volcánica Cerro Viejo (SVCV); Complejo Volcánico La Primavera (CVLP); Cañón del Río Santiago (CRS); Volcán de Tequila (VT); Sierra Volcánica del Sur de Guadalajara (SVSG). Fuente del modelo digital de elevaciones: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Modificado de Díaz-Torres et al. (2017).

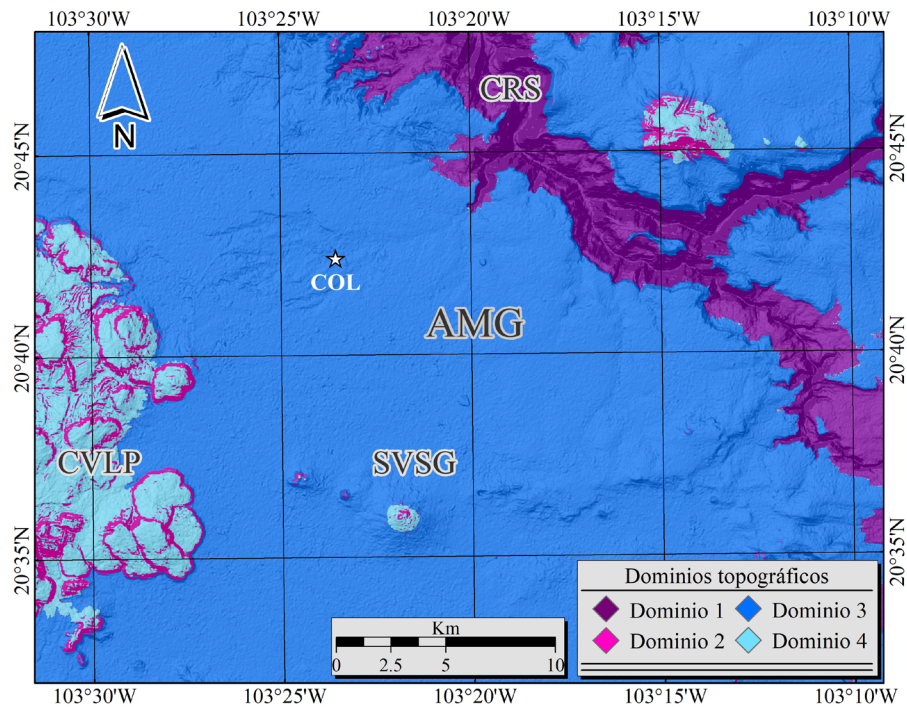


Figura 2. Mapa con la clasificación de dominios topográficos alrededor del Área Metropolitana de Guadalajara (Los detalles se describen en la sección III.2).

periodo verano-otoño (Mayo-Octubre) (García, 1988). La temporada de lluvias se caracteriza por intensas precipitaciones, fuerte actividad eléctrica y presencia de gruesas capas de nubes. Estas condiciones predominan durante períodos prolongados (horas o días) separados por periodos de cielo despejado. El resto del año, una condición de estabilidad atmosférica favorece días con cielo despejado (Tereshchenko y Filonov, 1997; Davydova y Skiba, 1999).

II. METODOLOGÍA

Se diseñó una propuesta metodológica para reducir la incertidumbre de modelos determinísticos, cuando se dispone de un número limitado de sitios de monitoreo para su validación. Para el análisis de irradiación en el AMG se consideró un ciclo anual. El modelo SA se puso a prueba. Varias corridas se llevaron a cabo para identificar la mejor respuestas de salida. La determinación de los parámetros atmosféricos del modelo fue fijada en base a las observaciones

de una estación meteorológica. Los resultados de este modelo y las observaciones de campo sirvieron para llevar a cabo un análisis espacial basado en criterios geomorfológicos y filtrado estadístico. Fueron establecidos nuevos límites espaciales y en las magnitudes de irradiación para identificar las superficies donde la respuesta del modelo ofrece mayor certidumbre.

1. Datos

Los datos de elevación de la misión SRTM están almacenados en archivos con formato raster, los cuales representan arreglos matriciales geo-referenciados y compuestos por celdas con resolución espacial de 1 segundo de arco (~28 m por lado). Debido a que esta información es fundamental para el pre-procesamiento y cálculo de la irradiación, estos datos fueron usados para calcular la irradiación solar en nuestra área de estudio. Una matriz de 1,404 columnas por 1,125 filas (1,579,500 celdas) fue sometida a una revisión cuidadosa para verificar

la calidad y conformidad de los datos, así como para identificar y eliminar posibles artefactos. La estadística descriptiva de esta matriz demostró que no hubo celdas vacías, valores negativos, ni valores iguales a cero.

Por otra parte, los registros de una estación meteorológica (Colomos) fueron utilizados para calibrar los parámetros atmosféricos del modelo y para validar la respuesta de salida más adecuada. Colomos fue la única estación instalada dentro del área de estudio que sistemática y continuamente midió la irradiancia solar (W m^{-2}), registrando datos promedio cada 10 minutos. A partir de estos datos se estimó la irradiación diaria media mensual en términos de $\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$, basados en el método de integración diaria de la irradiación (Guevara-Vázquez, 2003).

2. Supuestos, condiciones y parámetros del modelo

La irradiación diaria media mensual se estimó durante un ciclo anual; el modelo SA fue probado en el AMG asumiendo que las condiciones de cielo despejado prevalecen en todo momento. Durante las temporadas de estiaje no se tuvo ningún problema para establecer correlaciones entre los datos modelados (SA) y los observados (Colomos), pero durante la temporada de lluvias la nubosidad produjo grandes desviaciones entre los datos modelados y los observados.

Debido a que el efecto atenuante de las nubes difícilmente se ha podido evaluar como parte del análisis de la irradiación solar (Hofierka y Sürri, 2002), otra escala temporal de análisis se implementó para corroborar las altas cantidades de energía que pueden llegar a la superficie durante algunos lapsos de cielo despejado durante la temporada de lluvias. El análisis de la irradiación diaria observada en Colomos se llevó a cabo en días con cielo despejado, por lo que se identificaron los días de mayor irradiación por mes. Adicionalmente, se identificaron varios

días por mes durante los cuales predominó una condición de cielo despejado, alternada con lapsos de cielo nublado. Tanto los valores máximos como los promedios de irradiación diaria se usaron para validar la respuesta del modelo durante la temporada de lluvias.

El modelo SA utiliza los coeficientes de difusión (τ_d) y de transmisividad (τ) atmosférica para reproducir la capacidad atenuante de la atmósfera (Hetrick et al., 1993; Dubayah y Rich, 1995). La combinación de estos coeficientes ofrece una aproximación respecto al efecto atenuante de la atmósfera, cuyas características varían en función de la altitud y la posición latitudinal del área de interés. Siete respuestas de salida del modelo SA se determinaron a partir de la combinación de estos coeficientes; los valores propuestos por Fu y Rich (1999) (0.3 para el coeficiente de difusión; y 0.5 para el coeficiente de transmisividad) fueron tomados como referencia para simular condiciones atenuantes que produce el cielo despejado.

3. Criterios de clasificación

El análisis espacial se llevó a cabo después de haber identificado la mejor respuesta del modelo. El procedimiento se dividió en dos pasos: primero se estableció una clasificación del terreno basada en criterios geomorfológicos. Después se hizo una clasificación basada en criterios estadísticos de los datos de irradiación (amplitud, frecuencia y distribución). El segundo paso permitió remover datos remanentes (valores extremos de irradiación) que no se pudieron suprimir mediante los criterios geomorfológicos.

3.1 Criterios Geomorfológicos

Las propiedades topográficas de una superficie intervienen directamente en la disponibilidad de energía solar a la que puede estar expuesta (Hetrick et al., 1993), por lo tanto, el relieve es factor fundamental en el cálculo de la

irradiación. El modelo SA ha sido probado con éxito bajo distintas condiciones topográficas, y evaluada con un gran número de observaciones de campo sobre distintas características de relieve (Rich et al., 1994; Tovar-Pescador et al., 2006). En este sentido, la respuesta del modelo SA estará condicionada a la densidad y distribución de los sitios de validación. Debido a que dentro del área de estudio solo se cuenta con una estación de monitoreo, la validación del modelo se reduce a aquellas superficies con características topográficas semejantes a las que predominan entorno al sitio de monitoreo. Este factor condicionante indujo la caracterización del relieve alrededor de la estación Colomos.

Los datos de programa SRTM fueron usados para caracterizar la topografía del AMG. El análisis geomorfológico basado en la pendiente del terreno permitió establecer una clasificación del relieve. Las características del relieve en Colomos fueron establecidas como referencia para identificar aquellas superficies donde la respuesta del modelo puede ser validada con mayor certidumbre, pero también para remover las superficies que no cumplen con este criterio. La remoción de superficies con alto relieve también estuvo apoyada en un criterio de localización de las geoformas. Debido a que estas superficies producen un efecto de sombra topográfica (reducción de la irradiación) sobre áreas adyacentes, fue necesario preservar algunas de éstas, con el objeto de evitar desviaciones entre el cálculo de la irradiación modelada y la irradiación que realmente podría llegar o ser obstruida sobre estas superficies colindantes.

3.2 Criterios de filtrado estadístico

El Teorema del Límite Central evaluado a través de la Función de Densidad ($f(x)$) de una Variable Aleatoria Continua (x) (Ecuación 4) supone que las observaciones de una variable tienen una distribución normal. Este patrón proporciona un punto de referencia para

explicar el comportamiento de un vasto número de fenómenos (Fischer, 2011). Comúnmente, la translación del valor medio (μ) en una distribución de datos y el re-escalamiento de su desviación estándar (σ) ayuda a normalizar la variable aleatoria (z) de esta función (Yamane, 1973) (Ecuación 5).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}; \quad N(\mu, \sigma) \quad [Ec. 4]$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}; \quad N(0,1) \quad [Ec. 5]$$

Basados en estos supuestos evaluamos el histograma de cada arreglo matricial mensual del Sf-36. Los datos de irradiación fueron estandarizados para definir su Distribución Normal Unitaria (DNU) (Ecuación 6). Cada celda fue transformada tomando en cuenta el componente exponencial (z) de la función en la ecuación 5. Esta transformación estableció límites normalizados que facilitaron el análisis y la relación entre los diferentes conjuntos de datos (Yamane, 1973).

$$z = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad [Ec. 6]$$

En esta ecuación, el factor z corresponde al valor estandarizado, mientras que x_i representa el valor original de la irradiación de cualquier celda. El software ER Mapper fue implementado para llevar a cabo: 1) La estandarización sobre la respuesta del modelo SA, 2) La definición del umbral de estandarización, así como 3) La clasificación y sustracción de los valores de radiación que estuvieron fuera del umbral establecido. Después de todo, sólo los valores estandarizados de irradiación diaria cercanos a la media mensual fueron preservados, mientras que los restantes fueron suprimidos. La reorganización de la ecuación 6, permitió

transformar los valores normalizados de nuevo a los valores originales de irradiación.

3.3 Análisis estadísticos de histogramas

Para conocer los efectos de reclasificación producidos por los criterios de análisis espacial, se implementó una evaluación sobre las propiedades estadísticas de irradiación media mensual. Una primera descripción estadística fue tomada como referencia a partir de los datos de origen (en toda el área). Una segunda descripción se llevó a cabo posterior al análisis espacial para establecer un análisis de contraste. Parámetros estadísticos tales como las medidas de tendencia central permitieron identificar grandes diferencias. El análisis también estuvo apoyado en los parámetros de Fisher: Coeficientes de asimetría (γ_1) y curtosis (γ_2) (Ecuaciones 7 y 8, respectivamente).

$$\gamma_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3}{(n-1)(n-2)\sigma^3} \quad [Ec. 7]$$

$$\gamma_2 = \frac{n(n+1) \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4}{(n-1)(n-2)(n-3)\sigma^4} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad [Ec. 8]$$

Una evaluación sobre los efectos de sustracción de datos de irradiación correspondiente a superficies no validadas se llevó a cabo mediante estos dos últimos coeficientes. Una razón de cambio en los valores de estos parámetros se estimó para determinar el grado de mejora en la distribución de los histogramas mensuales que se produjo a causa de la sustracción de los datos no validados (Ecuación 9).

$$x = \left[1 - \left(\frac{Sf36}{Sf36(SpA)} \right) \right] * 100 \quad [Ec. 9]$$

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Selección de la respuesta del modelo

Las observaciones de la estación Colomos se utilizaron como referencia para elegir la respuesta del modelo SA. La irradiación diaria media mensual observada validó las respuesta del modelo durante las temporadas de estiaje, mientras que las observaciones de irradiación media diaria y particularmente las máxima diaria permitieron validar al modelo durante la temporada de lluvia (Tabla 1).

Un Análisis de Varianza sobre la irradiación estimada por este modelo indicó que cualquier respuesta explica cerca del 96% de la variabilidad en la irradiación observada en Colomos, con un nivel de confianza igual a 95% ($P < 0.001$). Sin embargo, la definición de clusters, la comparación múltiple de muestras y el análisis de dispersión de los datos, permitieron identificar que las magnitudes de irradiación obtenidas mediante la respuesta Sf-36 ($\tau_d = 0.3$ y $\tau = 0.6$) son las que mejor corresponden con las observaciones de campo (detalles en Díaz-Torres et al., 2017).

El análisis de Sf-36 indica que la irradiación diaria media anual estimada bajo condiciones de cielo despejado sobre el AMG es de $6.55 \pm 0.46 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con una incertidumbre del 7.6%. Un notable contraste temporal de irradiación se observa a través del ciclo anual. Durante julio, la irradiación diaria promedio mensual fue calculada en $8.22 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, mientras que en diciembre se estimó un 52.7% de esta irradiación. A pesar de la presencia de gruesas capas de nubes o lluvia durante la temporada de lluvias, los registros de Colomos confirman que durante días despejados de esta temporada, la irradiación es mayor que en cualquier época del año (Tabla 1).

La evaluación del modelo SA y su comparación con otros modelos ha demostrado que su respuesta es bastante aceptable. Según (Ruiz-Arias et al., 2009), el modelo aplicado a su

Tabla 1. Estadística de la irradiación media calculada y la observada en el área de estudio ($\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

Mes	Min	Max	Media	Mediana	Moda	Desv. Est.	Estación Colomos		
							Promedio mensual	Promedio diario	Máximo diario
Enero	0.386	6.204	4.621	4.698	4.717	0.513	4.775	4.497	
Febrero	0.430	6.785	5.491	5.568	5.599	0.504	5.897	6.134	
Marzo	0.680	7.575	6.700	6.804	6.819	0.459	7.030	7.206	
Abril	1.084	8.132	7.547	7.651	7.676	0.404	7.456	7.714	
Mayo	2.450	8.741	8.085	8.179	8.216	0.423	6.620	7.048	8.100
Junio	2.056	8.804	8.090	8.200	8.233	0.430	6.270	6.664	7.910
Julio	2.291	8.989	8.224	8.340	8.377	0.446	6.348	6.503	8.182
Agosto	1.472	8.299	7.747	7.856	7.882	0.401	6.198	6.498	8.078
Septiembre	0.854	8.115	7.321	7.414	7.469	0.465	5.008	5.224	5.611
Octubre	0.466	6.783	5.642	5.722	5.753	0.480	5.427	5.264	
Noviembre	0.405	6.402	4.875	4.954	4.997	0.523	4.349	4.132	4.869
Diciembre	0.369	5.993	4.334	4.400	4.434	0.513	4.248	4.031	

Las lluvias durante Septiembre y Noviembre presentaron condiciones atípicas que redujeron la magnitud de la irradiación calculada por Sf-36. Noviembre se pudo estimar a partir de la irradiación máxima diaria observada en Colomos, mientras que septiembre quedó indeterminado.

Valores en negritas: Datos para validar el valor medio mensual de Sf-36.

Temporada de lluvias en el AMG (sombreado).

caso de estudio correspondió con 92% de las observaciones de campo, lo que indica que los resultados de este modelo representan una buena aproximación de la irradiación que normalmente llegaría a la superficie. Sin embargo, una validación fue implementada tomando en cuenta las diferentes condiciones topográficas en el área de estudio. Debido a que se carece de suficientes sitios de muestreo para validar la irradiación en superficies con diferente grados de inclinación y localizadas sobre distintas unidades geomorfológicas, un análisis espacial basado en criterios geomorfológicos y estadísticos se utilizó para identificar y remover del análisis las áreas que no pudieron ser validadas bajo dichos criterios.

2. Análisis espacial

La clasificación del relieve mediante los criterios geomorfológicos permitió la definición de cuatro dominios topográficos (Figura 2) dentro del área

de estudio: 1) Relieve con abruptas pendientes $>15^\circ$ dentro del CRS, 2) Flancos de estructuras volcánicas con pendiente $>15^\circ$, 3) Planicies onduladas con elevaciones de 1500 a 1675 msnm y pendientes $<15^\circ$, y 4) Superficies semiplanas con pendientes $<15^\circ$ localizadas en la parte altas de varias estructuras volcánicas. La estación Colomos está ubicada sobre una superficie correspondiente al dominio 3. Las características morfológicas de este dominio predominan en el 75% del área de estudio, el resto corresponde a superficies donde se carece de observaciones que validen la respuesta del modelo SA.

Esta clasificación geomorfológica indica que la superficie acumulada entre los dominios 1 y 2 representan $\sim 11\%$ del total del área de estudio. La implementación de los criterios geomorfológicos ayudó a identificar y remover $\sim 8.3\%$ de la superficie total del área de estudio, correspondientes al dominio 1 (Figura 3). Para fines prácticos la superficie restante del modelo

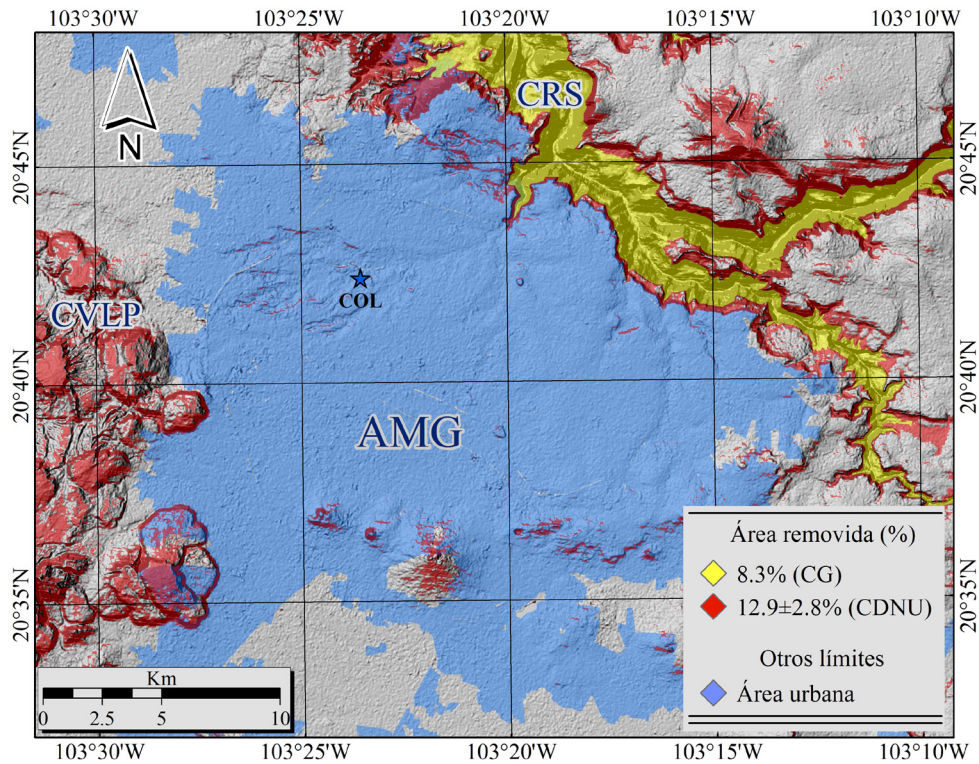


Figura 3. . Mapa con la delimitación de las superficies suprimidas para el análisis de la incertidumbre. Mediante los dos criterios establecidos en este estudio se pudieron remover las superficies que producían grandes incertidumbres en la irradiación diaria media mensual. Sobre el área total se estimó la incertidumbre de Sf-36; el área total menos la superficies en amarillo fueron la base para estimar la incertidumbre de Sf-36(CG); mientras que el área total menos las superficies en rojo permitieron estimar la incertidumbre de Sf-36(CDNU).

SA (91.7%) fue renombrada como Sf-36(CG), y la incertidumbre media mensual para esta superficie se estimó en 4.1%. No obstante estas mejoras, la respuesta Sf-36(CG) conservó un gran número de celdas, entre las cuales predominan valores irradiación con baja frecuencia. Por lo tanto, los criterios de filtrado estadístico basados en la normalización de los datos fueron elegidos para refinar la selección de aquellos valores de irradiación similares a las observaciones de la estación Colomos.

Comúnmente, el 95% de las observaciones de una distribución normal se concentran dentro de $\pm 2\sigma$ alrededor de μ . En nuestro caso, se encontró que los valores de irradiación de la respuesta Sf-36(CG) fueron semejantes a los valores de irradiación diaria media observada en Colomos estuvieron distribuidos en un intervalo menor

que $\pm 2\sigma$ respecto al valor promedio de cada matriz. Por lo tanto, el umbral se redujo a $\pm 1\sigma$ para identificar los valores de irradiación muy cerca a la media. Los valores de la irradiación diaria media mensual de la respuesta Sf-36(CG) fueron transformados mediante la ecuación 6 para establecer un umbral estandarizado. La matriz de correlación de cada superficie (mensual) de irradiación indica que todas las superficies cumplen con los supuestos de la normalización ($\mu=0$, $\sigma=1$) (Tabla 2). Mediante esta delimitación se pudo remover un $12.9\pm 2.8\%$ de la superficie contabilizada en la respuesta Sf-36(CG) (Figura 3). Estos corresponden con valores de baja frecuencia que produjeron grandes incertidumbre sobre la respuesta Sf-36. La superficie computable que se conservó después de este procedimiento se renombró como Sf-36(CDNU).

Tabla 2. Límites estandarizados de los datos de irradiación y parámetros de normalización de las matrices.

Mes	z(Mínimo)	z (Máximo)	m	s
Enero	-11.6	4.6	0.0	1.0
Febrero	-15.2	4.1	0.0	1.0
Marzo	-18.9	3.4	0.0	1.0
Abril	-19.7	2.8	0.0	1.0
Mayo	-15.9	3.3	0.0	1.0
Junio	-16.1	3.2	0.0	1.0
Julio	-15.2	3.4	0.0	1.0
Agosto	-18.3	2.7	0.0	1.0
Septiembre	-19.3	3.3	0.0	1.0
Octubre	-16.5	3.9	0.0	1.0
Noviembre	-12.2	4.3	0.0	1.0
Diciembre	-10.6	4.7	0.0	1.0
z=Valor de la variable aleatoria.				

La aplicación de criterios geomorfológicos y el filtrado estadístico mostró que $78.7 \pm 2.8\%$ del área de estudio presenta valores de irradiación diaria media mensual y características topográficas similares a las que predominan en la zona de la estación Colomos. A este porcentaje de área se le denominó Sf-36(SpA) y la incertidumbre media mensual se estimó en 1.7%.

3. Evaluación estadística

El análisis de histogramas de los valores de irradiación diaria media mensual de la respuesta Sf-36 mostró que la amplitud total (Máximo-Mínimo) fue muy grande en todos los meses del año (Tabla 1). Sin embargo, aproximadamente 80% de los datos más frecuentes se concentraron alrededor del valor medio y dentro de el umbral de $\pm 1\sigma$. También se encontró que el valor de la mediana y la moda están muy cerca de la media, las diferencias entre estos parámetros fueron pequeñas: 1.9% en promedio, es decir del orden de $0.12 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Por otra

parte, el análisis de la distribución de los datos mediante los coeficientes de asimetría y curtosis (Ecuaciones 7 y 8) confirmó que la gran cantidad de los datos cercanos al valor medio produjo una distribución leptocúrtica en todos los casos. Estos coeficientes también indican que un 20% de los datos representan valores de irradiación poco frecuentes, principalmente valores de irradiación diaria media mensual bajos. Esta distribución produjo una distribución asimétrica negativa en los histogramas.

Esta pequeña proporción de valores poco frecuentes causó un alto contraste en la dispersión de los datos de Sf-36, lo que dio como resultado incertidumbres de $0.43 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (5.3%) en el verano y $0.51 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (10.7%) durante el invierno (Tabla 1). La superficie con poco relieve dentro del AMG está limitada abruptamente por barrancos, cañones y montañas; por lo tanto, fue razonable encontrar patrones de distribuciones irregular (no normal) en la irradiación estimada por Sf-36.

Tabla 3. Evaluación de los histogramas de irradiación mediante los coeficientes de Fisher.

(Sección A) Diferencias entre Sf-36 y Sf-36(SpA)

Parámetro	Respuesta	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
γ_1	Sf-36	-2.7	-3.1	-3.4	-3.2	-3.1	-3.1	-3.0	-3.2	-3.3	-3.2	-2.8	-2.6
	Sf-36(SpA)	-0.4	-0.4	-0.6	-0.7	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7	-0.7	-0.5	-0.5	-0.4
γ_2	Sf-36	11.9	13.2	13.4	10.9	9.7	10.5	9.6	10.2	12.6	13.5	12.0	11.6
	Sf-36(SpA)	0.6	0.6	0.6	0.2	-0.3	-0.3	-0.4	0.1	0.4	0.7	0.6	0.6

(Sección B) Ajuste del histograma posterior el análisis espacial (%)

Parámetro	Promedio anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
γ_1	83.0	85.9	87.4	81.3	78.2	83.7	87.6	84.1	78.8	77.6	83.6	83.5	84.3
γ_2	96.2	94.6	95.4	95.6	98.2	96.7	97.3	96.0	99.2	96.8	94.7	94.8	94.9

Los valores porcentuales de la sección B corresponden a la razón de cambio observada en los histogramas como resultado de la implementación del análisis espacial. La estimación de estos valores se llevó a cabo mediante la ecuación 9.

El mismo análisis estadístico se llevó a cabo para Sf-36(SpA). Sus resultados indican que la sustracción de los valores de irradiación poco frecuentes que se encuentran fuera del rango $\pm 1\sigma$, causó que el coeficiente de asimetría disminuyera hasta llegar a una distribución casi simétrica ($\gamma_1 \approx 0.0$) con una forma platicúrtica ($\gamma_2 < 3.0$) (Tabla 3). Estos coeficientes indican que las mejoras obtenidas a partir del análisis espacial ayudaron a suprimir el ruido causado por este tipo de datos poco frecuentes.

la cual se redujo a $0.47 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ((Sf-36) SpA) después del análisis realizado. No obstante esta importante reducción en la amplitud de los datos, sólo un 21% de los datos totales fueron removidos, preservando con esto los mismos valores de referencia (μ) (Figura 4-B). Finalmente después del análisis espacial, la irradiación diaria media anual que potencialmente llega a la superficie del AMG se estimó en $\sim 6.65 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con una incertidumbre de 1.7% (Tabla 4, Figura 5).

4. Implicaciones metodológicas

La remoción de los datos de irradiación poco frecuentes permitió recalcular la dispersión de los datos de irradiación en superficies efectivamente validadas mediante los datos de Colomos. La delimitación espacial produjo una gran reducción en la amplitud total de los valores de irradiación (Figura 4-A). Inicialmente los datos de irradiación diaria media mensual tenían una amplitud total de $\sim 6.49 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Sf-36) en promedio para los 12 meses del año,

IV. CONCLUSIONES

Con el objetivo de clasificar y seleccionar los mejores resultados de un modo determinístico fué implementada una sencilla propuesta metodológica. El análisis espacial sustentado en criterios físicos y estadísticos fue fundamental para agrupar y segregar datos de irradiación solar generados por el modelo Solar Analyst. Las observaciones de la única estación meteorológica (Colomos) sobre el Área Metropolitana de Guadalajara se utilizaron para validar la mejor

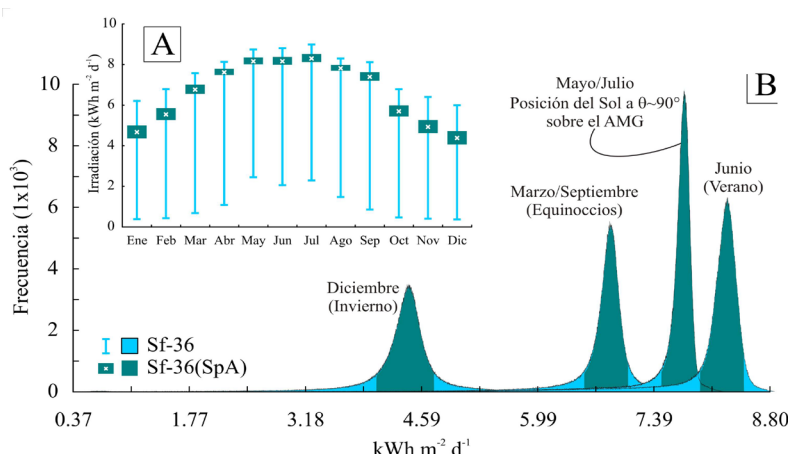


Figura 4. A) Amplitud total de los datos de irradiación diaria media mensual, obtenidos a partir del modelo SA previo (Sf-36) y posterior al análisis espacial (Sf-36(SpA)). B) Histogramas de frecuencia de irradiación diaria media mensual, como ejemplo se tomaron los meses en los que se presenta fechas importantes relacionadas con los cambios estacionales en el AMG. Estos exponen la amplitud de los datos de la respuesta de modelo SA, Sf-36(SpA) corresponde al 79% del total de los datos considerados en Sf-36. La cruz blanca en la figura A corresponde al valor promedio estimado en la matriz mensual, muy semejante al valor de irradiación diaria media mensual observado en Colomos.

Tabla 4. Análisis comparativo de las incertidumbres del modelo antes y después del análisis espacial.

Mes	Media ($\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Desviación estándar ($\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$)			Desviación estándar inicial (%)	Desviación estándar final (%)
	Sf-36	Sf-36	Sf-36 (CG)	Sf-36 (CDNU)	Sf-36	Sf-36(SpA)
Enero	4.621	0.513	0.324	0.141	11.09	3.04
Febrero	5.491	0.504	0.297	0.129	9.18	2.35
Marzo	6.700	0.459	0.227	0.096	6.86	1.44
Abril	7.547	0.404	0.154	0.060	5.35	0.79
Mayo	8.085	0.423	0.172	0.072	5.23	0.88
Junio	8.090	0.430	0.192	0.083	5.32	1.02
Julio	8.224	0.446	0.196	0.087	5.42	1.06
Agosto	7.747	0.401	0.147	0.056	5.18	0.72
Septiembre	7.321	0.465	0.212	0.081	6.35	1.10
Octubre	5.642	0.480	0.273	0.118	8.51	2.09
Noviembre	4.875	0.523	0.326	0.143	10.72	2.92
Diciembre	4.334	0.513	0.330	0.145	11.83	3.34
Promedio	6.556	0.463	0.238	0.101	7.59	1.73

La desviación estándar expresada en porcentaje está referida al valor medio de Sf-36.

Sf-36(CG): Datos de la respuesta después de aplicar los criterios geomorfológicos.

Sf-36(CDNU): Datos de la respuesta después de aplicar los criterios de estandarización.

Sf-36(SpA): Datos de la respuesta después de aplicar el análisis espacial (CG+CDNU)

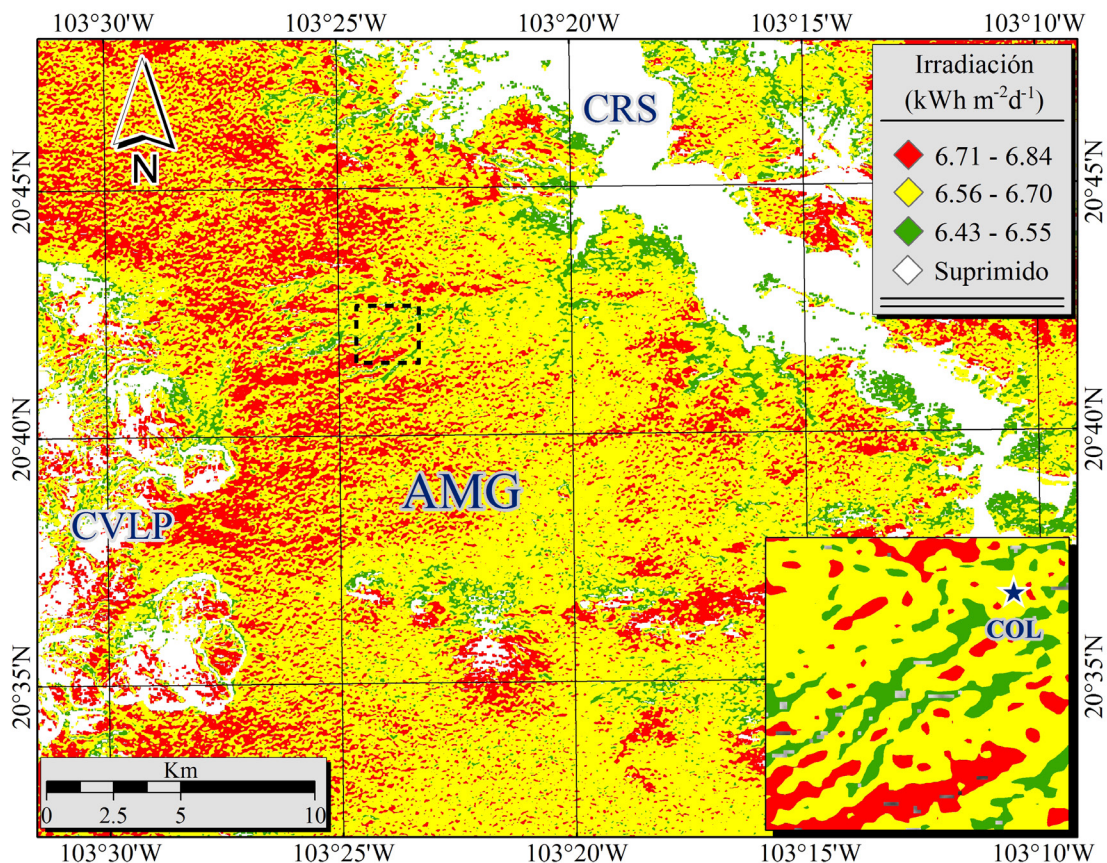


Figura 5. Mapa de la irradiación diaria media anual que potencialmente puede llegar a la superficie estimada con la respuesta (Sf-36(SpA)).

respuesta del modelo: Sf-36. Las observaciones de Colomos también sirvieron de referencia para elegir los datos del modelo que mejor explicaron la irradiación real. Esta metodología ayudó a suprimir superficies del área de estudio que no tenían un soporte de validación (observaciones de campo). El área efectiva del modelo se redujo a superficies con características topográficas semejantes a las que hay en torno al sitio de la estación; consecuentemente, la incertidumbre calculada sobre dicha superficie también fue menor y más consistente con los datos de campo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. Olga Sarychikhina y al revisor anónimo por sus valiosas observaciones que contribuyeron a mejorar el contenido de este documento. También agradecemos a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y al Servicio

Meteorológico Nacional (SMN) en México por la disposición de los datos meteorológicos, así como el Servicio Geológico de los Estados Unidos de America (USGS) por los datos del programa Shuttle Radar Topography Mission. Este trabajo fue financiado por el Fondo de Ciencia Básica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología en México (Clave de registro: CB-2012/183444).

Referencias

- Adams, J., 2009. Vegetation-climate interaction: How plants make the global environment. Springer Science & Business Media, 263 p.
- Davydova, B, V., Skiba, Y. N., 1999. Climate of Guadalajara City (México), its variation and change within latest 120 Years. World Resource Review, 11(2), 258-270.

- Dubayah, R., Rich, P. M., 1995. Topographic Solar Analysts for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 405-419.
- Díaz-Torres, J. J., Hernández-Mena, L., Murillo-Tovar, M. A., León-Becerril, E., López-López, A., Suárez-Plascencia, C., Aviña-Rodriguez, E., Barradas-Gimate, A., Ojeda-Castillo, V., 2017. Assessment of the modulation effect of rainfall on the solar radiation availability at the earth's surface. *Meteorological Applications*, 24(2):180-190.
- Finlayson-Pitts, B. J., Pitts, J. N., 2000. *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications*. Academic press. 969 p.
- Fischer, H., 2011. *A history of the central limit theorem: From classical to modern probability theory*. Springer Science & Business Media. 402 p.
- Fu, P., Rich, P. M., 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In *Proceedings of the 19th annual ESRI user conference* (pp. 1-33). San Diego, USA.
- Fu, P., Rich, P. M., 2000. A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*. 1-357-364
- García, E., 1988. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México: México.
- Gates, D. M., 1980. *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, 611 p.
- Guevara-Vázquez, S., 2003. *Estimación de la radiación solar*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente/Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Lima, Peru.
- Hetrick, W. A., Rich, P. M., Barnes, F. J., Weiss, S. B., 1993. GIS-based solar radiation flux models. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, 3. Photogrammetry and Modeling. pp. 132-143.
- Hofierka, J., Šúri, M., 2002. The Solar Analyst for Open source GIS: implementation and applications. In *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference*, pp. 1-19.
- Jones, H. G., 2013. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge university press., 423 p.
- Kumar, L., Skidmore, A. K., Knowles, E., 1997. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), 475-497.
- Mckenney, D. W., Mackey, B. G., Zavitz, B. L., 1999. Calibration and sensitivity analysis of a spatially-distributed Solar Analyst. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(1), 49-65.
- Mikláneek, P., 1993, The estimation of energy income in grid points over the basin using simple digital elevation model. In *Annales Geophysicae, European Geophysical Society, Springer, Suppl. II*, 11: 296.

- Pons, X., 2002. MiraMon. Geographical Information System and Remote Sensing Software. Version 4.4.
- Pons, X., Ninyerola, M., 2008. Mapping a topographic global Solar Analyst implemented in a GIS and refined with ground data. *International Journal of Climatology*, 28(13), 1821-1834.
- Rich, P. M., Weiss, S. B., Debinski, D. A., McLaughlin, J. F., 1992. Physiographic inventory of a tropical reserve. In *Proceedings of the Twelfth Annual ESRI User Conference* (pp. 197-208).
- Rich, P. M., Hetrick, W. A., Saving, S. C., Dubayah, R., 1994. Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*.
- Ríos-Insua, S., Mateos-Caballero, A., Bielza-Lozoya, M. A. y Jiménez-Martín, A., 2004. *Investigación Operativa. Modelos determinísticos y estocásticos*. Editorial Universitaria Ramón Areces. Madrid, España, 552 p.
- Ruiz-Arias, J. A., Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., Alsamamra, H., 2009. A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science*, 23(8), 1049-1076.
- Strahler, A. H., 2010. *Introducing Physical Geography*. 5Th Edition. John Wiley & Sons. 656 p.
- Tereshchenko, I. E., y Filonov, A. E., 1997. A cerca de las causas de las elevadas concentraciones de ozono en la atmósfera de la Zona Metropolitana de Guadalajara, en octubre de 1996. *GEOS*, 17, 54-59.
- Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Batlles, J., López, G., Bosch, J. L., 2006. On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. *Meteorological Applications*, 13(3), 279-287.
- Wilson, J. P., Gallant, J. C., 2000. *Secondary topographic attributes. Terrain analysis: Principles and applications*, 87-131.
- Yamane, T., 1973. *Statistics: An introduction analysis*. 2nd Edition, Harper & Row. 1,130 p.

Recibido: 26 de mayo de 2017

Recibido corregido por el autor: 7 de septiembre de 2017

Aceptación: 12 de septiembre de 2017

La Olimpiada XXII de Ciencias de la Tierra: El Cosmos y Nuestro Planeta

Frez, J. y D. Peralta

División de ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California, México.

Presentación

En esta ocasión, la División de Ciencias de la Tierra del CICESE consideró pedagógico y de interés general para los estudiantes tratar el tema del entorno en que se sitúa nuestro planeta, el Universo, observado y racionalizado por nuestra civilización. Ello nos lleva a describir la formación de las Ciencias Físicas y Matemáticas, con los primeros modelos desarrollados en la Antigüedad que culmina con los griegos y la Biblioteca de Alejandría. Luego, describimos el desarrollo desde el Renacimiento hasta nuestros días.

Como en años anteriores, se preparó una guía que se publicó un mes antes del examen y que se incluye en esta comunicación. Los temas se presentan de tal forma que sean manejables por estudiantes de preparatoria a quienes se aplicará el examen posteriormente. Como se ha mencionado en comunicaciones anteriores, el objetivo de estas olimpiadas no es tanto evaluar lo que se enseña en el programa oficial de preparatorias, sino ampliarlo a contenidos que consideramos deberían ser parte esencial de la educación-instrucción en ese nivel, con un balance teórico-práctico que los motive a entender mejor su entorno.

El primer lugar lo obtuvo Alexis Gerardo Martínez Rangel del Plantel Arturo David Velázquez Rivera, COBACH de Ensenada, asesorado por la profesora Massyel Soledad Ramírez Pérez. El segundo lugar lo alcanzó Ian Alejandro Gómez Torres de la Universidad del Noroccidente de Latinoamérica, S.C. (UNDL) de Ensenada, asesorado por el profesor Sergio Pou Acuña. El tercer lugar correspondió a Alberto Iñiguez Ramos del Bachillerato Anahuac Campus Ensenada, asesorado por la profesora Priscila Meling Soto.

A. Guía de Estudios.

1. Los Comienzos.

La especie humana (*homo sapiens*) comenzó lentamente su expansión desde el NO de África hace unos 200 000 años. La escritura se desarrolló unos 7000 años atrás como consecuencia de las necesidades creadas por el cultivo agrícola. El hombre primitivo pasó del Norte de África al Medio Oriente hace unos 65000 años, para dispersarse por Europa y Asia. Aventuró lejos de la costa en la parte occidental del Océano Pacífico. Cruzó el Estrecho Bering e incursionó en el continente americano para terminar por poblar toda la superficie de la Tierra. La evolución del ADN transcurre en forma paralela y como resultado del medio ambiente

en que los humanos residen por un largo tiempo. De ahí que, con las muestras de ADN de restos humanos, se ha logrado establecer la secuencia en tiempo y lugar con la cual nuestra especie terminó por poblar toda la superficie de la Tierra en un proceso del que resultaron las actuales razas humanas.

1.1. Mitologías.

Desde los comienzos de cada civilización, el hombre se preocupó por entender el Universo, su comienzo y su historia. Todos los pueblos tienen ancestrales mitos en los que Universo, Sol, Tierra, Luna, mar y cielo son creados, así como la especie humana. Para sobrepasar esta etapa mágica-mitológica de la cultura, es necesario que

el hombre examine evidencias, elabore principios y encare la tarea de entender racionalmente el mundo. En general, todas las culturas tienen un mito sobre la creación simultánea del cielo y la tierra, aunque el hinduismo presenta un proceso cíclico. Por otro lado, el Génesis relata la creación de los cielos y la tierra por el dios hebreo. La religión griega inicia el universo con el Caos al que sucede Gea –la Tierra- que, a su vez, engendra a Urano, el firmamento estrellado.

Los aztecas, por su parte y en uno de sus mitos, creían en la existencia de otros mundos anteriores al suyo y que constituyen cinco soles. Después del cuarto, dos dioses –Quetzalcóatl y Tezcatlipoca- recrean el cielo y la tierra desmembrando al monstruo de la tierra. Éste se había combinado con el Gran Caimán, cuya espalda de cocodrilo dio forma a las cadenas de montañas. Después de peleas y sacrificios, surge Tonatiuh, el quinto sol. En otra secuencia, un dios dispone que los aztecas emigren desde Aztlán hacia lo que sería Tenochtitlan, la actual Ciudad de México.

1.2. Los Inicios en Egipto y Caldea.

La civilización se inicia con la agricultura y los comienzos del intercambio comercial. Esto ocurre, para el Occidente, en Egipto y en la Mesopotamia. Tanto el comercio como la agricultura necesitan la aritmética además de técnicas numéricas, geométricas y, en general, matemáticas. Así, en una etapa inicial, se diseña un sistema numérico que constituye la base de las matemáticas.

Los egipcios dividieron el año en 36 decanos de 10 días cada uno; a estos 360 días, le agregaban 5 días “epagómenos” completando el año de 365 días. Además, reconocían 36 estrellas con posiciones regulares en el cielo y medían el tiempo en 12 unidades nocturnas y 12 diurnas.

La numeración babilónica tiene base 60 de donde nace nuestra división del tiempo en 60

minutos y la circunferencia en 3600. Provista de instrumentos para registrar el movimiento de los cuerpos celestes, esta civilización distingue planetas y estrellas, predice las posiciones de los planetas, divide el cielo en las partes del zodiaco y el año en 360 días con 12 meses de 30 días. Además, los babilonios encontraron útil dividir el tiempo en semanas de 7 días a los cuales les dieron los nombres del Sol, la Luna y los 5 planetas conocidos. Escriben los números con un sistema posicional muy semejante al actualmente en uso, aunque no tienen un símbolo para el número cero.

Si algo mide la cultura media en cualquier tiempo, es la reacción humana ante los cometas; a pesar de que ya Séneca (4AC–65DC) dijo: *“...porque nos sorprendería que los cometas, ... no estén sujetos a leyes bien determinadas Llegará el día en que la posteridad se asombrará de que hayamos ignorado cosas que entonces parecerán tan claras”*. Incluso mucho después de ser explicada la existencia de cometas, ellos han producido pánico y suicidios, como sucedió con el cometa Halley en 1910. En 1997, se produjo un suicidio colectivo de 39 seguidores de la secta Puerta del Cielo, a los que les sería permitido abordar una nave que venía junto a un cometa.

2. Cosmología y Geografía en la Civilización Antigua Griega.

2.1. Los Comienzos.

Como todas las civilizaciones antiguas, Grecia inicia su cultura con un sistema mitológico de muchos dioses, con uno principal, Zeus, que es posteriormente Júpiter en la versión romana. Los mitos incluyen leyendas relacionadas con el nacimiento del mundo y sus características. El legado, por lo tanto, consta de a) una mitología muy rica que forma una religión con templos y ritos; además y al mismo tiempo, de b) los comienzos de la astronomía y la geografía. Por

ejemplo, la expresión “Vía Láctea” denota al conjunto denso de estrellas que apreciamos a simple vista en un cielo nocturno sin nubes y que corresponde, en el mito, al chorro de leche que saltó del pecho de Hera, la esposa del dios de dioses (Zeus), produciendo la Vía Láctea cuando retiró bruscamente de su pecho a Hércules, hijo bastardo de Zeus con la mortal

Alcmena. La historia de la Vía Láctea sigue con Demócrito (460 AC.- 370 AC), quien sugirió que aquel haz blanco en el cielo era, en realidad, un conglomerado de muchísimas estrellas demasiado tenues individualmente como para ser reconocidas a simple vista. Su idea, no obstante, no encuentra respaldo observacional hasta 1609, cuando el astrónomo italiano Galileo Galilei constata, con el telescopio, que Demócrito estaba en lo cierto: a donde quiera que mirase, la Vía Láctea se encontraba llena de estrellas.

2.2. Tales de Mileto.

La historia de la ciencia griega, en cuanto a aplicar métodos racionales al estudio de la Naturaleza, se inicia con Tales de Mileto (623 AC - 540 AC), filósofo, matemático, geómetra, físico y legislador griego, con una serie de discípulos donde destacan Anaximandro y Anaxímenes (discípulo del anterior). Gran parte de su obra, si no toda, le es asignada sin clara evidencia, pero su fama, propagada a generaciones posteriores, es tan grande que hay poca duda de su importancia histórica. Entre Tales y Demócrito hay alrededor de 160 años con pocos registros históricos accesibles. Aunque Demócrito buscaba la causa primordial de las cosas (según él, el agua), no abandonó los dioses de la época. Con todo, no cabe duda de que, como Tales, propuso fundar sus explicaciones en principios y causas, inaugurando el modo típicamente griego de “explicar” el mundo. El importante papel de la religión en la cultura griega existe, a pesar del carácter racional de la

ciencia y filosofía griega. No hay que olvidar que uno de sus principales filósofos, Sócrates (470 AC – 399 AC), fue condenado a muerte, entre otras cosas, por pecar contra la religión. Murió a los 70 años de edad, aceptando serenamente beber veneno, método elegido por un tribunal que le juzgó por no reconocer a los dioses atenienses y corromper a la juventud. Según relata Platón, en la Apología a su maestro, éste pudo haber eludido la condena gracias a los amigos que aún conservaba, pero prefirió acatarla y morir.

2.3. Principales Hitos Culturales de la Antigüedad en Europa.

El siguiente listado destaca los principales hitos del comienzo de la ciencia en la antigüedad y alrededor del Mediterráneo.

~585 AC Tales de Mileto predice el eclipse solar que, históricamente, pone fin a la Batalla de Halys y a la guerra entre medos y lidios.

~530 AC Pitágoras funda la escuela matemática de Crotona, en el sur de Italia. Pitágoras sugiere que la Tierra es esférica, no plana.

~500 AC Jenófanes encuentra conchas marinas en montañas y deduce que toda la Tierra estuvo cubierta de agua en el pasado.

~450 AC Empédocles sugiere que todo en la Tierra está hecho de combinaciones de tierra, aire, fuego y agua.

~325 AC Aristóteles escribe varios libros sobre temas de física, biología y zoología; entre muchos temas, entrega razones para justificar que la Tierra es aproximadamente esférica (por la manera de cómo se ven llegar o salir los barcos en las bahías) con lo cual se modela los eclipses de la Luna y el Sol.

Ejercicio.

Describe el eclipse de Luna, con la Tierra entre el Sol y la Luna, así como el eclipse de Sol, con la Luna entre la Tierra y el Sol. Para ello, los griegos tomaron al Sol, Tierra y Luna como cuerpos esféricos. En la explicación, tome en cuenta el tamaño aparente de los tres astros.

~300 AC Teofrasto escribe “Historia de las Plantas” y “Sobre las Causas de las Plantas”. Con ello, inaugura la Botánica.

250 AC Aristarco de Samos sugiere que el Sol, no la Tierra, es el centro del Universo al encontrar que el radio del Sol es mucho mayor que el de la Tierra.

~240 AC Arquímedes descubre la fuerza de empuje del agua y lo aplica para distinguir la pureza de una corona de oro.

~240 AC Eratóstenes calcula el radio de la Tierra (tomada como esfera) a partir de la sombra que produce el Sol a mediodía en el solsticio de verano.

~230 AC Ctesibio construye clepsidras (relojes de agua) que serán los más precisos del mundo durante siglos.

~139 AC Hiparco descubre la precesión de la órbita terrestre (¿qué es?) y compila el primer catálogo de estrellas de Occidente.

~120 DC En China, Zhang Heng reflexiona sobre los eclipses y compila un catálogo de 2500 estrellas.

~150 DC El Almagesto de Claudio Tolomeo se convierte en el texto de astronomía predominante, pese a los errores que contiene. En este texto, la Tierra está en el centro del Universo con un complicado movimiento de los planetas, la Luna y el Sol (epiciclos) que modela el

movimiento observado. Es tomado como verdad absoluta (acorde con la Biblia) por la Iglesia Cristiana e imperará en Europa Occidental hasta el Renacimiento cuando los trabajos de Kepler, Copérnico, Galileo y Newton, entre otros, lo sobrepasan gracias al desarrollo de la Mecánica Clásica y del telescopio.

628 El matemático indio Brahmagupta establece las primeras reglas para el uso del símbolo cero.

964 El astrónomo persa Abd Al-Ramán Al Sufi actualiza el Almagesto y da, a muchas estrellas, los nombres árabes que siguen en uso hoy.

1021 Albacén, pionero de la ciencia experimental, desarrolla una investigación original sobre la visión y la óptica.

Agregamos algunos detalles importantes de la ciencia griega. Particularmente, para describir parte del trabajo de un gigante, Aristarco de Samos (~319 AC - ~230 AC). Además, enfatizamos la importancia de la Biblioteca de Alejandría. El estudiante puede revisar el cálculo para el radio de la Tierra de Eratóstenes que se describe en una olimpiada anterior.

Parte de la ciencia antigua está dominada por consideraciones filosóficas y místicas. Por ejemplo, Empédocles (490-430 AC) hablaba de dos fuerzas (amor y odio) que, aplicadas a los cuatro elementos, generan todo lo visible.

2.4 Eratóstenes y la Biblioteca de Alejandría.

Mencionaremos dos actividades adicionales de Eratóstenes (276 AC-184 AC): a) introduce coordenadas en los mapas, semejantes a las actuales latitud y longitud; b) fue director de la famosa Biblioteca de Alejandría. Dicha Biblioteca, hasta sus varias destrucciones (incendios) por celos religiosos y políticos, fue el centro de estudios más importante de la Antigüedad. En ella, investigaban los sabios más sobresalientes; por

ejemplo, Euclides y Arquímedes. Su desaparición es un símbolo cultural de la destrucción; ocurrió en varias etapas de los primeros siete siglos de nuestra era. Varias culturas y religiones han sido culpadas. En un último tópico relacionado, no podemos dejar de mencionar a Hypatia de Alejandría.

2.5. Hypatia de Alejandría (355 o 370 DC, marzo del 415 o 416).

Es considerada la primera mujer científica de la Antigüedad; desarrolló su actividad en el Museo de la Biblioteca de Alejandría, donde su padre fue director. Cultivó varias disciplinas: filosofía, matemáticas, astronomía, música,... y durante veinte años se dedicó a desarrollar y enseñar sus conocimientos. Con mucha belleza, llegó a simbolizar la ciencia que los primeros cristianos identificaron con el paganismo. Vivió en una época de persecución para todo aquél que no se convirtiera al cristianismo y renegara de su ciencia. Hypatia se negó a traicionar sus ideas, por lo que fue acusada de conspirar contra el líder cristiano de Alejandría. Fanáticos religiosos, en forma muy cruel, pusieron fin a su vida. (La relativamente reciente y recomendable película *Ágora*, dirigida por el español A. Amenábar, recrea parte de esta historia).

2.6. Método de Aristarco para determinar la distancia relativa Tierra-Sol.

Veamos el método geométrico de Aristarco (310 AC - 230 AC) para determinar la distancia relativa entre la Tierra y el Sol (tema desarrollado en una Olimpiada anterior). Este es el único trabajo que sobrevive a su autor, aunque fue su cuidadosa observación de un eclipse lunar, indicando la posición del sol en el lado opuesto del cielo, lo que permitió a Hiparco, 169 años más tarde, deducir la precesión de los equinoccios.

La observación de un eclipse lunar convenció a Aristarco, al ver el cambio de la sombra de la

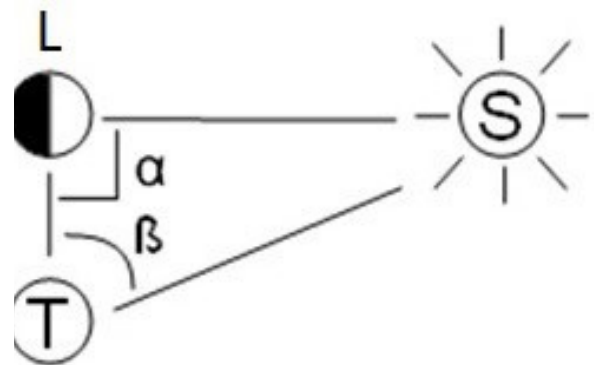


Figura 1. Definición de las distancias Tierra-Sol (TS) y Tierra-Luna (TL) utilizadas por Aristarco.

Ref. https://es.wikipedia.org/wiki/Aristarco_de_Samos.

Tierra en la Luna, de que el diámetro o radio de la Tierra era el doble que el de la Luna.

En la Figura 1, la Luna (L) está señalada por un semicírculo iluminado que se encuentra dibujado frente al Sol (S). Debajo de la Luna, se encuentra la Tierra (T). Con esta geometría, consideremos que la luz del Sol (S) llega en forma perpendicular a la Luna, cuando ésta se encuentra en el primero o último cuarto; es decir, cuando el ángulo α es muy cercano a 90° . Note que el problema consiste en calcular la distancia de TS en unidades TL; es decir, calcular la razón $TL/TS = \cos(\beta)$. Aristarco encontró que $\beta = 87^\circ$ con lo que el ángulo interno en el vértice S sería muy pequeño (3°). Podemos utilizar que $\sin(3^\circ) = 1/19$, con lo que resulta que el Sol se encontraría 19 veces más lejos de la Tierra que de la Luna y, por lo tanto, tiene un radio 19 veces mayor. Los resultados actuales son que el radio del Sol es 344 veces el de la Luna.

Ejercicio. Obtenga el ángulo β que esté de acuerdo con el valor 344.

La respuesta a la pregunta anterior indica que el ángulo β está cerca de los 90° , lo que indica que el ángulo interno en S es muy pequeño. Ya que tanto el disco solar como el lunar tienen un diámetro aparente muy semejante, de unos 32 minutos de arco, la distancia Tierra-Sol es

mucho mayor que la distancia Tierra-Luna y, por consiguiente, el Sol debe ser mucho más grande. Al ser el Sol mucho mayor que la Luna, Aristarco creyó improbable que un cuerpo grande orbitara sobre uno mucho menor, siendo el primero en opinar que la Tierra gira alrededor del Sol. Sin embargo, este resultado no fue aceptado hasta el Renacimiento.

El ángulo $90^\circ - \beta$ es muy difícil de medir con exactitud; el valor que se acepta actualmente es de $1/6$ de grado con lo que resulta $\sin(1/6) = 1/344$.

2.7. Edad Media, Renacimiento y Desarrollo Posterior.

No hubo un desarrollo significativo de las Ciencias durante la Edad Media en Europa y Asia excepto la Geografía. Hay que esperar al comienzo del Renacimiento para que renaciera la ciencia, el arte, la filosofía y, en general, la Cultura en Europa. Seguramente, el estudiante ha estudiado el papel de los imperios Bizantino, de la India y del Arábigo en mantener y actualizar los catálogos astronómicos que provienen de la cultura greco-latina de la Antigüedad. No es sorpresa, por tanto, que la Astronomía tenga rápidos y grandes avances por la invención del telescopio, el uso de la información guardada por siglos y el trabajo de Copérnico, Galileo, Kepler y Newton. Los catálogos son la base para inducir las leyes de Kepler y su posterior fusión o síntesis en la teoría de la gravedad de Newton. Luego, sigue el enorme desarrollo que protagonizan físico-matemáticos como Newton, Laplace, Leibniz y Maxwell para llegar a las explosiones del conocimiento físico desde fines de los siglos XIX y comienzos del XX con los nombres, sin mayor orden, de Dirac, Einstein, Born, Pauli, Poincaré, Eddington, Landau, Chandrasekhar, Gamow, Hoyle, Feynman, Hawking y otros que formaron el conocimiento científico sobre el cual se basa nuestra actual visión del cosmos.

Física Clásica. Se inicia con el avance en dos áreas:

a) la Mecánica Clásica, formulada a partir de las leyes básicas de la Mecánica, y b) la Teoría de la Gravedad, ambas desarrolladas por Newton. La segunda proviene lógicamente de la síntesis de las leyes de Kepler. Uniendo ambos conjuntos de leyes, fue necesario un desarrollo de métodos matemáticos y numéricos para resolver las ecuaciones en derivadas parciales y su aplicación a problemas como la determinación de las órbitas de planetas, satélites y cometas, trabajo que se realizó básicamente en el siglo XIX. En la segunda parte de este siglo, aparece la teoría del electromagnetismo y la mecánica estadística.

2.8. La Historia de las Dos Nubes y el Nacimiento de la Física Moderna.

Fue una época optimista en que cualquier problema físico en que se dieran condiciones iniciales y de frontera parecía poderse resolver. Pero, dentro del optimismo de los físicos, uno de ellos, Lord Kelvin, señaló en un discurso de 1900, a dos “nubes”:

“La física es un conjunto perfectamente armonioso y en lo esencial acabado, en el que sólo veo dos pequeñas nubes oscuras: el resultado negativo del experimento de Michelson y Morley y la catástrofe ultravioleta en la explicación de la radiación del cuerpo negro”

La falla del experimento de Michelson y Morley se refiere a la falla para detectar el movimiento de la Tierra relativo al “éter”. La segunda nube proviene de la Mecánica Estadística y tiene que ver con el cálculo (modelado) de la capacidad calórica en gases; el uso de herramientas teóricas estándares (teorema de equi-partición) predecía valores en desacuerdo con los medidos. La solución a la primera nube lleva a Einstein a la teoría de la relatividad; la segunda, a Planck a la teoría cuántica que resolverá este problema, junto con el de la radiación del cuerpo negro, al aplicar correcciones a la teoría clásica. Así las “dos nubes” originaron las dos columnas de la

Física Moderna, imprescindibles en el estudio cosmológico.

A lo anterior, se agrega la parte astronómica experimental, con el descubrimiento progresivo de la vastedad del Cosmos, con miles de millones de galaxias compuestas, a su vez, de miles de millones de estrellas acompañadas de sus posibles sistemas solares.

3.Principales Resultados de la Cosmología.

3.1. Corrimiento al Rojo del Espectro de las Galaxias.

Esta ley, descubierta por Hubble en 1929, en el Observatorio del Monte Wilson, California, señala el corrimiento al rojo del espectro de la luz que proviene de las galaxias. La interpretación inmediata es que el Universo se expande ya que las galaxias, donde quiera que se mire, muestran este fenómeno y es necesario interpretar el corrimiento al rojo por el efecto Doppler. Este efecto señala el cambio del espectro de una onda emitida por un cuerpo en movimiento; el espectro se corre hacia el extremo violeta/azul del espectro si el movimiento del cuerpo es hacia el observador y tiende al extremo rojo si el movimiento es en la dirección contraria, alejándose del observador. Así, la interpretación de la ley de Hubble es que las galaxias se alejan de un observador en la Tierra. Dado que nuestro observador no puede ser privilegiado, se concluye que cada galaxia se aleja una de otra y, generalizando, concluimos que el espacio se expande, lo que se cuantifica por la ley de Hubble: las galaxias se alejan una de otras con una velocidad v que cambia en forma proporcional a la distancia d . Así, la ley de Hubble (Figura 2) es $v = H_0 \cdot d$, donde v es la velocidad de la galaxia cuyo espectro es observado; H_0 es la constante de Hubble, estimada en 71 a 72 Km/(seg-Mpc) y con una variabilidad entre 4 y 8 unidades (Ver las definiciones de distancias astronómicas más

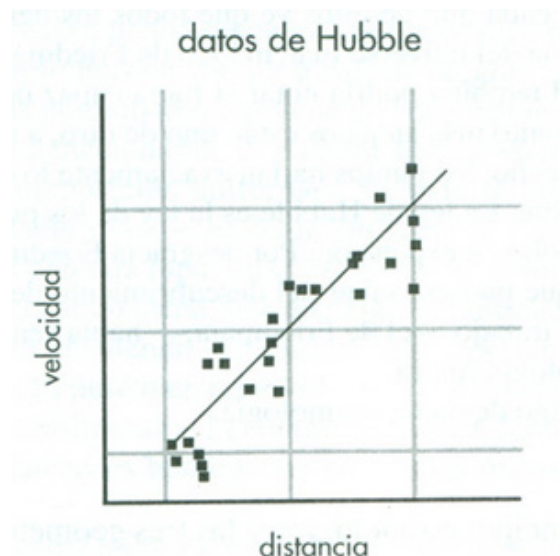


Figura 2. Ajuste lineal de velocidades de alejamiento de galaxias con respecto a la distancia hecho por Hubble. Ref. Susskind, L. (2006) "El Paisaje Cósmico", Crítica, S. L., Barcelona, España.

abajo). No es difícil deducir, dada la constancia de la velocidad, que H_0 representa el valor inverso de la edad del Universo. Mediciones recientes indican que la expansión del Universo se está acelerando.

Ejercicio. Suponga la constancia de H_0 en la ley de Hubble; interprete su significado y calcule la edad del universo,

3.2. Unidades de Distancias Astronómicas.

Las dos más usadas, además de aquellas de los sistemas [cgs] y [MKS] son:

1 parsec = 3.083×10^{18} cm = 3.259 año-luz

1 año-luz = 9.461×10^{17} cm = 0.3069 parsec

Un parsec corresponde a un paralaje (sección 5) de un segundo de ángulo.

3.3. Big-Bang.

Hubble encuentra que la ley que lleva su nombre implica la expansión del Universo de lo que se infiere que las galaxias estuvieron cada vez más juntas en el pasado; por lo tanto, con una densidad y temperatura muy altas en un momento inicial;

es decir, formando lo que los físicos llaman una singularidad. Esto nos lleva al Big-Bang, un origen explosivo de nuestro Universo hace unos 15 mil millones de años. Este resultado ha sido verificado independientemente de un modo curioso. Algunos ingenieros, en un trabajo no relacionado con la Astronomía, encontraron una fuente de radiación de microondas universal que puede asociarse a un cuerpo con una temperatura de 3°K ; es decir, la temperatura que habría alcanzado hoy el gas en expansión que resultó del Big Bang. Es decir, esta radiación de microondas universal nos permite “oir” reverberaciones de la primigenia “gran explosión”.

Existe una gran (y muy especializada) bibliografía relacionada con el estudio de la evolución de la materia, desde partículas elementales hasta cubrir la serie periódica de elementos. En los primeros instantes, el Bing Bang produjo fundamentalmente partículas elementales, hidrógeno y helio. Las reacciones de fusión en el interior de las estrellas producen todos los demás elementos químicos. Así que, finalmente, la diseminación de los elementos pesados resulta de la explosión de ciertas estrellas, las supernovas. Dentro de estos elementos pesados, está el muy necesario carbono, imprescindible para la existencia de la vida orgánica. De ahí, el poético dicho: “somos polvo de estrellas”.

Las condiciones extremas del comienzo del Universo indican una singularidad en densidad, temperatura, presión y curvatura en que la teoría de Einstein no es adecuada para describir este comienzo puntual del cosmos. La teoría sólo puede estudiar cómo evolucionó posteriormente, dadas condiciones que los físicos deben imaginar. La primera fase de la expansión, con un factor de 10^{105} veces en un intervalo de tiempo de 10-35 [seg], parece ya difícil de concebir. Curiosamente, esta situación permitió, según Hawking, que hubiera cierta homogeneidad en este nacimiento. Así, este

estudio debe superar las dificultades de combinar física cuántica (pequeñas partículas en extremas condiciones) con física relativista (grandes masas a grandes velocidades) son grandes. El estado inicial inflacionario debe haber tenido sectores expandiéndose a velocidades mayores que la luz.

El párrafo anterior indica que el estudio del Cosmos necesita especialistas en Física de Partículas. Además, dadas las grandes distancias y masas propias del Cosmos, específicamente las grandes masas asociadas a estrellas, hoyos negros y galaxias, así como sus también (potencialmente) grandes velocidades, nos llevan a concluir que este estudio debe incluir, además, las dos grandes ramas de la Física Moderna, es decir, Relatividad y Física Cuántica. La integración de toda la física incluye nuevos desarrollos teóricos, como la teoría de cuerdas. Esta integración, llamada teoría del todo, ha sido materia de ardua investigación ocupando las mejores mentes, incluyendo a Einstein y Hawking.

4. Conceptos Básicos de Física Moderna.

4.1. Conceptos (muy) Básicos de Física Relativista.

La Relatividad Especial nace del simple hecho de que la velocidad de la luz es constante con respecto a la velocidad del emisor y receptor. Esto parece extraño si el estudiante recuerda la ley del paralelogramo para sumar (o restar) velocidades que se estudia en Estática de la Mecánica Clásica en que, suponiendo que no hay roce del aire (cosa difícil de que se cumpla para objetos que se mueven en la atmósfera), las velocidades se suman vectorialmente. Pero, la velocidad de la luz es la misma para un mismo medio físico, independientemente de la velocidad del emisor. No es difícil concluir que, si invertimos la expansión en el tiempo, deducimos que la materia del Universo debió estar reunida

en un espacio muy reducido, sujeta a presiones y temperaturas inmensas. Esto nos lleva a la Gran Explosión, o sea, al popular “Big-Bang”.

4.2. Conceptos (muy) Básicos de Física Relativista Especial.

Hubo tentativas de medir la velocidad de la luz con respecto al “éter luminífero”, que era considerado el medio en que se transmiten las vibraciones transversales de la luz. Los resultados fueron negativos. Einstein, a los 26 años, postuló simplemente que esa velocidad es constante y que el “éter luminífero” no existía; luego, sacó conclusiones de esta hipótesis. Por la definición de velocidad constante, se deduce que el tiempo y la masa pasan a depender del sistema en movimiento.

Otra consecuencia famosa de la constancia de la velocidad de la luz en sistemas inerciales es la equivalencia entre masa y energía $E=mc^2$, fórmula atrayente por lo simple, que nos indica el contenido de energía de un cuerpo de masa m y que nos sirve, por ejemplo, para explicar la cantidad de energía irradiada por el Sol. En el astro, cuatro núcleos de Hidrógeno se pueden fusionar en un núcleo de Helio. Esta fusión implica menos masa que los núcleos de Hidrógeno; la diferencia se convierte en energía de fusión. En cada segundo, la fusión en el núcleo solar convierte 200 millones de toneladas de hidrógeno en helio. El estudiante puede calcular la energía total liberada por el proceso y hacer un cálculo aproximado de la vida efectiva del Sol. (Además, busque las definiciones básicas de fusión y fisión).

4.3. Conceptos (muy) Básicos de Física Relativista General.

Si la Relatividad Especial se refiere a sistemas con velocidades constantes, la Relatividad General lo es para sistemas acelerados. Lo que

cambia mucho la situación porque un sistema acelerado es equivalente a un sistema sujeto a fuerzas. Desde luego, el campo de fuerzas más común en el Universo es el gravitatorio. Este campo lo visualizamos por líneas o superficies equipotenciales que son, al mismo tiempo, geodésicas (¿qué son geodésicas?) para partículas masivas; es decir, son el camino natural de las masas en movimiento sujetas al campo gravitatorio. Desde este punto de vista, podemos decir que el campo de fuerzas “curva” el espacio para el movimiento de las cargas gravitatorias; la teoría predice este efecto también para fotones; es decir, para los rayos de luz. En 1919, este último efecto fue observado en un eclipse de Sol por el físico inglés Eddington, quien midió la desviación de los rayos de una estrella al pasar cerca de la periferia y desde detrás del Sol. De donde viene la discusión de si los fotones tienen masa. Es curiosa la diversidad de opiniones que puede encontrarse en Internet para el tema “¿Tiene masa un fotón?”.

4.4. Teoría de Cuerdas.

Al unir varias teorías físicas, se busca compatibilizar diferencias. Por ejemplo, puede pensarse en cómo armonizar la teoría gravitatoria con la mecánica cuántica. Las dificultades originadas pueden incluir la necesidad de espacios multidimensionales, con más de las tres dimensiones que aceptamos habitualmente. Con ello, se consiguen leyes de la naturaleza más sencillas y elegantes. La teoría de cuerdas trabaja, como cualquier teoría, con abstracciones matemáticas y se originó para explicar la interacción nuclear fuerte que mantiene unidas las partículas en el núcleo y la conducta de los hadrones, partículas compuestas sujetas a la influencia de dicha interacción nuclear. En la teoría de cuerdas, las partículas elementales pueden representarse mediante entes inconcebiblemente pequeños y prácticamente unidimensionales, las cuerdas. Ellas se desplazan en el espacio tridimensional

común, pero, además, vibran en dimensiones de orden mayor a esas tres. Los modos de vibración (notas musicales) corresponden a las partículas elementales, incluyendo algunas hipotéticas, como los gravitones. Para responder la crítica de que las dimensiones extras no son observadas, ellas, además de ser pequeñas, se pueden replegar o “enrollar” como en tubos muy delgados, esencialmente unidimensionales, con dos dimensiones laterales muy pequeñas y enrolladas.

4.5. Agujeros Negros y Materia Oscura.

Es probable que exista un agujero negro en el centro de nuestra galaxia. Los astrónomos que estudian la radiación que nos llega desde el centro de la galaxia ven un enorme espacio vacío en este centro, libre de gases, pero rodeado de gigantes y caóticos jirones de materia. Por su movimiento, concluyen que existe un masivo objeto en el centro de la galaxia; es decir, un agujero negro. Por otro lado, los cálculos de energía en la galaxia sugieren una fuente adicional, la materia oscura. Ella ocupa un espacio en los brazos en espiral de nuestra galaxia y se extiende muy afuera de ellos. Se puede hacer balances de energía tomando en cuenta las ondas de radio generadas en esos sitios. Las fuerzas gravitatorias necesarias para explicar los movimientos observados no corresponden a la distribución de las masas observadas. La fuente de esta fuerza extra necesaria correspondería a una hipotética materia oscura.

4.6. Constante Cosmológica y Materia Oscura.

Originalmente, Einstein creyó en un universo estático. En 1915, introdujo una fuerza “anti-gravitatoria” que estaba inserta en la estructura del espacio-tiempo. Cuando se concluyó que el universo no es estático, Einstein eliminó dicha fuerza de su teoría y llamó a su idea “el error más grande” que había cometido. Sin embargo, en 1998, las observaciones de supernovas muy

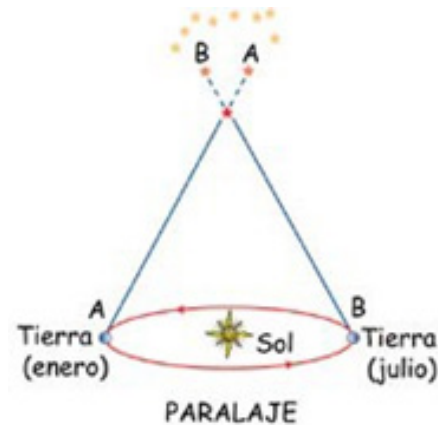


Figura 3. Geometría utilizada para definir paralaje.

Ref. <https://ciencia.amateur.wordpress.com/amateur.wordpress.com/2006/04/12/calculo-de-la-distancia-a-las-estrellas-usando-paralaje-trigonometrico/>.

distantes revelaron que el universo se está expandiendo a un ritmo muy acelerado y la constante cosmológica fue resucitada como fuerza anti-gravitante. Con un valor justo para evitar que el universo se hubiera disgregado antes de la formación de las galaxias.

5. Medición de la Distancia de Nuestro Sistema Solar a Una Estrella. Método del Paralaje.

Una forma de atacar este problema es generalizar el método geométrico utilizado por los griegos para calcular la distancia Tierra-Sol en unidades de la distancia Tierra-Luna (Sección 2.6). Esto, nos lleva al método del paralaje. Aunque existen otros, nos limitaremos a este método en estas notas. Dada las enormes distancias a las estrellas, es fácil predecir que necesitamos triangular con distancias del orden de la órbita de la Tierra. La geometría del método está representada en la figura 3.

Tomamos como base los dos puntos que limitan al eje mayor de la órbita de la Tierra alrededor del Sol. Unimos estos dos puntos con la estrella que, necesariamente, se encuentra a una distancia mucho más grande que las dimensiones de la órbita de la Tierra. Esto produce un triángulo

que, para simplificar, suponemos isósceles. Medimos el ángulo interno del vértice en la estrella. Además de este muy pequeño ángulo, que llamamos paralaje, conocemos al ángulo recto y la longitud del eje mayor de la órbita de la Tierra. La distancia del centro de nuestra órbita a la estrella es la longitud de la altura del triángulo isósceles. Con la aproximación anotada, la paralaje se mide a través de su tangente que es la razón entre el semieje mayor de la órbita de la Tierra y la distancia desde la estrella al centro del plano de la órbita de la Tierra. Los valores comúnmente medidos resultan ser del orden de segundos de arco. Un parsec se define como la distancia estelar que corresponde a 1 segundo del arco de paralaje.

6. Temas Diversos.

6.1. Cosmología y Ciencia Ficción.

Abundan películas y libros de ciencia ficción con temas, entre otros, de invasión de extraterrestres, viajes espaciales con hibernación, extra dimensiones espaciales y “gusanos” que “cortan” caminos a través de la curvatura del espacio. El estudiante que desea considerar la viabilidad del tema de viajes intergalácticos puede tomar en cuenta lo siguiente.

Las estrellas más cercanas están a distancias del orden de años-luz.

1 año-luz = $9460730472580.8 \text{ Km} \sim 10^{13} \text{ Km.}$ = distancia que recorre la luz en un año.

Radio de nuestra galaxia ~ 50 años luz

Distancia de la Tierra a la Galaxia Andrómeda (visible a simple vista) ~ 2.5 millones de años luz.

Dentro de 4000 millones de años, Andrómeda entrará en colisión con nuestra galaxia, la Vía Láctea.

Distancia a la Galaxia del Molinete ~ 25 millones de años luz.

Las dos galaxias anteriores son muy “cercanas” a la nuestra. Con lo cual, si adjudicamos una velocidad realista al cohete espacial, se puede introducir un toque de sensatez en los cálculos del tiempo necesario para un viaje espacial intergaláctico. Por ejemplo, calcule el tiempo de recorrido desde nuestro planeta a uno de Andrómeda con un vehículo espacial que se mueve a un 10% de la velocidad de la luz, ambos planetas están cerca del centro de ambas muy cercanas galaxias.

6.2. Espacios Multidimensionales.

Este tema es utilizado en ciencia-ficción en forma lejana a su uso normal en Física. Ya hemos mencionado que varias áreas de la Física suelen necesitar espacios multidimensionales para poder formar construcciones teóricas que avancen hacia una “teoría del todo”. Por ejemplo, para compaginar diversas teorías (por decir, gravedad relativista con teoría cuántica) en un solo cuerpo, puede que algunas necesarias igualaciones analíticas requieran la introducción de espacios de seis o más dimensiones.

6.3. El Lugar del Hombre en el Universo.

Vivimos en nuestro Universo en que los elementos químicos se construyeron secuencialmente después del Bing Bang. Quizás en uno de un conjunto de posibles multiversos. Habitamos un planeta con un adecuado Sol y a una adecuada distancia de él, en que el agua de los océanos formó un caldo de cultivo que, hace unos 400 millones de años, permitió el apareamiento y la evolución de seres orgánicos. Vivimos en un planeta que no tuvo catástrofes, ni supernovas cercanas que explotaran y destrozaran los intentos de vida. ¿Una casualidad entre millones de sistemas solares semejantes sin vida?

Los que apoyan la teoría del “gran diseño” alegan demasiada coincidencia con muy pequeña probabilidad de existencia. Los que ven la evolución del Cosmo como un resultado “natural” entre millones de posibilidades alegan, como Laplace, “no necesitamos esa hipótesis” (la del gran diseño) y muestran el hecho frío de que todo lo que sucede es poco probable porque hay demasiadas posibilidades.

Lo cierto es que el estudio del Universo, o de “nuestro” Cosmos, entrega una visión que nos obliga a aceptar y visualizar con admiración la complejidad natural de la evolución física, biológica y espiritual en nuestro cosmos y nuestro planeta y, si volvemos al comienzo de estas Notas, cuando seguimos, también con admiración, al desarrollo del conocimiento de la naturaleza que nace en una isla del Mediterráneo, con un Tales de Mileto y hace 2600 años atrás.

B. Problemas.

1. El avance de las Ciencias Naturales y las Matemáticas en la Antigüedad resultan principalmente de

- a) la necesidad de entender las causas de los fenómenos naturales;
- b) de reemplazar la acción de dioses por un conocimiento empírico-racional;
- c) prever lo que sucederá en la evolución del hombre;
- d) la labor del Estado en la educación.

2. Los principios que sostienen una estructura teórica en Ciencias Naturales son:

- a) una estructura social que sostiene la educación con impuestos;
- b) sentencias muy generales que

proviene de la experiencia, se toman como ciertas y de las cuales pueden deducirse consecuencias;

c) los comienzos del Universo de acuerdo a alguna mitología;

d) los valores éticos a los cuales debe ajustarse el investigador.

3. Una masa de 10 gr. es equivalente en energía a

- a) $3 \cdot 10^{25}$ [erg]; b) $9.5 \cdot 10^{30}$ [erg];
- c) $9 \cdot 10^{21}$ [erg];
- d) infinita energía, según la teoría de la relatividad especial. Tome la velocidad de la luz como 300 000 [Km/seg].

4. Un Universo surgido de un Big Bang está en estado de expansión por el efecto de un tipo de materia llamada

- a) fuerza negra; b) hoyo negro;
- c) materia oscura; d) agujeros negros.

5. En la física de la mayor parte del siglo XIX, el éter era

- a) un gas que permite realizar cirugía con comodidad;
- b) un medio en el que vibran las ondas sonoras;
- c) una materia misteriosa que producía enormes campos gravitacionales;
- d) medio en que vibran las ondas luminosas.

6. Los hombres primitivos salieron inicialmente de la época recolectora y cazadora gracias a

- a) la agricultura, en sitios con ríos de fuerte caudal que arrastraban sedimentos;
- b) el comercio en puertos abrigados y bien protegidos;
- c) el estar cerca de la ruta del tráfico comercial con el Oriente;
- d) la inteligencia de pensadores excepcionales.

7. Los grandes pensadores griegos de los primeros siglos de nuestra era recibían invitaciones para investigar en:

- a) en imperios del extremo Oriente altamente evolucionados;
- b) la Biblioteca de Alejandría;
- c) las escuelas fundadas por Sócrates, Platón y Aristóteles en Atenas;
- d) el Coliseo Romano.

8. La visión de que la Tierra es plana fue aceptada por

- a) Grecia en los primeros siglos de nuestra era;
- b) las autoridades en la Edad Media;
- c) la posición oficial de la Iglesia Católica Romana en la edad contemporánea;
- d) Copérnico.

9. La teoría del Big Bang nace

- a) como consecuencia de la ley de corrimiento al rojo de los espectros de la luz que provienen de estrellas de galaxias lejanas;
- b) porque el Universo se expande y contrae periódicamente;
- c) de las observaciones por telescopio hechas por Galileo;
- d) de los principios de la relatividad especial.

10. Modelos de universos multidimensionales:

- a) son sólo propios de la literatura de ciencia ficción;
- b) pueden aparecer en teorías físicas que tratan de conjuntar lógicamente diversas teorías modernas;
- c) aparecen sólo en la teoría de la relatividad general;
- d) son necesarios para permitir viajes entre galaxias.

11. La ley de Hubble se escribe como $v = H_0 \cdot d$ donde v es la velocidad del alejamiento entre galaxias, d es la distancia del alejamiento y H_0 es la constante correspondiente. Luego, H_0

- a) no tiene dimensión física;
- b) es la distancia a la galaxia más cercana;
- c) el valor inverso de un tiempo, la edad del Universo;
- d) no tiene significación física.

12. Podemos medir la distancia desde nuestro sistema solar a una estrella lo que consiste en armar un triángulo isósceles en que

a) el valor de un semieje de la rotación de la Tierra es la base;

b) el ángulo del vértice opuesto a la base es medible;

c) hay que esperar muchos años para estimar la distancia;

d) no se puede medir las distancias a estrellas de otras galaxias. (VER)

13. La detección de la presencia de vida inteligente en un planeta de otro sistema solar en otras galaxias del universo:

a) no es posible por las enormes distancias;

b) no es posible porque somos únicos en el cosmos;

c) es probable, pero sólo detectable con herramientas de alta tecnología;

d) hay claras evidencias de visitas de seres inteligentes a nuestro planeta.

14. Es común hablar de una “singularidad” en teorías del Universo. Esto significa

a) una probabilidad extremadamente pequeña de la existencia de los elementos más pesados en los primeros segundos de vida del Cosmos;

b) el carácter “único” del Cosmos porque es poco probable que haya resultado de un proceso natural;

c) el valor extremadamente pequeño del tamaño del cosmos en el momento del Big Bang;

d) el hecho de que se hayan producido elementos muy livianos casi inmediatamente después del Big Bang.

15. Para teorizar sobre la evolución del Cosmos, es necesario conjuntar teorías relativistas y cuánticas además de teoría de física de partículas en condiciones de alta temperatura, curvatura y presión. El resultado

a) no es aceptable para la mayoría de los científicos;

b) es un edificio enorme y altamente aceptado por la comunidad científica internacional;

c) no explica la evolución de la vida inteligente;

d) los resultados no están sujetos a adicionales mejoras desde el punto de vista teórico u observacional.

16. La relación entre energía y masa: es

a) un resultado experimental de la Física de Altas Energías;

b) una consecuencia de los principios de la relatividad especial;

c) un resultado empírico de masas en movimiento;

d) una hipótesis altamente probable.

17. Es un hecho de que, en la Antigüedad, los científicos aceptaron evidencias que muestran que la Tierra es (aproximadamente) esférica y gira alrededor del Sol mientras que la Luna lo hace alrededor de la Tierra. Estos resultados no se aceptaron en las varias centenas de años siguientes lo que muestra que

a) la ciencia entrega un conocimiento sólo probable;

b) pueden existir regímenes políticos en que prevalecen consideraciones ideológicas extra-científicas;

c) la evolución de la ciencia es impredecible;

d) la ciencia y la tecnología no entregan felicidad.

18. Los cálculos de Aristarco permiten estimar la distancia Tierra-Sol en 22 (en realidad, son 400) unidades de la distancia Tierra-Luna. Aunque el error es bastante grande, una consecuencia cierta es que el tamaño del Sol es muchas veces más grande que el de la Luna porque:

a) el Sol produce mucho más calor comparado con la Luna;

b) el tamaño aparente de ambos cuerpos y observable desde la Tierra es muy semejante pero a distancias muy disímiles;

c) podemos observar características de la Luna a simple vista;

d) la Tierra es el centro del Universo.

19. El efecto Doppler indica que las ondas generadas por un emisor en movimiento disminuyen su período de oscilación en la dirección del movimiento y las aumenta en la dirección contraria. Por lo tanto,

a) el pitido de una locomotora será más agudo en la dirección del movimiento y más grave en la dirección contraria;

b) el efecto es exactamente contrario: suena más agudo cuando la locomotora se aleja;

c) el efecto Doppler no afecta nuestra percepción del sonido de la locomotora en movimiento;

d) lo afecta, pero se necesita un aparato especial para percibirlo.

20. Señale, dentro de las opciones listadas, lo que le parezca más claramente apoyado por la evidencia empírica de la Física:

a) la historia de nuestro Universo comienza con una Gran Explosión y no podemos afirmar nada de su historia antes de esta explosión;

b) el Universo pasa por estados alternativos de explosiones y de implosiones;

c) la secuencia de explosiones e implosiones dura eternamente;

d) pero con menos intensidad y duración.

21. En mecánica, los principios más generales fueron determinados por

- a) Aristóteles quien trató de entender la causa del movimiento de los cuerpos;
- b) por Kepler quien encontró las leyes que determinan el movimiento de los planetas;
- c) por Newton quien determinó que es necesario encontrar la fuerza que produce aceleración de las masas afectadas por esa fuerza;
- d) por Maxwell quien generalizó las leyes básicas del electromagnetismo.

22. La teoría de cuerdas describe las partículas elementales como

- a) masas muy pequeñas con cargas eléctricas;
- b) constituyentes del átomo y del núcleo;
- c) elementos químicos que resultan del Big Bang;
- d) oscilaciones de entes elementales muy pequeños que vibran en espacios de más de tres dimensiones.

23. Además de principios, basados en una generalización del conocimiento empírico, la estructura de la ciencia necesita formalmente para su desarrollo teórico:

- a) intuición para poder imaginar la existencia de entes muy abstractos que explican el Universo;
- b) lógica y matemáticas;
- c) apoyo financiero;

d) una actitud de admiración por la belleza del Universo.

24. El pensamiento mágico del hombre primitivo creaba entes responsables del acontecer de la Naturaleza:

- a) este pensamiento ha sido eliminado totalmente de la cultura humana;
- b) forma una parte permanente y eterna de la conciencia de gente ignorante;
- c) es tomado por el Arte como forma de describir poéticamente la Naturaleza y la Sociedad;

d) es sólo parte de la literatura infantil.

25. Un hoyo negro, como una masa concentrada espacialmente y altamente densa que, por lo tanto, absorbe a cualquier otro cuerpo que esté en su cercanía:

- a) es de existencia dudosa ya que implica la absorción de posibles observadores cercanos;
- b) corresponde al estado de masa antes de un Big Bang;
- c) es sólo un tema de ciencia ficción;
- d) no hay observaciones que confirmen la existencia de uno de ellos.

Agradecimientos.

Agradecemos la revisión del contenido y texto de la Guía de Estudio realizada por el Dr. Enríquez Gómez T. y Cristina Álvarez. También agradecemos a L.I. Humberto Benítez, quien estuvo a cargo del diseño y logística del evento.

Recibido: 15 de diciembre de 2017

Recibido corregido por el autor: 10 de enero de 2018

Aceptación: 15 de enero de 2018

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 a cualquiera de los editores principales:

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

Liga Pérez Cruz (UNAM)
perezcruz@geofisica.unam.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).

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:

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.

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.

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

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

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

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

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.

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.

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://](http://www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf)

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

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>

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

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

Ejemplos:

Tomado de Google Hearth (2014).

Modificado de Pérez (2014) p. 234.

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

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.

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

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Dora C. Carreón Feryre
Editores

GEOS
Información con:

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



