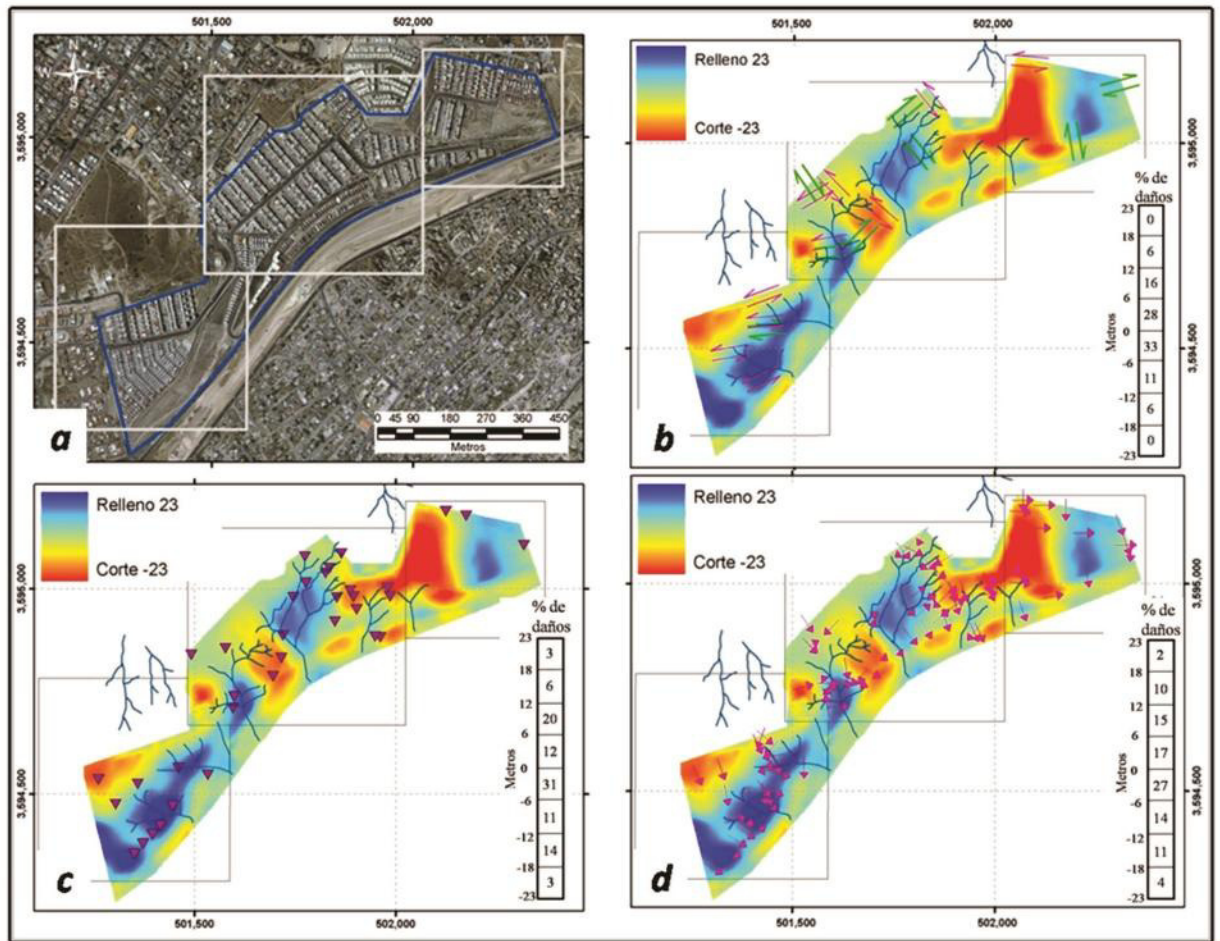


Geofísica



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 2012-2013

Dr. Julián Adem Chain
Presidente Honorario

Dr. Avto Gogichaishvili
Instituto de Geofísica, UNAM
Presidente

Dra. Tereza Cavazos
División de Oceanología, CICESE
Vicepresidente

Dra. Xyoli Pérez Campos
Instituto de Geofísica, UNAM
Secretario General

Dra. Blanca Mendoza
Instituto de Geofísica, UNAM
Secretario de Investigación

Dra. Ligia Pérez Cruz
Instituto de Geofísica, UNAM
Secretario de Difusión

Dr. José Rosas Elguera
Universidad de Guadalajara, CUVALLÉS
Secretario de Educación

Dr. Víctor Manuel Wong Ortega
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Tesorero

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Ligia Pérez Cruz
perezcruz@geofisica.unam.mx
UGM

Comité Editorial

Harald Böhnel, 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

Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez
Angel Daniel Peralta Castro
María Cristina Álvarez Astorga
Alejandro F. Nava Pichardo

GEOS, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, contiene artículos de investigación 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>

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 ...321

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

OBSERVACIONES DE CORRIENTES EN EL PARQUE NACIONAL DE CABO PULMO, BAJA CALIFORNIA SUR
Armando Trasviña Castro, Octavio Aburto Oropeza, Exequiel Ezcurra, Oleg Zaytsev ...323

FACTORES GEOLÓGICOS Y ANTRÓPICOS DE RIESGO EN TIJUANA, BAJA CALIFORNIA
Luis A. Delgado Argote, Juan Carlos Hurtado Brito, Porfirio Avilez Serrano, Gemma Gómez Castillo ...343

CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO GUADALUPE-BAÑUELOS, ESTADO DE ZACATECAS, MÉXICO
Diego Alonso Padilla-Reyes ...368

DIVULGACIÓN

EMPLEO DEL GPS EN ESTUDIOS DE GRAVIMETRÍA REGIONAL
César Jacques Ayala, Jorge Ramírez Hernández ...388

GAIA: DE HIPOTESIS A TEORÍA Y LA XVII OLIMPIADA DE CIENCIAS DE LA TIERRA
Enrique Gómez Treviño ...395

NOTA

NUEVA IMAGEN DE LA UNIDAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA DE LA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE ZACATECAS
Felipe de Jesús Escalona Alcázar, José de Jesús Fernández Avalos, Ernesto Patricio Núñez Peña, Jorge Bluhm Gutierrez, Santiago Valle Rodríguez, Eduardo Valdez Romero, Alicia Esparza Martínez, Saydé Reveles Flores, Ismael Sto Berumen, Juan Gilberto Moreno alanis, Cristian Fernando López Galván. ...405

COMUNICACIONES

POLÍTICA EDITORIAL ...409

¿Democratización de la ciencia en México?

La tendencia a mantener una atmósfera de expectativa es marcada cuando ocurre un cambio de sexenio pues hemos aprendido a desconfiar en los discursos. En ese ambiente, a principios de noviembre de 2012, senadores y representantes de más de 20 instituciones de educación superior (IES) e investigación dieron inicio formal a la Agenda Ciudadana de Ciencia, Tecnología e Innovación, una consulta nacional por Internet, en la que la población podía votar, hasta el 30 de enero, por los retos que considere más relevantes para el país, frente a los que la ciencia y la tecnología pueden ofrecer alternativas de solución. Hasta aquí, la consulta parece parte de un ejercicio amable de democracia donde, se menciona, podrán votar incluso menores de edad.

Aquí es donde termina la tranquilidad de la lectura. Cuando se dice que uno de los objetivos destacados de la iniciativa es acercar al ciudadano común a la ciencia, la tecnología y la innovación, haciendo que se reconozcan las aportaciones que estos sectores realizan en diferentes ámbitos de la vida cotidiana, no se puede evitar pensar si esa no es la función de los museos interactivos de ciencia (entre otros mecanismos), de los que ya hay varios en el país, y preguntarse si quienes diseñaron esta consulta los han visitado, y si han depositado comentarios en los buzones de sugerencias que todos los museos tienen. Y sobre la profundidad del análisis acerca de los alcances de la encuesta, el presidente de la Comisión de Ciencia y Tecnología de la Cámara de Diputados, comenta que los gobiernos deben adaptarse a las nuevas formas de participación ciudadana, como las que incluyen Internet y las redes sociales; además, que con estas y otras herramientas se debe hacer presente a la ciencia y la tecnología *hasta* (sic) que el ciudadano comprenda que los nuevos conocimientos y las nuevas soluciones tecnológicas contribuyen a la consolidación de una sociedad próspera y sustentable. Para terminar con esta presentación de hechos y declaraciones, se dice que los resultados se presentarán formalmente al nuevo gobierno, a los legisladores y al sector empresarial del país y que además, se elaborarán libros sobre cada uno de los 10 temas que mostrarán los resultados de la “reflexión conjunta de la sociedad y los académicos para proponer opciones de solución a los grandes problemas nacionales”. Nacen nuevas preguntas porque el desconcierto aumenta conforme hay nuevos comunicados: ¿se ponderarán las opiniones de acuerdo con la edad, escolaridad, ocupación, nivel en el SNI, antecedentes en puestos de designación popular, residencia rural o urbana, u otros conceptos? ¿Qué motiva realmente la consulta? ¿Se ha perdido la confianza en la comunidad científica, sus sociedades e IES para consultarlos sobre los temas que tanto preocupan a quienes administran los bienes públicos?

Será interesante ver el impacto de las casi 187 mil opiniones (la tercera parte del D.F.) en los temas que, de mayor a menor, han sido los favoritos: 1) sistema educativo con un enfoque humanístico, científico y tecnológico; 2) abasto de agua potable a toda la población; 3) desarrollo de un campo más productivo que logre la seguridad alimentaria; 4) conservación del medio ambiente; 5) sistema integral de salud para toda la población ; 6) energía limpia, sustentable, eficiente y de bajo costo; 7) una industria

aeroespacial mexicana competitiva; 8) migración y los derechos de ese sector; 9) cambio climático y 10) salud mental y adicciones. Si supusiéramos que el nivel más alto de conocimiento general y compromiso social está en los ambientes académicos, entonces la suma de los 17,637 miembros del SNI (cifra del 2011) y los 178,000 estudiantes de posgrado registrados en la matrícula nacional, rebasaría ligeramente el número de opiniones recibidas. ¿Qué porcentaje de los profesionales independientes o trabajadores de la iniciativa privada participó? ¿Qué número de maestros de los niveles básico a superior lo hicieron? y finalmente, ¿cómo estimar la calidad de la información que la población tiene en un país con las características del nuestro?

En este clima de declaraciones e incertidumbres se menciona que, considerando que el año anterior parte del presupuesto lo ejerció la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y no el CONACYT, el incremento al presupuesto 2013 en el ramo 38 (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) es el mayor que se ha otorgado en los últimos ocho años. Podríamos iniciar otra ronda de preguntas.

Observaciones de corrientes en el Parque Nacional de Cabo Pulmo, Baja California Sur: mediciones Eulerianas en verano, otoño e inicios del invierno

Armando Trasviña Castro^{1*}, Octavio Aburto Oropeza², Exequiel Ezcurra³, Oleg Zaytsev⁴

¹CICESE, Unidad La Paz, La Paz, BCS, México 23050, ²Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA 92093,

³UC MEXUS, University of California Riverside, CA 9252, ⁴CICIMAR-IPN, La Paz, BCS.

* En estancia sabática en el Departamento de Biología Marina, UABCS, La Paz, BCS.

RESUMEN

Se reportan resultados de de observaciones de corrientes efectuadas entre octubre de 2010 y febrero de 2012 en el Parque Nacional de Cabo Pulmo, Baja California Sur, México. Los resultados confirman que existen corrientes costeras debidas a las contribuciones de la marea, del viento y de estructuras de mesoescala, estas últimas relacionadas con la circulación de la entrada al Golfo de California. Las corrientes tienen una circulación neta y estudiamos sus cambios en el año a través de diagramas de desplazamiento para cada sitio de observación. Estos diagramas se interpretan solo como persistencia del flujo. Durante otoño e invierno, y en ocasiones también en verano, los desplazamientos netos son hacia el sur. Los desplazamientos hacia el norte del sitio de observación se relacionan con un evento de vientos del sureste en octubre del 2011. La dominancia de los desplazamientos hacia el sur se atribuye a la importancia de los vientos del noroeste para determinar la circulación costera de Cabo Pulmo y, en general, para toda la entrada al Golfo de California.

INTRODUCCION y ANTECEDENTES

El lugar donde realizamos este estudio es la plataforma continental del Parque Nacional de Cabo Pulmo (entre la zona de rompiente del oleaje y el mar abierto en la cota de 200 m de profundidad), en el extremo sur de la península de Baja California. En esta zona las corrientes se deben principalmente a la influencia del viento y la marea. Es importante destacar que en este trabajo no incluimos estudios de la zona de la rompiente, ni entre la rompiente y la playa. Allí, la circulación y el transporte litoral de arena se deben a la interacción del oleaje con el fondo y con la línea de costa, y las metodologías para su estudio son muy distintas a las que usamos aquí.

El parque está situado en el extremo sur de la Península de Baja California, en la costa del Golfo de California, a una latitud tropical (23.5° N, Fig. 1). No obstante esta localización, las condiciones oceanográficas no siempre son cálidas y es usual encontrar condiciones subtropicales parte del año. Ello se debe a que el Parque se encuentra en la región oceanográfica transicional de la entrada al Golfo de California. Esta región tiene influencia de las aguas cálidas del Golfo de California y del Pacífico tropical mexicano, pero también llegan aguas frías de la Corriente de California (Castro et al., 2006). Por consiguiente, se pueden esperar cambios estacionales en los ensambles de organismos pelágicos que se acercan a este parque marino.

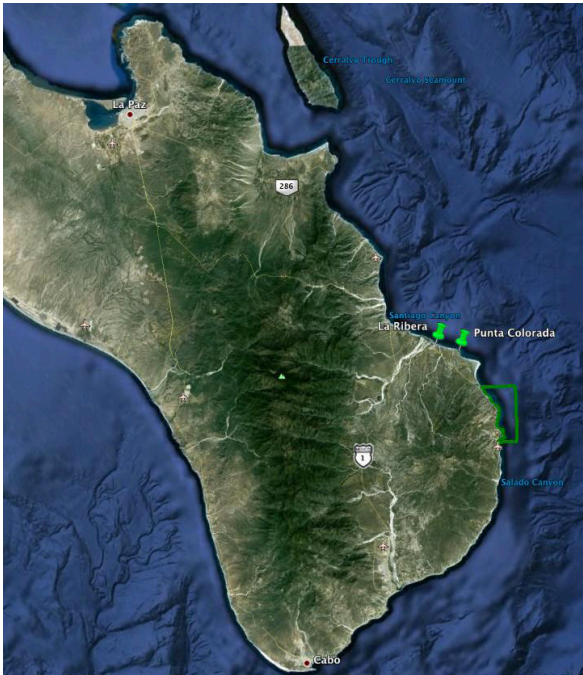


Figura 1. Izquierda: localización de la zona de estudio en el Golfo de California (mapa de Google Earth). La poligonal del Parque Nacional es la línea verde. En el centro de la poligonal la latitud es 23.5° N.

No conocemos trabajos publicados sobre las corrientes de la plataforma continental de Cabo Pulmo. Sin embargo, hay muchos estudios de la circulación en el mar profundo adyacente. Desde que se publicó el trabajo pionero de Gunar I. Roden (1972) sabemos de la existencia de chorros de corriente cercanos a la costa. Este autor describe estos chorros como ‘... corrientes costeras con un núcleo de alta velocidad, de 30 km de anchura, velocidades superiores a los 30 cm s⁻¹ y que alcanzan desde la superficie hasta los 700 m de profundidad...’. El trabajo de Collins et al. (1997) es el primero en reportar la presencia de núcleos de alta salinidad en la costa de Cabo Pulmo. Señala como causa posible la presencia de las corrientes de chorro. Estos chorros parecen ser capaces de acarrear aguas desde el interior del

Golfo de California, sobre el parque y hacia el sur, hasta el Océano Pacífico adyacente. En la tesis de licenciatura de Alvarado-Graef (1998) se reportan observaciones a lo largo de secciones hidrográficas perpendiculares a la costa. En muchas de éstas es común encontrar chorros costeros, tanto sobre el talud como sobre la plataforma continental de Cabo Pulmo. Ya en el presente siglo Mascarenhas et al. (2004) reportan secciones de la entrada al Golfo de California donde también hay corrientes de chorro frente a Cabo Pulmo, que se dirigen tanto hacia el norte como hacia el sur. Estos autores describen en detalle las estructuras frontales que generan los chorros y muestran la existencia de cortes horizontales de velocidad muy significativos.

En este trabajo se reportan las observaciones de la circulación realizadas entre octubre de 2010 y febrero de 2012. Estas incluyen mediciones de corrientes realizadas en puntos fijos (observaciones Eulerianas) mediante equipos acústicos autónomos instalados en el fondo marino. También incluimos series de tiempo puntuales de temperatura, nivel del mar y de variables meteorológicas, como apoyo para la discusión de la circulación.

En varias ocasiones durante el trabajo de campo realizamos observaciones de corrientes con boyas a la deriva (observaciones Lagrangeanas). Estas se hicieron en series cortas, de unas cuantas horas a la vez, y son de más utilidad para estimar dispersión y difusividad sobre el arrecife. Presentaremos estos resultados junto con las observaciones hidrográficas en otro documento. El presente trabajo estará enfocado a discutir la información que generamos sobre la circulación costera.

Separamos la presentación en tres secciones. La primera es la descripción de la metodología; la segunda es la discusión de las observaciones y la tercera es el sumario de las conclusiones y recomendaciones.

METODOLOGÍA

Instalamos equipos perfiladores de corrientes en las posiciones que se indican en la figura 2 y en la Tabla 1. Durante 2010 instalamos un ADP (siglas en inglés de Perfilador Acústico Doppler) marca Sontek que emite a una frecuencia de 500 KHz. Este instrumento lo configuramos para medir las corrientes de 20 m de profundidad hacia la superficie, en capas de dos metros de grosor. También instalamos un par de ADCPs (siglas en inglés para Perfilador Acústico Doppler de Corrientes) marca TRDI, que emiten a 1200 KHz (figura 2). Estos los configuramos para medir los perfiles de la corriente cada 10 minutos, en los 20 m superficiales, también en capas de dos metros de grosor. El ADP se instaló al norte del Parque Nacional, aproximadamente a 2.5 millas náuticas de la costa de Las Barracas; el ADCP 1 se ancló en el centro, a poco más de 1.5 millas mar afuera del poblado y el ADCP 2 a media milla de la costa, en el sur del Parque Nacional cerca del cerro de Los Frailes. A lo largo de la costa la distancia entre perfiladores es de 2.5 millas náuticas, aproximadamente (figura 2).

También medimos las corrientes con flotadores. Este método complementa las observaciones de los perfiladores acústicos. Tiene la ventaja de que proporciona mediciones a lo largo del área

de interés y puede servir para identificar zonas de remanso, o de intensificación, del flujo. Los flotadores que construimos para este proyecto constan de una cruceta de tela plástica que sirve como elemento de arrastre, y un mástil central que soporta las boyas de flotación y contiene un equipo de posicionamiento global (GPS). El GPS graba el tiempo y las posiciones del flotador durante su estancia en el agua. Con las posiciones calculamos las velocidades a lo largo del trayecto. Este método requiere de vigilancia constante para garantizar la recuperación de los flotadores. A esto le llamamos 'pastoreo' de flotadores. Es un método muy efectivo pero tiene dos limitaciones importantes: 1) sólo podemos medir durante las horas de luz y 2) sólo podemos trabajar cuando las condiciones del mar son buenas para navegar con embarcaciones pequeñas. Actualmente estamos desarrollando una metodología mediante seguimiento satelital que aplicaremos en los próximos meses para obtener información más completa de los flotadores. Por estos motivos aquí las observaciones Lagrangeanas se reportarán por separado.

Instalamos una estación meteorológica Davis para registrar dirección y velocidad del viento, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica. Instalamos también un par de sensores de presión marca ONSET (HOBO U20). Uno se instaló en el anclaje del ADP, a 20 m de profundidad, y el otro en tierra para medir presión atmosférica. La presión atmosférica se resta de la presión registrada por el instrumento sumergido para conocer el nivel del mar. Este instrumento también mide la temperatura.

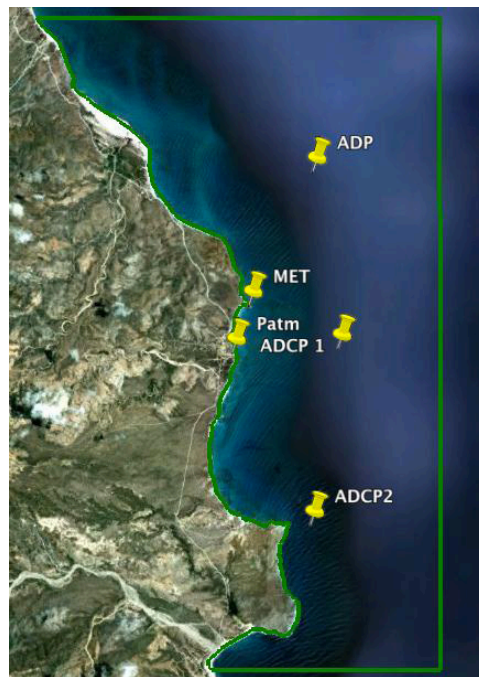


Figura 2. Posición de los instrumentos sobre una foto obtenida de Google Earth. La línea verde delimita el Parque Nacional. Se señala la posición de los tres perfiladores de corrientes: al Norte (ADP), al centro un perfilador (ADCP 1) con un sensor de presión y al sur el tercer perfilador (ADCP 2). La estación meteorológica se instaló en el Cabo Pulmo (MET) y un sensor de presión atmosférica en una casa de la localidad (Patm).

Tabla 1. Posiciones de los anclajes con perfiladores acústicos. Aunque estas corresponden al último periodo de observación los anclajes siempre se instalaron alrededor de estos puntos. En el sitio del ADP se incluyó también un sensor de presión marca ONSET para registrar variaciones del nivel del mar.

Instrumento	Latitud	Longitud	Prof. (m)	Referencia
ADP SONTEK 500 KHZ	23°28.253'N	109°24.642' W	24.4	Frente a Las Barracas
ADCP 1 RDI 1200 KHz No 3664	23°26.302' N	109°24.466' W	16.5	A un lado del Cantil
ADCP 2 RDI 1200 KHz No 5457	23°24.109' N	109°24.675' W	20.8	Frente a Las Casitas

Tabla 2. Datos de los diferentes instrumentos hasta febrero de 2012.

INSTRUMENTO o tipo de medición	2010			2011								2012					
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2
ADP																	
ADCP1																	
ADCP2																	
FLO																	
NM																	
TEM																	
MET																	

La información que hemos generado hasta febrero de 2012 se resume en la Tabla 2. Aquí sólo presentaremos datos de dos perfiladores acústicos: el ADP para el período de octubre a diciembre de 2010 y el ADCP 1 para el período de agosto 2011 a diciembre de 2012. El ADP se configuró para medir las corrientes cada 30 minutos, en celdas de 2 m. Los ADCPs se configuraron para medir las corrientes cada 10 minutos, en celdas de 1 m de grosor.

Las observaciones de los ADCP 1 y 2 son parecidas y por esto sólo se presentan los datos del equipo del sur (ADCP 2). Se instalaron ambos equipos para contar con redundancia, en caso de que alguno de los perfiladores presentara una falla. No tenemos datos en el periodo de enero a septiembre de 2011. A pesar de que el ADP estuvo instalado en esas fechas este equipo falló porque explotaron las baterías dentro de la caja de presión y en consecuencia el instrumento dejó de grabar. Descontando las fallas instrumentales y otras dificultades, actualmente contamos con datos de corrientes en tres estaciones del año: otoño e inicios del invierno de 2010 (datos del ADP), y verano, otoño y parte de invierno de 2011 (datos del ADCP 1 y 2).

Los datos de los perfiladores acústicos se consideran del tipo Euleriano porque representan observaciones del flujo en un punto fijo. En teoría es posible estimar el comportamiento corriente arriba de las parcelas de fluido que llegan al punto de observación. Esto es equivalente a estimar el comportamiento Lagrangeano de las corrientes a partir de mediciones Eulerianas. Hacerlo con un solo punto de observación implica suponer que las corrientes Eulerianas

representan el comportamiento de todo el campo de velocidad. Esta es una suposición que no necesariamente se cumple. Los desplazamientos que presentamos en este trabajo se calculan integrando cada una de las componentes de la velocidad y se grafican en un plano horizontal. Estos desplazamientos se usan exclusivamente para conocer las tendencias del flujo en el punto de observación. Independientemente de su validez para todo el campo de velocidad, los desplazamientos que presentamos aquí son una medida de la tendencia acumulativa del flujo en ese punto de observación. Estos gráficos nos permiten visualizar los cambios en la dirección neta del desplazamiento de una parcela que pasa por el punto de observación, afectada por el forzamiento periódico de la marea y por influencias tales como el viento y las corrientes de origen remoto.

Las observaciones Lagrangeanas (FLO, por flotadores, en la Tabla 2) se hicieron en mayo, junio, agosto, septiembre y octubre de 2011. Estas son series cortas de unas cuantas horas de duración. Servirán para describir otras características del flujo relacionadas con la dispersión de partículas, pero no se incluyen en este trabajo.

Discusión de los resultados

Variables meteorológicas

Iniciaremos con la discusión de la información meteorológica. Los vientos constituyen uno de los forzamientos más importantes de la zona costera y generan corrientes locales importantes. También pueden modificar las características de las corrientes remotas que arriban a la zona de interés. La estación meteorológica generó datos entre junio de 2011 y enero de 2012 y siguió funcionando hasta febrero.

La figura 3 contiene rosas de los vientos mensuales. La dirección indica de donde viene el viento, según la convención meteorológica. Entre junio y septiembre la dirección dominante del viento es del sureste. Las intensidades más frecuentes son entre 4 y 10 m/s, y en pocas ocasiones alcanzan 12 m/s. A partir de octubre se observa un cambio de la dirección dominante del viento y a partir de noviembre dominan los vientos del noroeste. En octubre las intensidades son bajas, siempre menores a 10 m/s, pero de noviembre en adelante hay muchos días en que se alcanzan los 10 m/s y es más común que se registren 12 m/s. En esta gráfica destaca la clara dominancia de los patrones estacionales de gran escala sobre las brisas locales.

En la figura 4 se observan otras variables meteorológicas para los meses de junio a agosto (JJA). Las temperaturas son relativamente frescas en junio con muchos días menores a 25°C. En julio y agosto los valores se mantienen alrededor o por encima de los 30°C. Las humedades relativas promedian 80%, pero sus variaciones diurnas pueden disminuir a 60%. Algunos eventos de corta duración en los que la humedad disminuye a 40% están probablemente asociados al arribo de vientos de tierra. La presión atmosférica se mantiene alta durante todo el período. Sólo a principios de julio se registra una depresión de aproximadamente 10 milibares (de 1010 a 1000), asociada al paso de una depresión tropical afuera del Golfo de California.

La figura 5 muestra las temperaturas, humedades y presión para Septiembre, Octubre y Noviembre (SON). Las temperaturas se mantienen alrededor de 30°C en septiembre y parte de octubre. Es

sólo hacia finales de octubre que los valores muestran una tendencia clara a bajar. A fines de noviembre las temperaturas medias diarias se encuentran alrededor de los 24°C. Las humedades relativas siguen elevadas, alrededor del 80%, con variaciones diurnas que pueden disminuir hasta 60%. Se siguen registrando eventos en los que la humedad puede bajar a 40%, probablemente debido a vientos de tierra. La presión atmosférica se mantiene alta durante todo el período y exhibe tendencia a aumentar. En septiembre el promedio se encuentra alrededor de 1010 mb y a fines de noviembre alcanza un promedio diario de 1015 mb.

La figura 6 contiene las temperaturas, humedades y presiones de diciembre, a enero y febrero de 2012 (DEF). Las temperaturas descienden a un valor promedio de 20°C y sólo pocos días alcanzan valores de 25°C. La variación de la humedad relativa es mayor que en otros meses. Esto se debe a que los eventos de viento típicos de esta época no siempre acarrear masas de aire húmedo. En ocasiones acarrear condiciones secas. Se registraron eventos de más de 80% y decrementos bruscos a valores de 20% de humedad. La presión atmosférica se mantiene alta durante todo el período, con períodos largos que oscilan alrededor de 1015 mb y sólo eventos de corta duración en los que disminuye a 1010 mb.

Corrientes en la zona costera

A continuación presentamos los resultados de las observaciones de corrientes en los diferentes períodos de observación. Primero mostraremos los datos del perfilador instalado en la parte norte del Parque (ADP, Fig. 2), entre octubre y diciembre de 2010. Posteriormente se

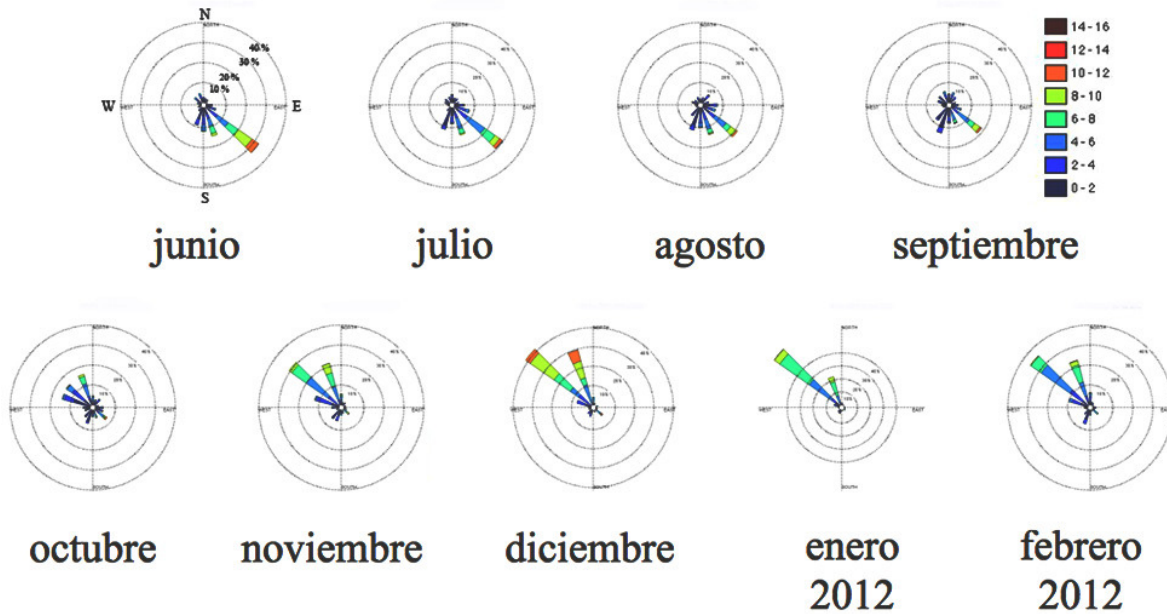


Figura 3. Rosas de los vientos de junio de 2011 a febrero de 2012, los colores (según la escala de septiembre) indican la intensidad del viento en metros por segundo y los círculos concéntricos el porcentaje de frecuencia en cada dirección (como en junio de 2011). La dirección es ‘de donde viene’ el viento según la convención meteorológica. El mes de enero de 2012 presenta una alta frecuencia de vientos del noroeste (>50 %) y por eso los círculos concéntricos son más chicos.

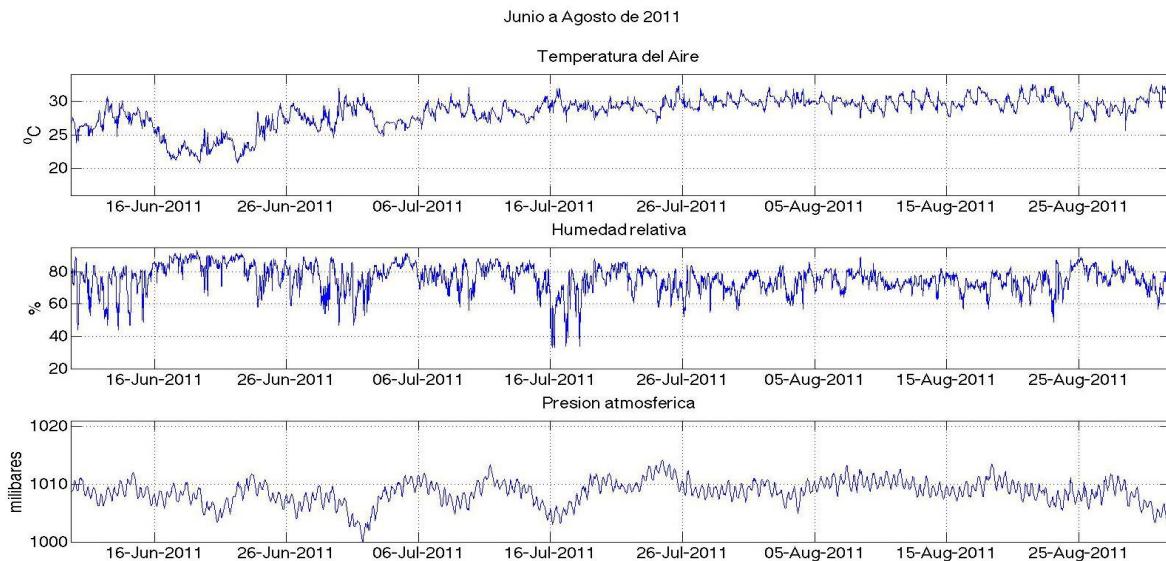


Figura 4. Variables meteorológicas de junio, julio y agosto (JJA) de 2011: temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica.

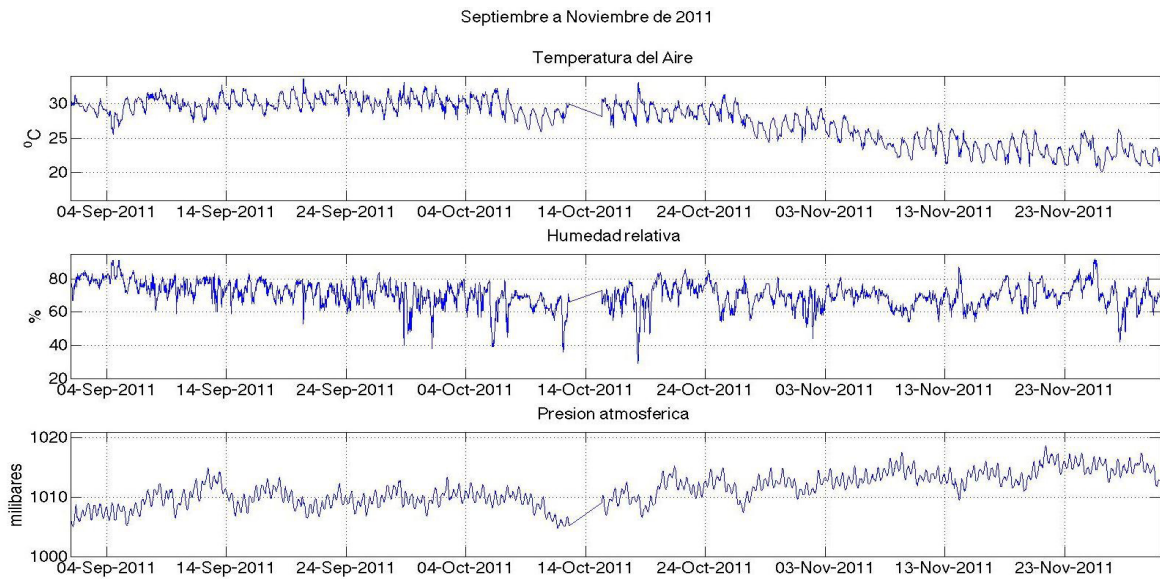


Figura 5. Variables meteorológicas durante septiembre, octubre y noviembre (SON) de 2011. Arriba: temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica.

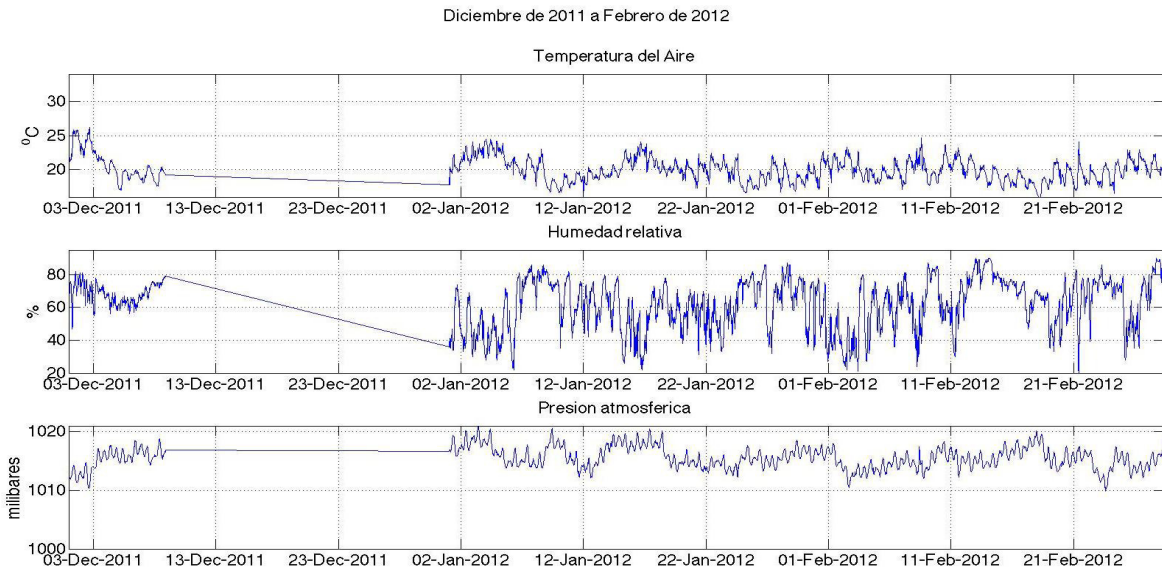


Figura 6. Variables meteorológicas durante diciembre, enero y febrero (DEF) de 2011-2012. Temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica

describen las observaciones del perfilador del sur (ADCP 2, Fig. 2), entre septiembre de 2011 y febrero de 2012. Hay muchos aspectos de las corrientes que pueden ser de interés pero enfocaremos el análisis a la variabilidad del flujo a lo largo de la costa.

Primer período de observación de corrientes (29 de septiembre al 31 de diciembre de 2010).

Estos datos provienen del perfilador ADP en el norte del Parque (Fig. 2). Durante los tres meses se observan comportamientos cambiantes que describiremos a continuación. En general esperamos observar corrientes debidas al viento y a la marea. El esfuerzo del viento actúa sobre la superficie y genera corrientes que disminuyen hacia el interior del fluido. El comportamiento de la corriente de marea es distinto. Desde la solución a las ecuaciones de marea de Laplace sabemos que la corriente de marea es barotrópica (ver, por ejemplo Gill, 1982). Y la razón de esto es que la atracción gravitacional actúa sobre todo el fluido. Por esto es que las corrientes de marea generan corrientes de la misma magnitud en toda la columna, exceptuando sólo la capa límite superficial (donde el viento actúa) y una delgada capa cerca del fondo donde la fricción domina sobre otros efectos. Otros forzamientos como la advección debida al oleaje (deriva de Stokes) también ocurren pero las observaciones que estamos discutiendo no son apropiadas para describirla. Esto se debe a que la frecuencia de muestreo es baja (10 minutos o más) y también a la orientación de los perfiladores acústicos (en el fondo, viendo hacia arriba) que impide la observación de fenómenos muy cerca de la superficie.

Para este período de observación no

contamos con mediciones meteorológicas. Nos apoyaremos en el patrón estacional descrito en la sección anterior con datos de 2011 y 2012. Allí destaca la ocurrencia de vientos del sureste en el verano y los vientos del noroeste en el otoño e invierno, típicos de la variación estacional del Golfo de California. Tampoco tenemos mediciones de nivel del mar. Por esto es que usamos predicciones de marea para Cabo San Lucas, disponibles gracias al grupo de mareografía del CICESE.

Estos tres meses de datos tienen en común que las velocidades más altas se encuentran siempre en el registro más cercano a la superficie y disminuyen hacia el fondo. Sin embargo el principio y el final del registro muestran comportamientos contrastantes que describiremos a continuación.

La figura 7 corresponde a las corrientes del mes de octubre de 2010. En azul se muestra el registro superficial (3 m), en negro a media agua (11 m) y en verde cerca del fondo (a 19 m de profundidad). Los primeros 10 días observamos un flujo intenso hacia el norte que se registra en toda la columna de agua. La magnitud de las velocidades disminuye desde máximos de 0.6 m/s en superficie hasta valores de 0.3 m/s cerca del fondo. El resto del mes las corrientes dominantes son lentas y muestran una clara periodicidad diurna. En esta parte del registro se observan dos situaciones. Cuando las velocidades son muy bajas, por ejemplo alrededor del 20 de octubre, su magnitud es de unos 0.25 m/s en toda la columna de agua. En otros momentos se observa intensificación superficial moderada. Por ejemplo, alrededor del 27 de octubre un perfil vertical muestra valores máximos superficiales de 0.4 m/s, 0.3 m/s a media agua y 0.25 m/s cerca del fondo.

La figura 8 muestra dos series de tiempo adicionales. En el panel de arriba comparamos la magnitud de la corriente a media profundidad con la predicción de la marea para Cabo San Lucas. La intensificación del flujo hacia el norte que ocurre los primeros 10 días de octubre coincide con una de las mareas vivas del mes. Sin embargo, en el siguiente período de mareas vivas las corrientes son muy débiles. El panel inferior de esta figura muestra el registro de temperatura del perfilador acústico (a 20 m de profundidad). Durante el evento de corrientes intensas hacia el norte las temperaturas presentan variaciones de pocas horas donde la temperatura cambia hasta 6°C (entre 23° y 29°C). El registro de temperatura deja de mostrar esta variabilidad el resto del mes. Creemos que ello se debe a un evento de viento que modificó todos los registros a principios de octubre, mientras que el resto del mes la variabilidad que registramos se debe a la dominancia de las corrientes de la marea.

Las rosas de corriente sirven (figura 9) para mostrar la estadística de direcciones y velocidades de la corriente. También indican la dirección persistente del flujo. En la superficie (panel izquierdo) se observan dos direcciones dominantes. La corriente hacia el norte alcanza valores más altos y aproximadamente 30% de las observaciones siguen esta dirección. Un porcentaje menor, cercano al 15% se dirige hacia el sureste. El 55% restante no presenta preferencia direccional clara pero son las corrientes más débiles. A media agua (panel central) este patrón se repite aunque con velocidades menores, y se incrementa un poco la proporción del flujo hacia el SE. Cerca del fondo (panel de la derecha) aumenta la variabilidad al mismo tiempo que las velocidades disminuyen.

El desplazamiento neto que resultaría de impulsar una parcela de agua con estas corrientes se describe en las gráficas de la figura 10. Esta es una medida de la persistencia del desplazamiento, en un punto fijo, debido a las corrientes medidas durante el mes. No debe confundirse con el desplazamiento Lagrangeano. En todos los casos, superficie (panel izquierdo), media agua (panel central) y fondo (panel izquierdo) se dirige hacia el norte. De manera consistente con las observaciones de corrientes, la magnitud del desplazamiento disminuye con la profundidad. Cerca de la superficie alcanza más de 250 km hacia el norte de su posición inicial. Bajo la superficie es de más de 150 km hacia el norte del punto de inicio. Esto se debe principalmente al evento de corriente hacia el norte que se describió con anterioridad.

Las corrientes de diciembre (Fig. 11) muestran un comportamiento muy diferente al de octubre (Fig. 7). Se midió un flujo intenso hacia el sur durante la primera quincena del mes. Este flujo se observa en toda la columna de agua y, aunque las velocidades disminuyen hacia el fondo lo hacen de manera muy gradual. En la superficie, los valores máximos alcanzan 0.5 m/s hacia el sur, mientras que a media agua disminuyen a 0.45 m/s y cerca del fondo a 0.4 m/s. Esto puede ser causado por un evento de viento o por un remolino de mesoescala que se acerca a la costa, o por ambos eventos que suceden al mismo tiempo. Dado que no contamos con registros de viento nos resulta imposible discernir la causa. El resto del mes las corrientes regresan a las magnitudes atribuibles a la marea. Presentan el vaivén diario de la dirección del flujo y las velocidades son débiles (0.2-0.3 m/s) y muy parecidas en magnitud en toda la columna de agua

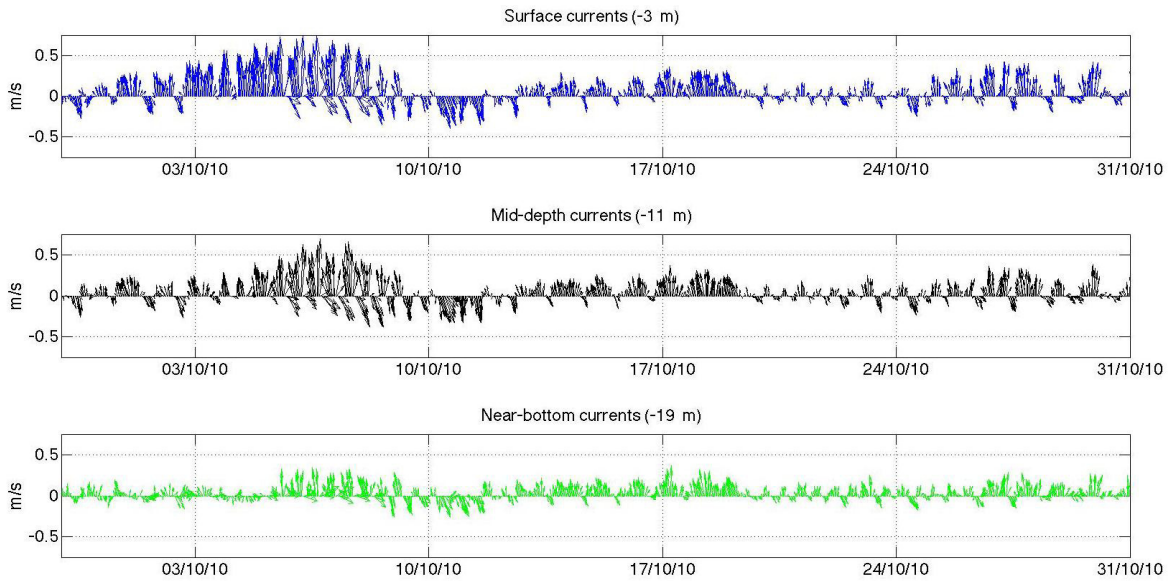


Figura 7. Diagramas de astilla de las corrientes de octubre 2010 a tres profundidades: superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

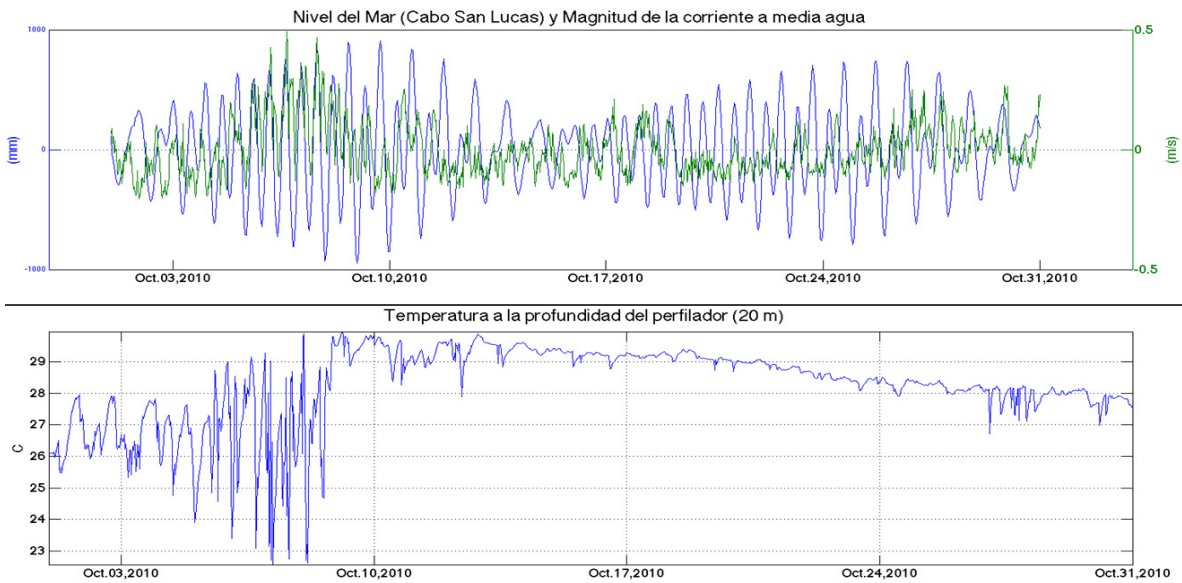


Figura 8. Arriba: comparación entre el nivel del mar (Cabo San Lucas, sin tendencia) y la magnitud de la corriente a media agua (11 m). Abajo: temperatura a la profundidad del ADP (20 m).

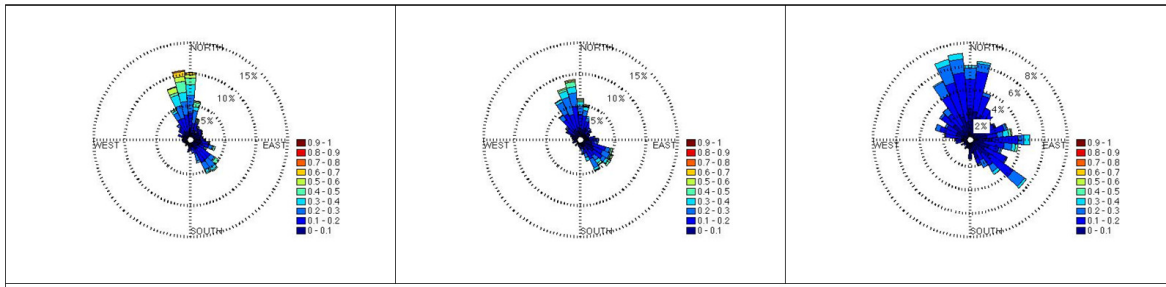


Figura 9. Rosas de corriente de octubre 2010. Los ángulos indican hacia donde se dirige la corriente. Los colores indican la velocidad (rojo 1 m/s, azul 0.1 m/s) y el largo de las barras indica la persistencia del flujo en esa dirección. Los círculos concéntricos marcan el porcentaje de observaciones que alcanzan esa categoría. Izquierda es la superficie, centro corresponde a media agua y derecha es el fondo.

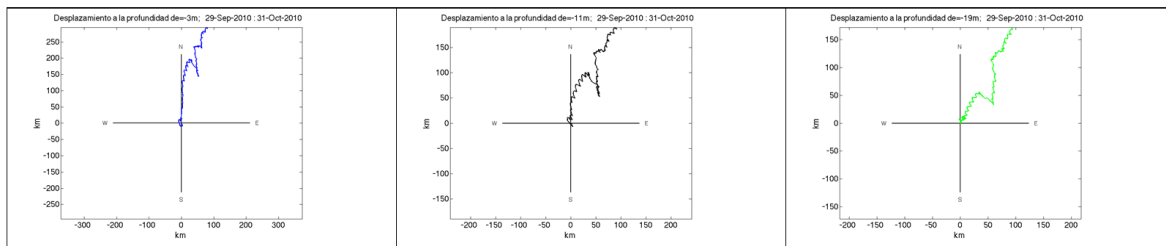


Figura 10. Desplazamiento de partículas en kilómetros y a las tres profundidades (octubre de 2010): superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

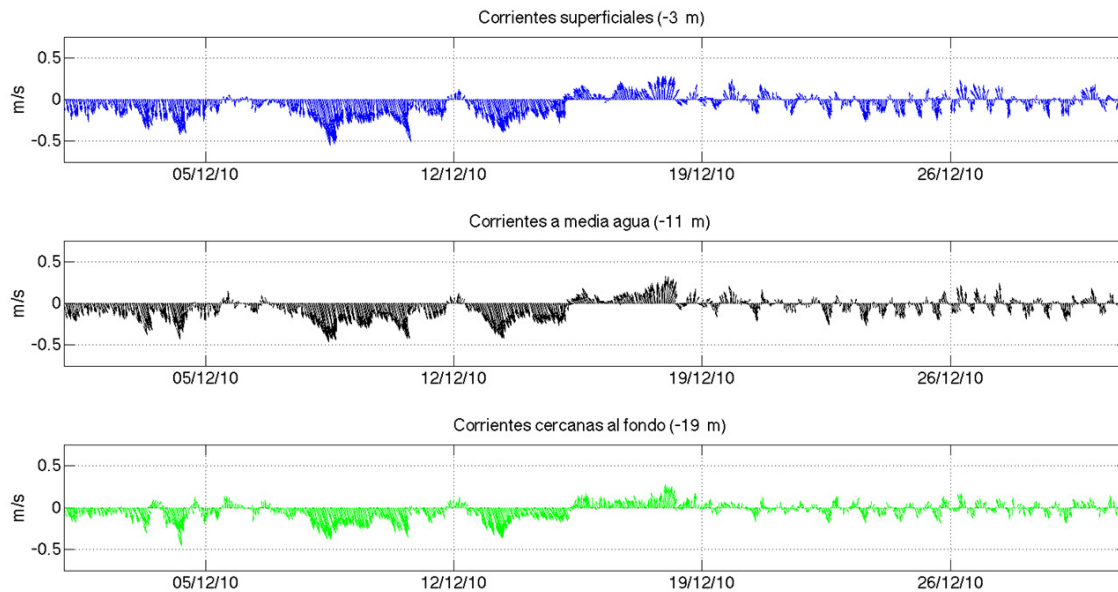


Figura 11. Diagramas de astilla de las corrientes de diciembre 2010 a tres profundidades: superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

La dirección de la corriente persistente de diciembre (Fig. 12) es muy diferente a la anterior. Entre 40 y 45% de las observaciones hechas en toda la columna de agua se dirigen ahora hacia el sureste. Las velocidades máximas en la superficie alcanzan 0.6 m/s pero cerca del fondo se siguen observando velocidades de hasta 0.5 m/s. Es claro que en esta representación de las observaciones domina el evento de la primera quincena de diciembre.

En consecuencia, el desplazamiento neto

para diciembre de 2010, como se muestra en la figura 13, se dirige hacia el sur en los tres niveles. Cerca de la superficie (panel izquierdo) el desplazamiento alcanza los 250 km en el mes. A media agua (panel central) alcanza 200 km y cerca del fondo (panel derecho) llega a 150 km. Estos son valores significativos que resultan de los patrones de corriente más persistentes en la figura 11. La corriente de marea que se registra al final de diciembre es capaz de producir sólo pequeños desplazamientos netos.

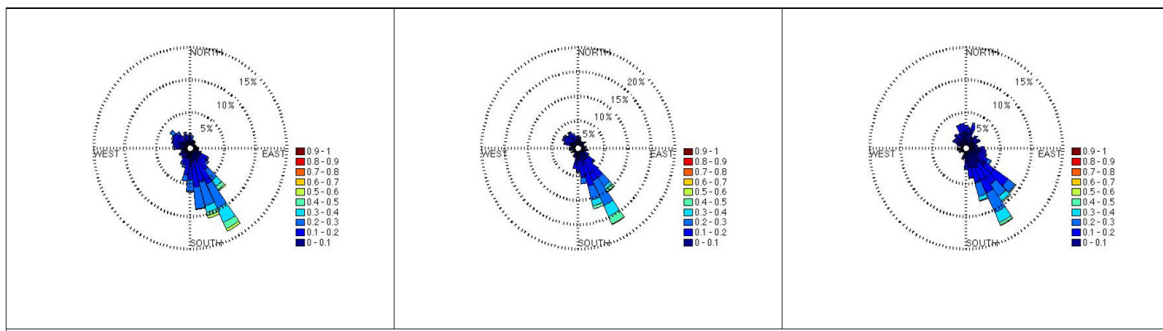


Figura 12. Rosas de corrientes de diciembre 2010. Los ángulos indican hacia donde se dirige la corriente. Los colores indican la velocidad (rojo 1 m/s, azul 0.1 m/s) y el largo de las barras indica la persistencia del flujo en esa dirección. Los círculos concéntricos marcan el porcentaje de observaciones que alcanzan esa categoría. Izquierda es la superficie, centro corresponde a media agua y derecha es el fondo.

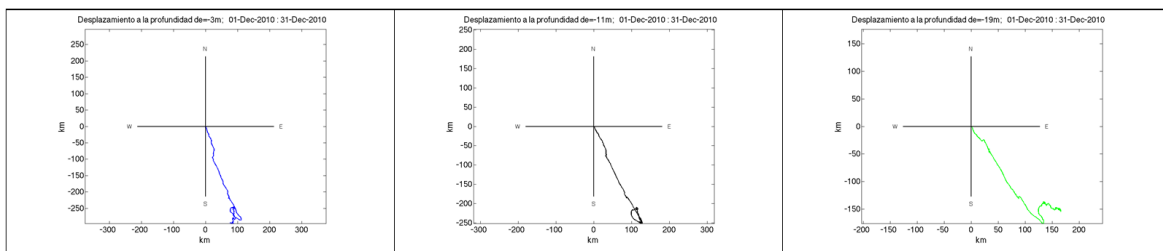


Figura 13. Desplazamiento de partículas a las tres profundidades (diciembre de 2010): superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

Segundo período de observación de corrientes (14 de septiembre de 2011 al 4 de enero de 2012).

Estos datos provienen del perfilador ADCP 2, instalado en la parte sur del parque (Fig. 2). Con estos datos describiremos las observaciones en fechas comparables a las de 2010 para también entender un poco sobre la variabilidad natural de las corrientes en estos dos años consecutivos.

En la primera mitad de octubre de 2011 (Fig. 14) no se presenta un flujo dominante. Se observan corrientes periódicas en toda la columna de agua, más intensas en la superficie. La velocidad máxima superficial alcanza 0.3 m/s y bajo la superficie es < 0.2 m/s. Los vientos de la figura 3 muestran brisas débiles y un evento débil de viento del noroeste, quizás intensificadas por brisas en la superficie pero exhiben una dirección dominante. Alrededor del 12 de octubre hay una interrupción en las observaciones y después se observa cómo se intensifican las corrientes en toda la columna de agua. Este comportamiento de las corrientes en la segunda quincena de octubre es distinto a lo observado en 2010. En la superficie se observan las corrientes más intensas particularmente del 21 al 22 de octubre de 2011 y de nuevo después del 25 de octubre. Bajo la superficie se observa un flujo intenso en toda la columna de agua, con variaciones de período diurno. Sólo durante el 21 y 22 de octubre el flujo se dirige hacia el sur en toda la columna de agua, durante al primer evento de viento del noroeste. En esas fechas la estación meteorológica registró velocidades del viento de casi 12 m/s, con dirección proveniente del noroeste. Hacia finales del mes hubo otro evento de viento del noroeste pero de magnitud menor, con vientos máximos de 8 m/s.

En el panel superior de la figura 15 comparamos la magnitud de la corriente a media agua (11 m) con el nivel del mar del sensor de presión que instalamos en Cabo Pulmo. Aquí se observan más claramente los dos períodos del mes de octubre que mencionamos antes. Todo el mes las corrientes exhiben una periodicidad similar a la de la marea. La diferencia es que en la primera quincena los flujos son muy débiles (menores a 0.2 m/s) y el resto del mes las velocidades se intensifican hasta 0.3 m/s. El panel inferior de la figura 15 muestra el registro de temperatura del mismo sensor de presión, a 20 m de profundidad. Durante todo el mes se registraron eventos de enfriamiento de corto período. Del 1 al 10 de octubre las temperaturas descendieron hasta 4 grados, desde 31° hasta 27°C en pocas horas. Después de un período de poca actividad, a partir del 16 de octubre se vuelven a registrar eventos de enfriamiento cerca del fondo. Aunque las temperaturas máximas disminuyen gradualmente, algunos eventos vuelven a enfriar el agua más de 4 grados. Los eventos que ocurren después del 20 de octubre corresponden a eventos de vientos del noroeste. Para el resto de los casos no tenemos una explicación clara porque el viento que registró la estación meteorológica fue débil todo el resto del mes.

En la figura 16 se muestra la Rosa de Corrientes para describir la persistencia del flujo. En la superficie (panel de la izquierda) el flujo exhibe tres direcciones distintas de circulación. A media profundidad (panel del centro) predomina el flujo a lo largo de la costa (40% hacia el norte o sur). Cerca del fondo (panel derecho) también se observa la predominancia del flujo a lo largo de la costa sobre las otras direcciones, aunque el rango de direcciones observadas es

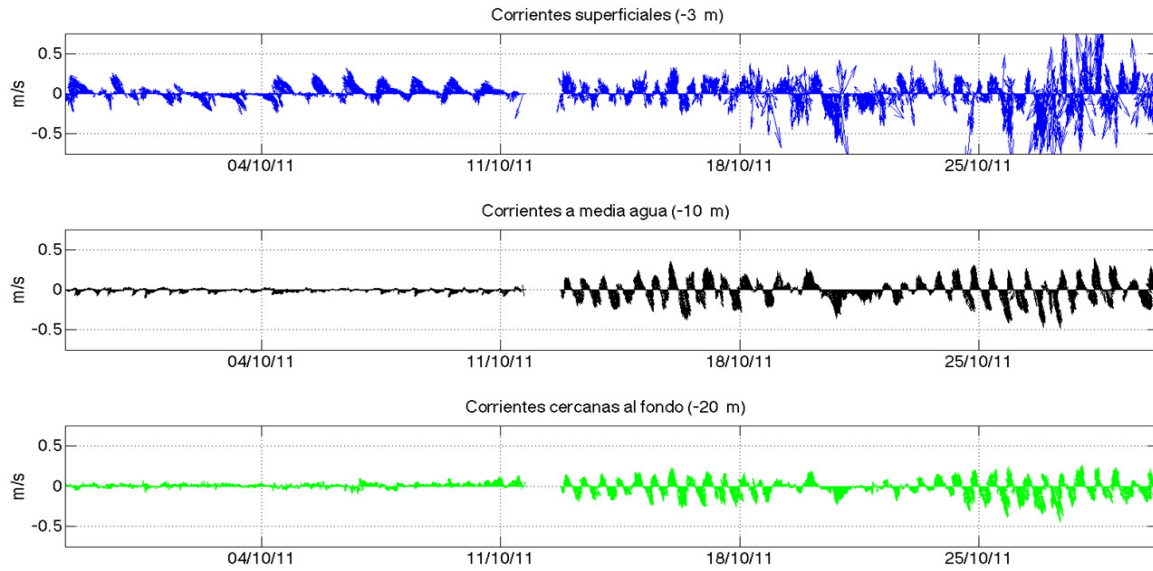


Figura 14. Diagramas de astilla de las corrientes de octubre 2011 a tres profundidades: superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

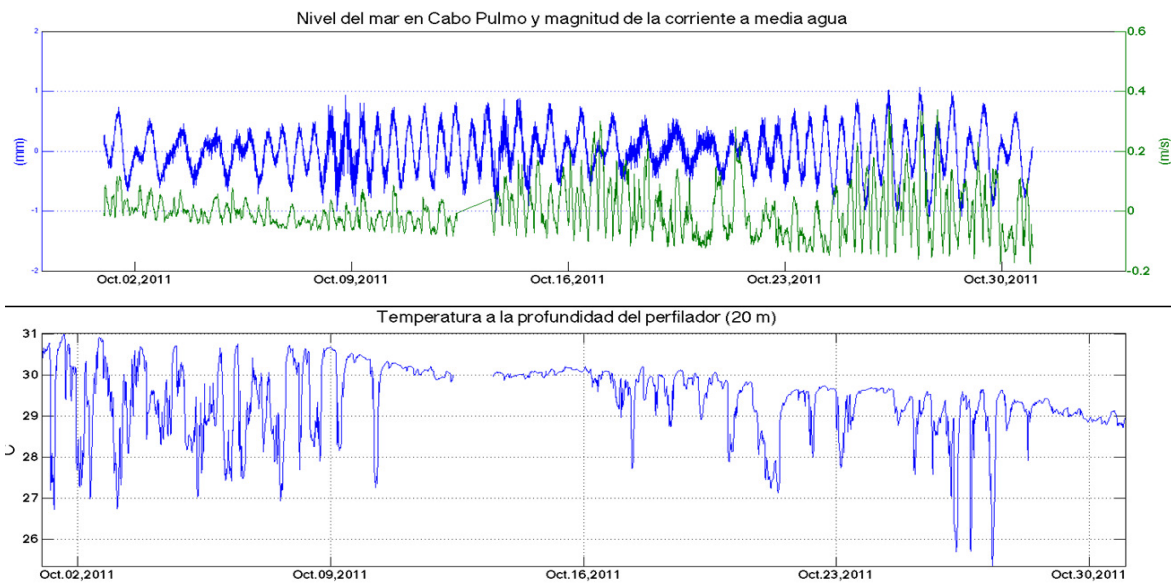


Figura 15. Arriba: comparación entre el nivel del mar (sensor de presión en Cabo Pulmo, sin tendencia) y la magnitud de la corriente a media agua (11 m). Abajo: temperatura a la profundidad del ADCP (20 m).

más amplio que a media agua. Esto tiene una consecuencia en los desplazamientos netos en el mes, como se observa a continuación.

A diferencia de octubre de 2010, cuando todos los desplazamientos fueron hacia el norte (ver la figura 13), los desplazamientos ahora cambiaron de dirección durante el mes (Fig. 17). En la superficie (panel de la izquierda) se dirigen hacia el norte al inicio del mes, pero después su sentido cambia y la parcela acaba al sur de su posición inicial. La magnitud de los desplazamientos superficiales es <100 km, comparada con 150 km en 2010. Bajo la superficie (panel central y de la derecha) los desplazamientos a media profundidad son hacia el sur, y cerca del fondo, primero hacia el norte y después hacia el sur. A media profundidad se observan períodos de excursiones cortas, de ida y vuelta, que reducen el desplazamiento máximo a sólo unos 60 km. Cerca del fondo este desplazamiento máximo disminuye a menos de 20 km. Este es un comportamiento inesperado para una costa expuesta como la del Parque Nacional de Cabo Pulmo pero se debe a que este mes de octubre 2011 registramos corrientes débiles y también a que no ocurrieron eventos intensos de vientos del noroeste.

Los diagramas de astillas de la figura 18 corresponden a diciembre de 2011 y muestran corrientes intensificadas en la superficie y con dirección predominante hacia el sur en toda la columna de agua. Las corrientes superficiales alcanzan los valores más intensos del registro, superiores a 1.5 m/s. Es difícil discernir el efecto de las corrientes de marea en estas observaciones. Bajo la superficie la intensidad del flujo disminuye y es mucho más regular. A media agua se registraron

valores máximos de casi 0.5 m/s alrededor del 25 de diciembre. Cerca del fondo ese día las velocidades alcanzaron casi 0.4 m/s. Los vientos este mes fueron casi exclusivamente del noroeste (ver figura 3) y hubo muchas ocasiones en que se registraron intensidades de hasta 12 m/s. Esto nos lleva a suponer que las corrientes observadas se deben, en gran medida, al forzamiento del viento. No descartamos, sin embargo, la influencia de estructuras de mesoescala que pueden ocurrir en esta época del año en las cercanías de Cabo Pulmo.

La predominancia del flujo (Fig. 19) en todo el mes de diciembre es hacia el sur en toda la columna de agua. En la superficie (panel de la izquierda) un 35% del flujo se dirige al sur y allí se registran también las velocidades más altas. A media agua (panel central) la proporción que se dirige hacia el sur es superior al 45%, aunque las velocidades disminuyen a un promedio de 0.5 m/s. Cerca del fondo (panel de la derecha) el flujo dominante incluye más del 30% de las observaciones pero ahora vira un poco hacia el sureste, quizás por influencia de la topografía que rodea al sitio de observación. Todo lo anterior tiene una consecuencia dramática en los desplazamientos que se describen enseguida.

Como es de esperarse, los desplazamientos de la figura 20 son hacia el sur en las tres profundidades. La diferencia ahora es que la magnitud es muy superior a lo registrado en otras ocasiones. En la superficie (panel de la izquierda) el desplazamiento máximo supera los 300 km. A media profundidad (panel central) supera los 200 km y cerca del fondo (panel de la derecha) es de casi 150 km. Estos desplazamientos sólo nos dan una idea de la tendencia del flujo en el sitio de observación. No se deben

interpretar como desplazamientos reales. Sin embargo, es claro que la componente neta del desplazamiento en diciembre y, posiblemente todo el resto del invierno,

será hacia el sur debido a la influencia de los vientos del noroeste sobre toda esta región del Golfo de California

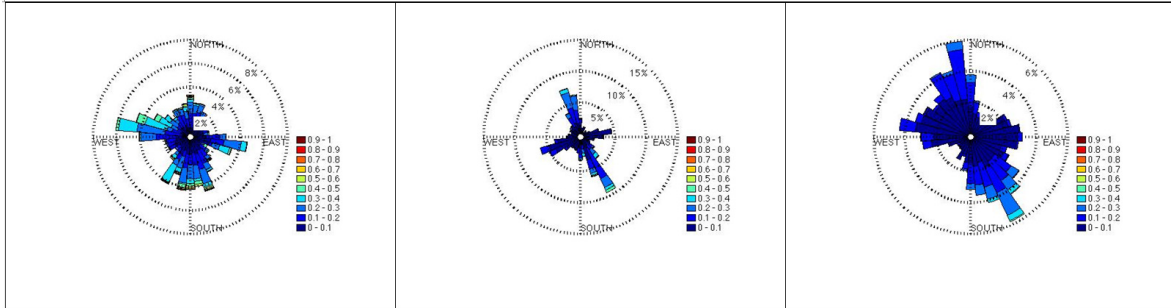


Figura 16. Rosas de corriente de octubre 2011. Los ángulos indican hacia donde se dirige la corriente. Los colores indican la velocidad (rojo 1 m/s, azul 0.1 m/s) y el largo de las barras indica la persistencia del flujo en esa dirección. Los círculos concéntricos marcan el porcentaje de observaciones que alcanzan esa categoría. Izquierda es la superficie, centro corresponde a media agua y derecha es el fondo.

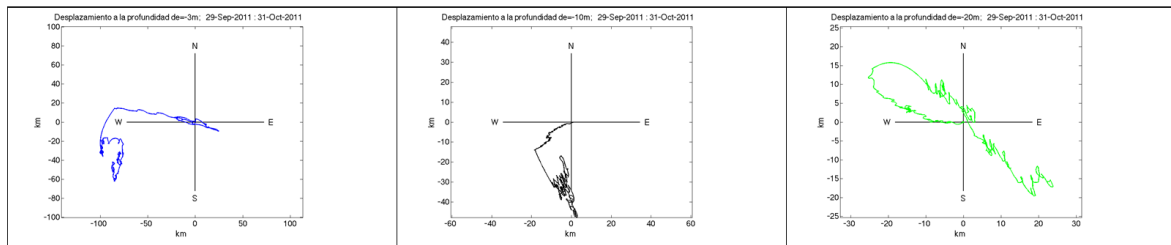


Figura 17. Desplazamiento de partículas a las tres profundidades (octubre de 2011): superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde

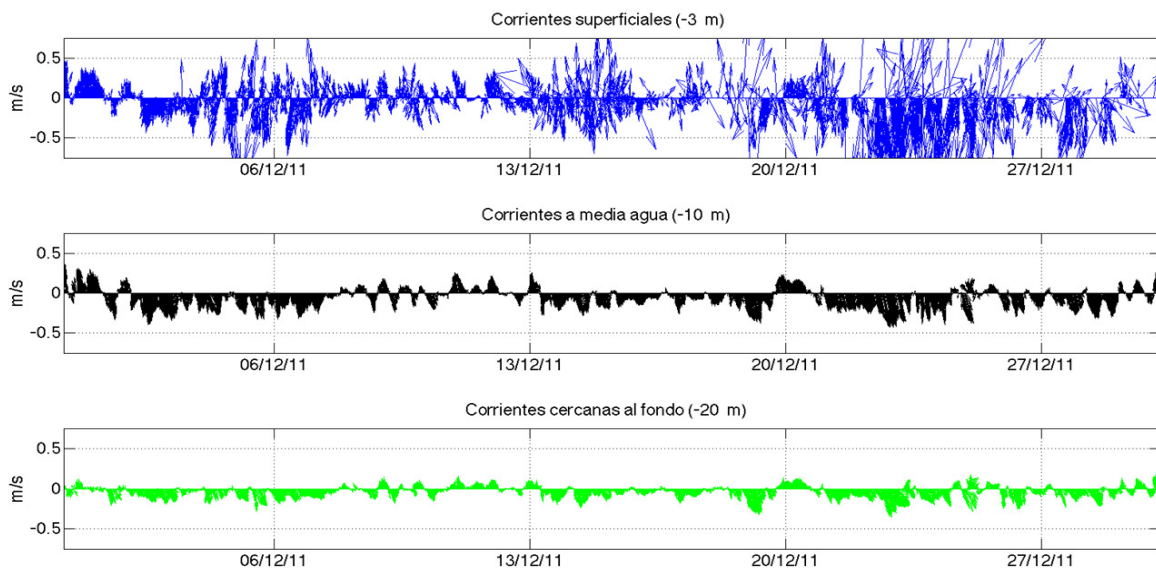


Figura 18. Diagramas de astilla de las corrientes de diciembre 2011 a tres profundidades: superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

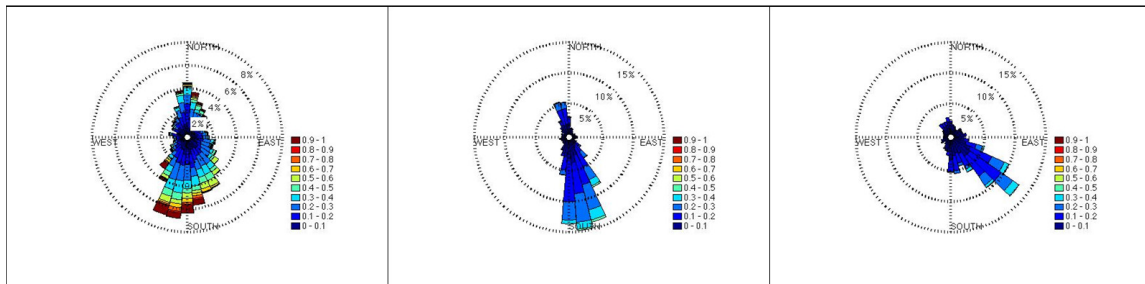


Figura 19. Rosas de corriente de diciembre 2011. Los ángulos indican hacia donde se dirige la corriente. Los colores indican la velocidad (rojo 1 m/s, azul 0.1 m/s) y el largo de las barras indica la persistencia del flujo en esa dirección. Los círculos concéntricos marcan el porcentaje de observaciones que alcanzan esa categoría. Izquierda es la superficie, centro corresponde a media agua, y derecha es el fondo.

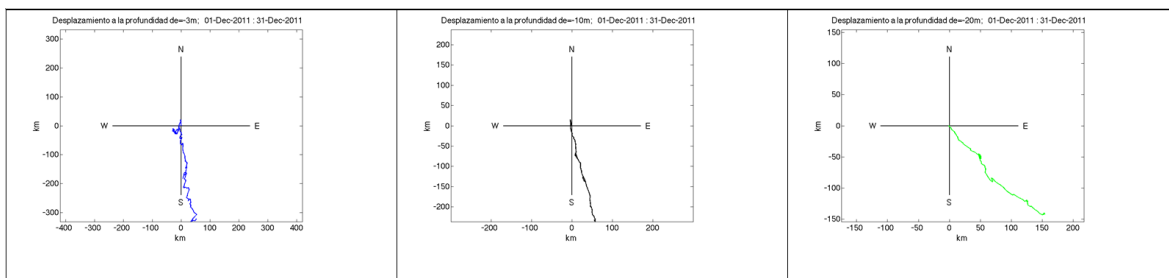


Figura 20. Desplazamiento de partículas a las tres profundidades (diciembre de 2011): superficie (3 m) en azul; media agua (11 m) en negro y cerca del fondo (19 m) en verde.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo discute las observaciones de corrientes obtenidas durante más de un año de trabajo de campo, en la zona costera de Parque Nacional de Cabo Pulmo. A pesar de que se perdieron las observaciones del invierno y primavera de 2011, tenemos suficientes datos para mostrar las condiciones contrastantes de verano, otoño e inicios del invierno.

Durante la época de verano, cuando el viento es débil, las corrientes de marea dominan la mayor parte de la circulación en la columna de agua y sólo los primeros metros superficiales muestran influencia del viento. En esta época la circulación costera se caracteriza por el vaivén del flujo a lo largo de la costa, modulado en

la superficie por las brisas o por eventos ocasionales de mayor intensidad. También se observa la influencia de los vientos del sureste que son el patrón dominante del verano en esta región del Golfo de California.

En contraste, el invierno muestra los efectos de los vientos intensos del noroeste. Estos eventos tienen duraciones de días y son capaces de modificar la circulación en toda la columna de agua. Dominan el flujo aún sobre la circulación de la marea. La circulación de principios del invierno que hemos registrado en estas observaciones documenta condiciones extremas de corrientes de hasta 2 m/s en la superficie y de 0.5 m/s cerca del fondo. En invierno es cuando el flujo costero hacia el sur, a lo largo de la costa, es más intenso y persistente.

La situación en otoño es, simplemente, intermedia entre verano e invierno. En otoño se encuentra la mayor variabilidad. El flujo costero cambia de dirección hacia el sur o hacia el norte, pero siempre tiene esta dirección predominante a lo largo de la costa.

A futuro proyectamos continuar analizando la información del resto del invierno y de la primavera. Esto nos permitirá entender el ciclo anual completo. También continuaremos con experimentos Lagrangeanos con boyas a la deriva (los datos no se muestran aquí) para entender mejor la circulación débil durante los meses de verano. Estos experimentos nos permitirán determinar la excursión de parcelas de agua debidas a la corriente de marea. Las aproximaciones que presentamos en este reporte (los diagramas de desplazamiento) proporcionan solamente una estimación de los desplazamientos en el sitio de observación. Es importante medir la circulación por métodos Lagrangeanos para determinar los desplazamientos reales, para determinar también los flujos residuales y sus consecuencias en el Parque Nacional de Cabo Pulmo, por ejemplo, su sensibilidad ante flujos de contaminantes que pudieran ser generados por poblaciones o desarrollos turísticos vecinos. La información de boyas a la deriva también servirá para entender los patrones de dispersión. Ello, a su vez, permitirá conectar estos resultados dinámicos con los estudios biológicos que se interesen en entender procesos de dispersión de larvas y huevos de los organismos arrecifales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la comunidad de Cabo Pulmo, especialmente a los buenos amigos de Cabo Pulmo Divers y a Amigos de Cabo Pulmo A.C.. Gracias a Miguel Ángel Cosío López, Hernando Torres Chávez y Eduardo González Rodríguez, técnicos de la Unidad La Paz del CICESE, sin su trabajo y experiencia en el campo este artículo no habría sido posible. Colaboraron también en este esfuerzo la Sociedad de Historia Natural Niparájá A.C, la International Community Foundation y el Leona M. and Harry B. Helmsley Charitable Trust. Agradecemos también la contribución de los estudiantes del verano científico del 2011 apoyados por los programas del Verano del Pacífico, Delfín y Academia Mexicana de Ciencias. Agradecemos el trabajo de predicción de mareas para Cabo San Lucas, realizado por Juan Ignacio (“Nacho”) González Navarro. Agradecemos la crítica constructiva de Rubén Castro y un revisor anónimo. Y muy especialmente a Luis Delgado Argote por su ardua labor como editor de la revista El presente trabajo fue apoyado por la División de Oceanología del CICESE y ATC es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI 12406).

REFERENCIAS

- Alvarado-Graef, P., 1998. Estructura hidrográfica y circulación costera frente a Baja California Sur, en el Pacífico y en el Golfo. Tesis de Licenciatura de Oceanólogo. Facultad de Ciencias Marinas. UABC, Ensenada, Baja California, 75 p.

Castro, R., R. Durazo, A. Mascarenhas, C. Collins, and A. Trasviña, 2006. Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California. *Deep Sea Research. Part I: Oceanographic Research Papers* 53(1): 188–200.

Collins, C.A., N. Garfield, A.S. Mascarenhas Jr., M.G. Spearman, and T.A. Rago, 1997. Ocean currents across the entrance to the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 102(C9):20927–20936.

Gill, A.E., 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. International Geophysics Series, Vol. 30, Academic Press, 662 pp. ISBN 0122835220, 9780122835223.

Mascarenhas Jr., A.S., R. Castro, C.A. Collins, and R. Durazo, 2004. Seasonal variation of geostrophic velocity and heat flux at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Journal of Geophysical Research* 109, C07008, 9 pp., doi:10.1029/2003JC002124.

Roden, G.I., 1972. Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revillagigedo Islands regions. *Journal of Physical Oceanography* 2: 177–18.

Manuscrito recibido: 4 de julio de 2012.

Recepción del manuscrito corregido: 12 de septiembre de 2012.

Manuscrito aceptado: 18 de octubre de 2012.

FACTORES GEOLÓGICOS Y ANTRÓPICOS DE RIESGO EN TIJUANA, BAJA CALIFORNIA: EL CASO DEL FRACCIONAMIENTO JARDINES DE AGUA CALIENTE

Luis A. Delgado Argote*, Juan Carlos Hurtado Brito, Porfirio Avilez Serrano y Gemma Gómez Castillo

División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California

*ldelgado@cicese.mx

RESUMEN

Aunque el registro instrumental de la sismicidad en Tijuana y sus alrededores es pobre, la existencia de fallas regionales activas hace ineludible que ciertas zonas con taludes deban ser evaluadas bajo escenarios sísmicos. El fraccionamiento Jardines de Agua Caliente es una de dichas zonas. Se localiza entre fallas normales en un graben regional con fallas normales secundarias con componente de movimiento lateral que afectan a secuencias estratigráficas Plio-pleistocénicas pobremente consolidadas. La deformación se caracteriza por pliegues anticlinales amplios y fallas normales con componente de desplazamiento lateral; no se observan evidencias de reactivación. El patrón geométrico del drenaje de 1999, antes del desarrollo inmobiliario, es rectilíneo y sigue el patrón de las fallas y fracturas. La topografía actual muestra que el drenaje original fue rellenado casi en su totalidad y la diferencia entre la topografía de 2002 y de 1999 muestra valores de corte y relleno de +23.35 m y -23.62 m, respectivamente. Existe correlación entre la distribución de los daños en inmuebles con respecto a las zonas de corte y relleno: en el intervalo entre -12 m y +12 m se observa el 88% de los movimientos horizontales, el 74% de los hundimientos y el 73% de los movimientos direccionados. En la Zona Este del fraccionamiento el movimiento dominante es en dirección del echado de las capas y de la pendiente, por lo que, en este caso particular, puede interpretarse que ocurre deslizamiento traslacional.

Esta zona representa un ejemplo en el que el entendimiento incompleto de los procesos geomorfológicos de terrenos, cuya geología estructural determina su desarrollo, influye en el diseño y ejecución de obras civiles y que ante la eventualidad de disparadores de deslizamientos, como sismos o lluvias extraordinarias, pueden convertirse en zonas de riesgo.

Palabras clave: Riesgo geológico, Tijuana, sismicidad, deslizamiento.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la información presentada por un grupo de colonos del fraccionamiento Jardines de Agua Caliente, Delegación La Mesa, Tijuana, B.C., en la que se muestran edificaciones y otras obras civiles afectadas por movimientos del terreno, así como por la cercanía de la zona a otros sitios donde se observan rasgos geológicos que promueven la inestabilidad del terreno (Delgado-Argote et al., 2011), se efectuó un estudio geológico para determinar las causas de

los movimientos. Con ese fin, los objetivos fueron los siguientes: a) identificar las condiciones geomorfológicas y estructurales del terreno en el que se encuentra asentado el fraccionamiento, a través de la interpretación de imágenes de satélite y datos vectoriales de la topografía anteriores al desarrollo inmobiliario; b) definir las condiciones litológicas y estructurales del terreno a través de la cartografía geológica en los afloramientos alrededor del fraccionamiento;

c) realizar un mapeo de daños en las obras civiles para identificar la dirección y magnitud de desplazamientos y la descripción de grietas en los inmuebles para graficar el movimiento relativo de los bloques desplazados; d) buscar la correlación entre los movimientos relativos con respecto a los rasgos geomorfológicos y geológicos del terreno.

Materiales y métodos

En el transcurso de la adquisición de los datos estructurales en el área de estudio se aplicó el criterio de la mano derecha y, durante el reconocimiento de daños en las casas afectadas, el criterio usado para la medición de las grietas incluidas en este estudio, fue: a) que tuvieran una geometría clara e identificable; b) que fueran penetrativas y claramente distintas a las debidas a defectos de construcción; c) que su longitud fuera mayor a los 50 cm; y d) que su orientación y estilo se repitiera en el mismo inmueble, o en las casas vecinas inmediatas. La edición de las imágenes se realizó por medio de la paquetería AutoCAD y Adobe Illustrator; las mediciones de campo se compilaron en la paquetería Microsoft Excel; los mapas se generaron en ArcMap 9.3 y la visualización 3D de los mapas se realizó en el módulo Arc Scene de ArcGis 9.3.

La topografía del año 1999 para el área del fraccionamiento se obtuvo de los datos vectoriales de la carta I11D71 La Presa, elaborados por el INEGI (1999) y la de 2002 fue proporcionada por la Dirección de Protección Civil de Tijuana. Estos datos fueron procesados en el programa ArcMap 9.3 para obtener curvas de nivel con equidistancia de 5 m para los datos de 1999 y de 1 m para los datos de 2002. A partir de estas curvas de nivel, con ayuda de la herramienta Spatial Analyst de ArcMap, se elaboraron los modelos digitales de elevación y se trazó la hidrología superficial del área de estudio.

Localización

La zona de estudio se encuentra en la parte centro-sur de la ciudad de Tijuana, B.C. (Figura 1a). El fraccionamiento Jardines de Agua Caliente

tiene una geometría alargada con orientación NE-SW, paralela a la vialidad Aeropuerto (Figura 1b). Su longitud es de 1,250 m y su anchura máxima es de 280 m. Está asentado en tres terraplenes construidos para el desarrollo inmobiliario cuyas pendientes, menores a 6° están cortadas hacia el SE por escarpes de entre 25° y 50° (Figura 2). Las alturas promedio de los terraplenes oeste, centro y este son de 190, 150 y 130 msnm, respectivamente.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Ambiente tectónico

La península de Baja California es un fragmento de corteza desprendida del macizo continental de México que se desplaza hacia el NW junto con la placa Pacífico. La región del norte de la península y el sur de California forman un bloque que se caracteriza por la presencia de fallas regionales activas orientadas NW-SE; Legg et al. (1991) lo denominan Zona de Cizalla del Sur de California (Southern California Shear Zone). Sus límites están marcados por el sistema de fallas de San Andrés en el oriente (no indicada en el mapa), el sistema de fallas Descanso en el occidente (en ambiente marino), las Sierras Transversas en el norte, cerca de Los Ángeles, California (fuera del mapa), y el sistema de fallas Agua Blanca, al sur de Ensenada, que se conecta con la Falla Salsipuedes en ambiente marino (Figura 3a).

Dentro de este marco tectónico, en el norte de la península se desarrolla un complejo arreglo de fallas sísmicamente activas orientadas al NW y una sismicidad cuyos epicentros se alinean al NE, perpendicularmente a las fallas regionales (figuras 3 y 4).

Entre Tijuana hasta aproximadamente 75 km al sur de la ciudad de Ensenada, el borde de la península muestra evidencias de importantes levantamientos (Rockwell et al., 1989). Además, se ha documentado por medio de Sísmica de reflexión que las fallas cercanas a la costa afectan a sedimentos cuaternarios (Legg, 1991; Legg et al., 1991).

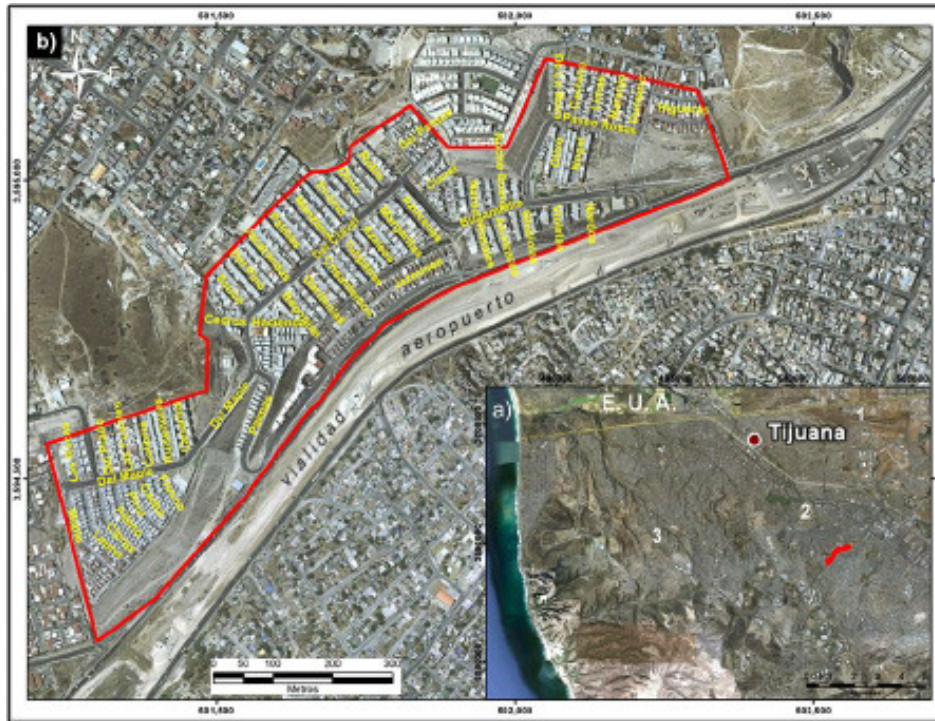


Figura 1. Localización del área de estudio. a) Imagen satelital de la ciudad de Tijuana tomada de Google Earth (2008) donde se muestra el Aeropuerto (1), Hipódromo (2), Periférico Sur (3) y, la mancha roja indica el área de estudio. b) Imagen satelital tomada de Google Earth (2008) indicando el polígono del fraccionamiento Jardines de Agua Caliente con líneas rojas y, en amarillo, los nombres de las privadas.

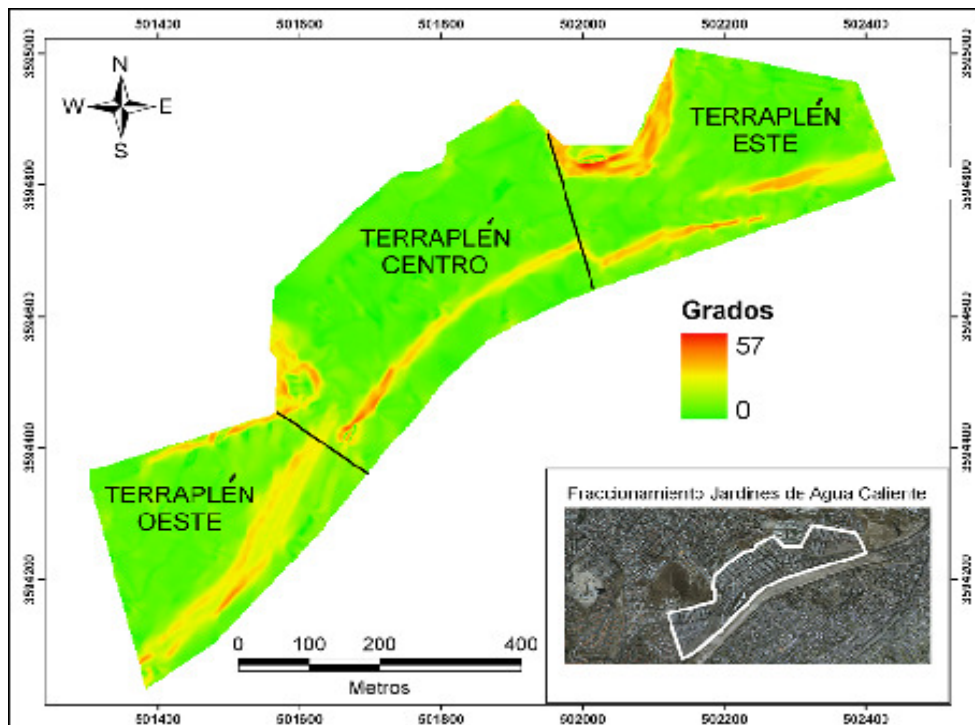


Figura 2. Modelo digital de pendientes en grados, obtenido de la topografía proporcionada por la Dirección de Protección Civil de Tijuana, del fraccionamiento Jardines de Agua Caliente, indicando los tres terraplenes y los taludes que los limitan.

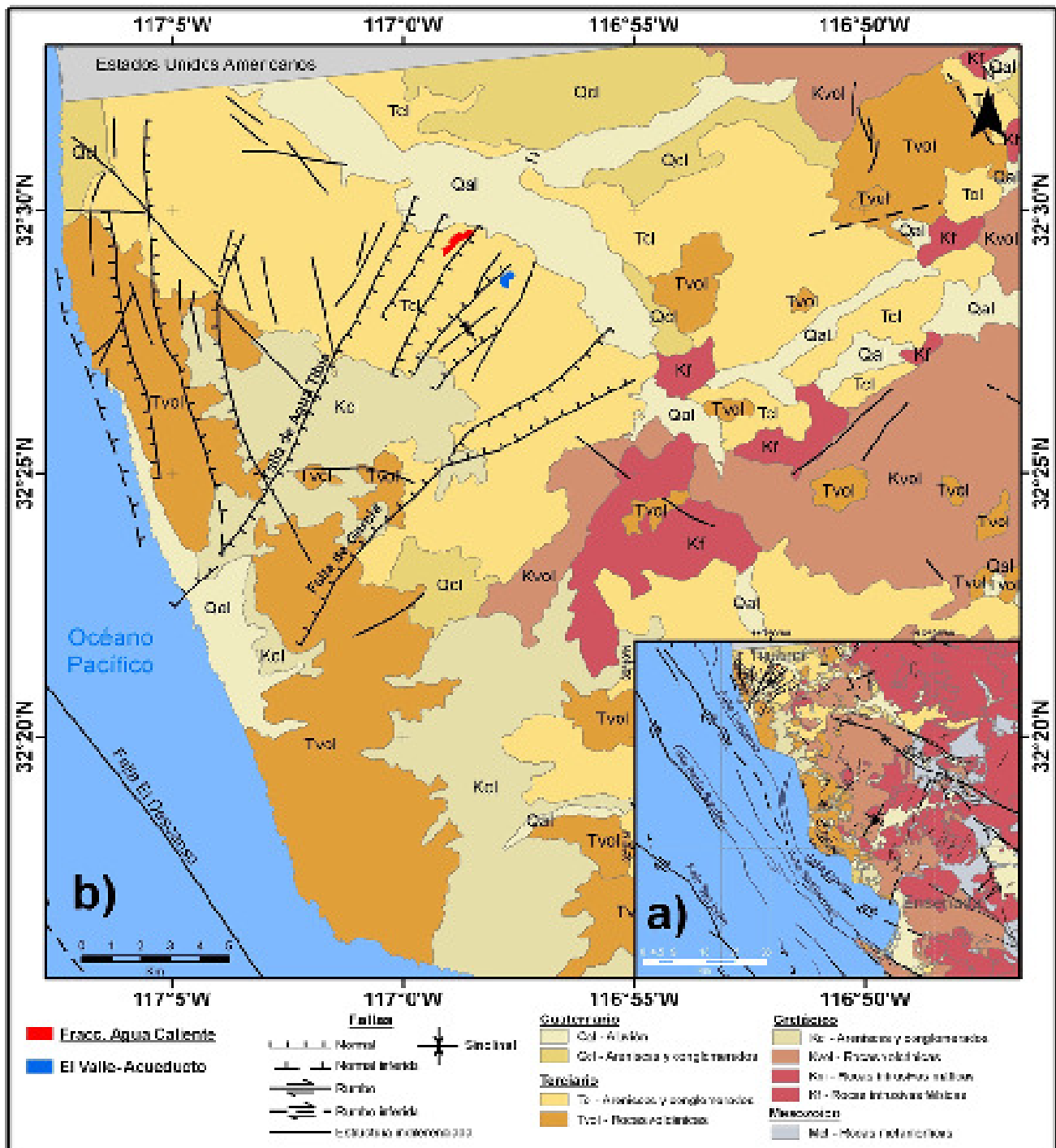


Figura 3.a) Mapa geológico del NW de Baja California donde se muestran las principales unidades litológicas (datos vectoriales geológicos de INEGI, 2000, escala 1:250,000) y rasgos estructurales (tomados de Gastil et al., 1975 y Legg et al., 1991). b) Acercamiento del mismo mapa a la región de Tijuana mostrando en el polígono rojo la ubicación de la zona de estudio. Litológicamente la zona se encuentra en rocas del Plioceno de origen marino y fluvial. Los principales rasgos estructurales son las fallas normales orientadas hacia el NE que indican el origen estructural de algunas cuencas de depósito y la presencia de pliegues con la misma orientación. Las fallas con orientación NW (San Miguel-Vallecitos; SMV) son regionales de desplazamiento lateral derecho y las orientadas NNW cercanas a la costa son, en buena medida, producidas por levantamiento regional. El polígono azul corresponde a la ubicación de los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto (Delgado-Argote et al., 2011)

Litología Regional

El basamento de la parte noroccidental de la península está formado por rocas graníticas y una secuencia metamorfizada de rocas intrusivas, volcánicas y volcanosedimentarias de arco de la Fm. Alisitos del Cretácico (Kf, Km, Kvol en la Figura 3), la cual aflora ampliamente en el extremo oriental de Tijuana. El basamento está cubierto discordantemente por los depósitos sedimentarios pobremente consolidados de la Fm. Rosario del Cretácico Superior (Kcl en la Figura 3; las unidades de posible edad jurásica están indicadas en la Figura 3 como Met).

A las unidades cretácicas del basamento les sobreyace la Fm. Rosarito Beach del Mioceno, la cual está bien expuesta entre las ciudades de Tijuana y Ensenada. La Fm. Rosarito Beach está formada por derrames basálticos y brechas que tienen interestratificadas arenas con matriz de lodo, tobas, arenas tobáceas, calizas y conglomerados. Con base en su distribución, trama y contenido faunístico el ambiente de depósito de los sedimentos fue interpretado como fluvial, lacustre y de plataforma marina (Ashby, 1989). Durante el Plio-Pleistoceno, en los alrededores de Tijuana, se depositó la Fm. San Diego sobre las tobas de la Fm. Rosarito Beach. Está constituida por arenas finas en la base, arenas y conglomerados en la cima, que fueron depositados en cuencas estructurales de tipo transtensional (Minch et al., 1984). La sobreyace discordantemente la Fm. Lindavista del Pleistoceno-Reciente (Gastil et al., 1975) formada por areniscas y conglomerados que, en el sur de Tijuana, coronan los cerros y las mesetas. La ciudad de Tijuana está edificada principalmente sobre estas dos últimas formaciones.

Rasgos estructurales mayores y sismicidad

La deformación general del NW de Baja California está gobernada por el Sistema San Andrés-Golfo de California. En el Borde Continental, los sismos son escasos pero los epicentros se alinean con las fallas (Legg et al., 1991). Todas las fallas en esta

región son de tipo lateral derecho (Figura 3a) de las que se estiman velocidades de desplazamiento desde 1 mm hasta 6 cm por año (Rockwell et al., 1987; Legg et al., 1991; Legg, 1991; Suárez et al., 1991; Suárez, 1993). Los mecanismos focales son consistentes con el sentido de desplazamiento y los epicentros son paralelos a las trazas de las fallas (Legg et al., 1991), por lo que el peligro por sismicidad es alto en la región, toda vez que existen numerosos lugares donde existen condiciones de estabilidad precaria. En ese sentido, se considera que sismos de magnitud del orden de 3, con epicentro en o dentro de radio de pocos kilómetros, puede disparar un deslizamiento. El sistema de fallas San Miguel-Vallecitos (Figura 3a) es activo y su traza termina pocos kilómetros al SE de Tijuana, por lo que su monitoreo y cartografía son recomendables. La cartografía reciente y los estudios paleomagnéticos en el basamento (Böhnel et al., 2002) no indican actividad reciente en el sector de esta falla cercano a Tijuana. Desde el punto de vista sísmico, los mapas de distribución de energía sísmica en la región indican notables alineamientos de epicentros en dirección NE (Frez y Frías-Camacho, 1998), que pueden correlacionarse con las fallas cartografiadas por Gastil et al. (1975) en la región de Tijuana (figuras 3 y 4). De acuerdo con Gastil et al. (1975), la zona de estudio se encuentra aproximadamente a 7 km al NW de la falla Agua Tibia que es normal y se orienta hacia el NNE-SSW, con echado hacia el oeste y a 10 kilómetros al noroeste del sistema de fallas San Miguel-Vallecitos (Figura 3a). Aunque este sistema de fallas es relativamente lejano, es importante por su carácter regional y potencial sísmico. Dicho sistema está conformado por una serie de fallas de transcurrancia derecha, escalonadas y orientadas NW-SE. Además, no obstante que la actividad sísmica en el área de estudio es de baja magnitud, no deja de ser importante debido a la inestabilidad propia del terreno por las pendientes altas en algunas zonas y por la poca competencia de la litología. En la Figura 4 se muestran los epicentros de los sismos de magnitud mayor de 2.5 reportados por la Red Sismológica del Noroeste de México del CICESE (RESNOM) durante las tres últimas

décadas. Debe destacarse: a) la correlación entre el alineamiento de los epicentros con respecto a la traza de algunas fallas del mapa geológico de la Figura 3a, principalmente, en el sistema San Miguel-Vallecitos; b) la alineación de epicentros en segmentos más pequeños, aunque menos evidentes, con orientación NE-SW; y c) la cercanía a la zona de estudio de sismos de magnitud 2.7 y 2.8 en 1989 y hasta de 3.9 en 2003 y 2005 en otras partes de la zona urbana de Tijuana. Además, existen propuestas para escenarios sísmicos en la región de Tijuana que consideran rompimiento en la falla La Nación (Mw = 6.5), en la parte oriental del condado de San Diego, California (Acosta-Chang y Montalvo-Arrieta, 1997) que deben tomarse en cuenta en zonas aparentemente estables.

Antecedentes de deslizamientos en Tijuana

De acuerdo con Delgado-Argote et al. (1996),

el riesgo geológico en Tijuana se debe a la conjunción de tres factores principales: presencia de fallas o fracturas, pendiente del terreno mayor o igual a 18% (10°) y una litología incompetente. Bocco et al. (1993) agregan el crecimiento urbano desordenado como un factor adicional. De la evaluación regional de zonas de peligro efectuada por los autores mencionados, se observa que éstas se localizan en los taludes o están cercanas a los rompimientos de pendiente en sitios donde la litología está dominada por las formaciones San Diego y Lindavista. La geometría dominante es de deslizamientos rotacionales (Delgado-Argote et al., 2011). Un factor disparador importante de los deslizamientos que se debe considerar también es el grado de saturación de agua en los sedimentos, además de la respuesta sísmica del terreno y otros factores inducidos por la actividad del hombre, principalmente los cortes en el terreno.

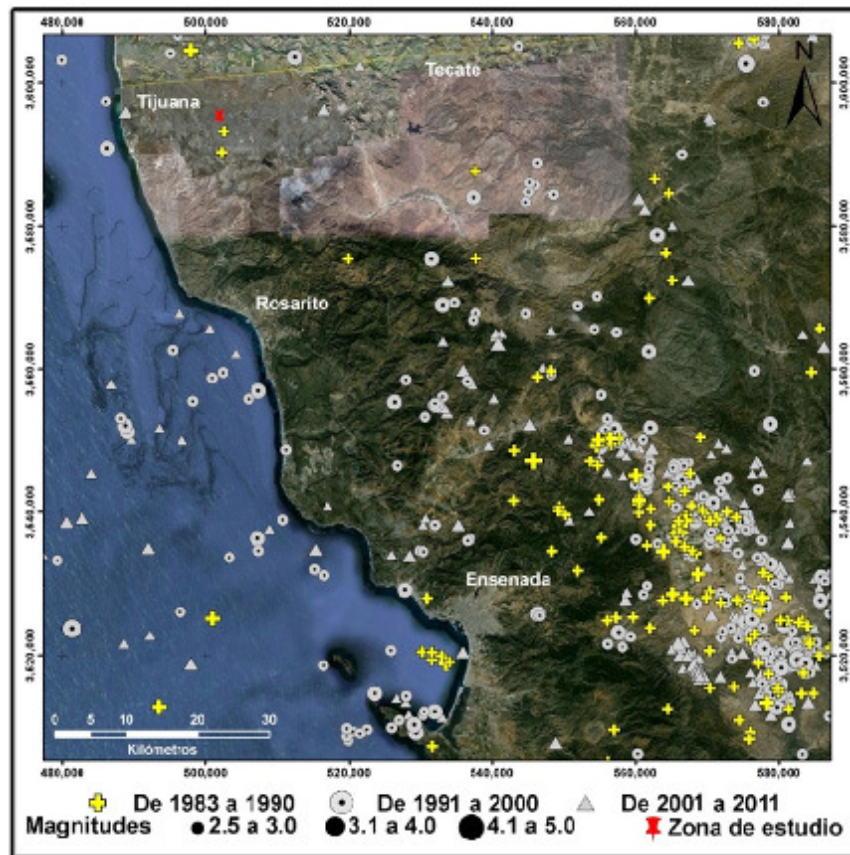


Figura 4. Epicentros de sismos de magnitud mayor a 2.5 reportados por el CICESE (RESNOM) para las décadas 1980-1991, 1991-2000 y 2001-2011. El tamaño del símbolo indica la magnitud del sismo.

ANÁLISIS DE LA ZONA DE ESTUDIO

Litología

La litología de la zona de estudio consiste en arenas masivas con horizontes ricos en material tobáceo de grano fino a medio cuya estructura puede ser masiva o estratificada en capas de 4 a 20 cm de espesor (Figura 5a). Los estratos de aproximadamente 20 cm de espesor son escasos y están constituidos por arenas cementadas (Figura 5b). En algunos afloramientos se observan lentes limo-arcillosos dentro de las arenas (Figura 5c). Las arenas están cubiertas, en contacto discontinuo, por depósitos de conglomerados polimícticos con clastos subangulosos y Dsubredondeados que varían de 1 a 25 cm de diámetro, mal clasificados, en una matriz arenosa (Figura 5d). En algunos afloramientos los conglomerados tienen una geometría de relleno de canal (Figura 5e). Ocasionalmente los lentes de conglomerado están cementados y tienen matriz limo-arenosa de color rojizo. En la coordenada 501473/3594584 (NAD27_UTM_Zona 11N) las arenas con material tobáceo están cubiertas por areniscas de grano grueso que a su vez están sobreyacidas en discordancia por los conglomerados antes descritos. Puesto que sólo en este sitio se observan las arenas gruesas cubriendo a las arenas tobáceas de grano fino a medio, suponemos que las arenas gruesas tienen una geometría lenticular.

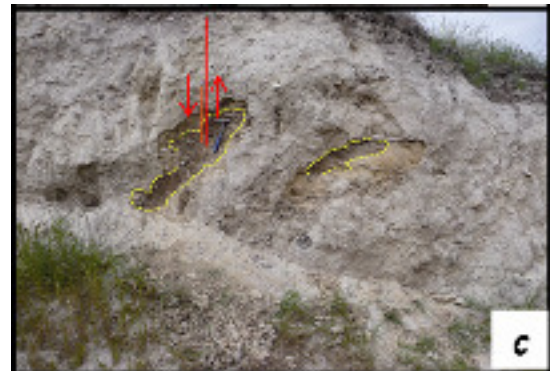


Figura 5. Fotografías de la litología en los alrededores del área de estudio. a) Arenas masivas de grano medio a fino. Se observan algunos estratos con espesor menor a 6 cm. b) Horizonte de arena cementada de 20 cm. de espesor. c) Lentes limo-arcillosos (delimitados por líneas punteadas amarillas) dentro de arenas de grano medio. La línea roja indica el plano de una falla normal que corta al lente limo-arcilloso. d) Conglomerado polimíctico con clastos subangulosos y subredondeados que varían de 1 a 25 cm con matriz arenosa. e) Contacto discontinuo entre las areniscas de grano medio y el conglomerado (línea punteada amarilla). Se distingue una geometría canalizada.

Geología estructural

El estudio estructural se enfocó hacia la búsqueda y medición de estructuras geológicas tales como estratificación, fallas y fracturas en los terrenos con obras civiles. En la Figura 6 se muestran los sitios de donde se obtuvieron los datos con los que se elaboró el mapa geológico, los cuales se distribuyen en la periferia del fraccionamiento, predominantemente en las partes norte de los terraplenes Oeste y Centro. En las partes sur y este del fraccionamiento los estratos no están afectados por fallas o zonas de fracturas. Con fines descriptivos, el área de estudio se dividió en tres zonas, que casi comprenden las dimensiones de los terraplenes, pero reflejan mejor la distribución de los datos estructurales (Figura 6).

En la Zona Oeste, la estratificación tiene rumbos que son hacia el NE-SW y NW-SE, en ese orden de abundancia. La estratificación con rumbo NE-SW buza hacia el SE y NW con inclinaciones máximas de 25° y 20°, respectivamente. La estratificación con rumbo NW-SE tiene echados hacia el SW con una inclinación máxima de 30° (Figura 6). La tendencia general de las capas en la Zona Oeste se muestra en el estereograma de la Figura 7a, el cual indica que la estratificación buza hacia el NE y SW y que su rumbo promedio se orienta 52°/9°. Debido a la dispersión en la orientación de esos datos de estratificación, dicho promedio de los rumbos tiene un valor de confianza bajo (0.5725; Figura 7a). El bajo ángulo de los echados de las capas evidencia pliegues suaves y se cartografiaron dos fallas normales y dos laterales. Las fallas normales se desarrollan en arenas, son verticales y están orientadas NW-SE y NE-SW; una de ellas corta claramente un lente limo-arcilloso (Figura 5c). Las fallas laterales tienen rumbo NE-SW. La falla lateral derecha que se midió en arenas de la Zona Oeste tiene una inclinación de 60° con componente normal. La falla lateral izquierda que se midió en conglomerados de la Zona Centro tiene una inclinación de 86°. Los datos de buzamiento de los estratos en la Zona Centro son más homogéneos; la mayoría de ellos tienen rumbo NW-SE con echados hacia

el NW, cuya inclinación máxima es de 40°. La estratificación promedio es de 234°/20° (Figura 7b). En la parte norte de esta zona se midió una falla lateral derecha vertical con rumbo NE-SW con componente normal (Figura 8a) y se observan fracturas orientadas E-W, como en la Zona Oeste.

En la Zona Este sólo se pudo obtener un dato de estratificación cuyo rumbo es 308°/ 20°. Se construyeron cuatro secciones estructurales con la finalidad de observar la ubicación y orientación de las estructuras (Figs. 6 y 9). La topografía que se usó para la construcción de las secciones es del año 1999, anterior a la construcción del fraccionamiento. Sobre las secciones se trazaron franjas de color negro que indican las zonas ocupadas por construcciones habitacionales y la ubicación de las secciones se muestra en la Figura 6.

La sección A-A' tiene una dirección SW-NE, una altura máxima de 200 msnm, tiene 1,350 m de longitud y es casi paralela a las estructuras geológicas regionales; la sección B-B' es perpendicular a la anterior, mide 400 m y tiene una altura máxima de 225 m; la sección C-C' es W-E, tiene 450 m de largo y su cota máxima es de 170 m; la sección D-D' se orienta NW-SE, tiene una longitud de 450 m y alcanza una altura máxima de 165 m.

En la sección A-A' la estratificación muestra un anticlinal abierto con echados muy suaves en casi todo el perfil, con excepción de la parte NE donde el valor máximo de inclinación es de 25°. En la sección B-B' se observa que la inclinación en dos sitios presenta una estratificación que evidencia pliegues o basculamiento muy suave, con echados menores de 14° en el extremo NW y 5° para la parte SE del perfil. Por tener menos construcciones, la sección C-C' muestra el mayor número de estructuras, particularmente en el E, donde la estratificación tiene inclinaciones más pronunciadas. Se observaron fallas normales, laterales derechas e izquierdas. No se pudo estimar la longitud de los desplazamientos.

En la sección D-D' las inclinaciones del terreno varían desde 10° hasta 14°, se observa una falla lateral derecha con una componente normal, así como una serie de fracturas. El cambio de actitud en las capas del bloque de la derecha puede deberse a un efecto de arrastre por la falla lateral derecha con componente normal, o incluso, a un deslizamiento gravitacional antiguo.

Los datos en los perfiles pueden asociarse a estructuras basculadas por procesos de compactación o de plegamiento suave debido a esfuerzos orientados con la dirección de los echados, aunque también pueden deberse a las fallas que provocan el movimiento relativo de los bloques y las discontinuidades entre las capas.

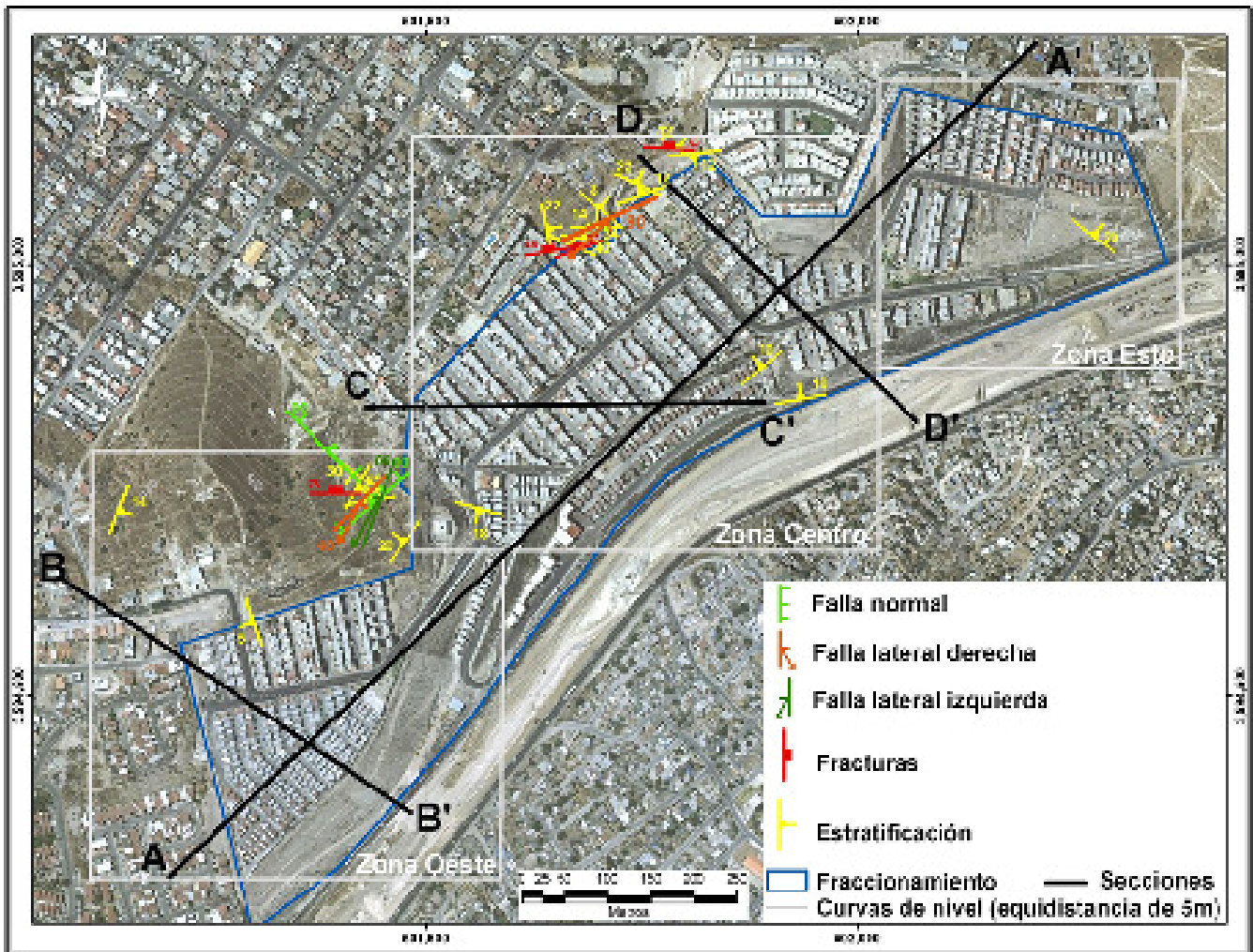


Figura 6. Datos estructurales medidos en el área de estudio. Los recuadros blancos son las zonas utilizadas para la descripción de estructuras. Las líneas A-A' a D-D' marcan las secciones geológico-estructurales.

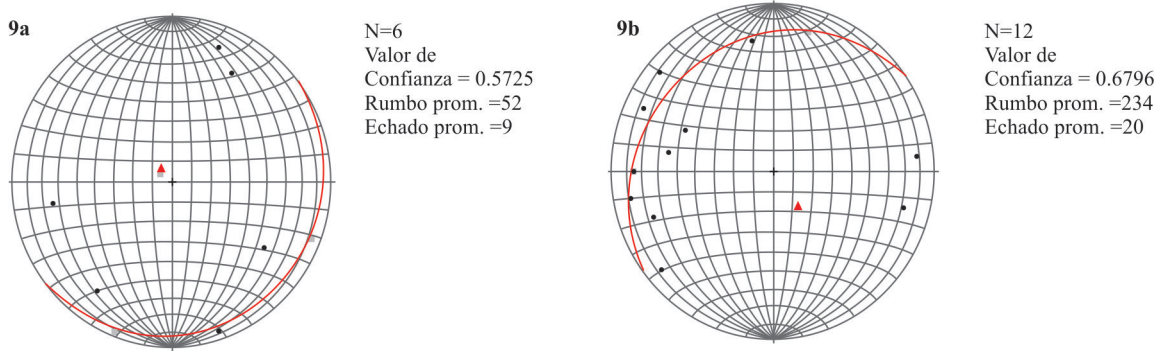


Figura 7. Estereogramas de la dirección del echado de las capas que muestran la tendencia general de la estratificación. a) En la Zona Oeste se midieron 6 datos discordantes que muestran una tendencia promedio hacia 52°/9°; esta zona se caracteriza por tener capas casi horizontales, según se ve en el perfil B-B' de la Fig. 9. b) En la Zona Centro se midieron 12 datos de estratificación cuya tendencia es 234°/20°.

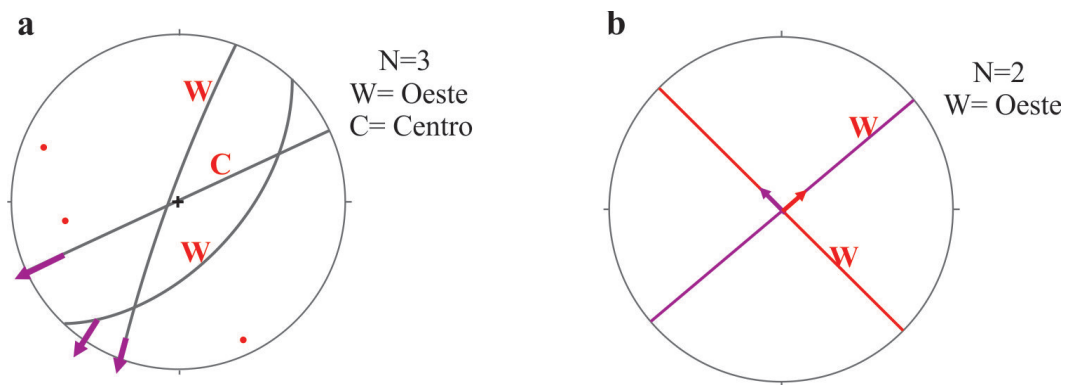


Figura 8. a) Fallas laterales izquierda y derecha en la Zona Oeste (W); 43°/60° con movimiento derecho y 200°/86° con movimiento izquierdo. El plano de la tercera falla, que se ubica en la Zona Centro (C), en la periferia del fraccionamiento, es 65°/90° y tiene un movimiento lateral derecho. b) Fallas normales verticales orientadas 315° y 230° con bloques de caída hacia el NE y NW, respectivamente.

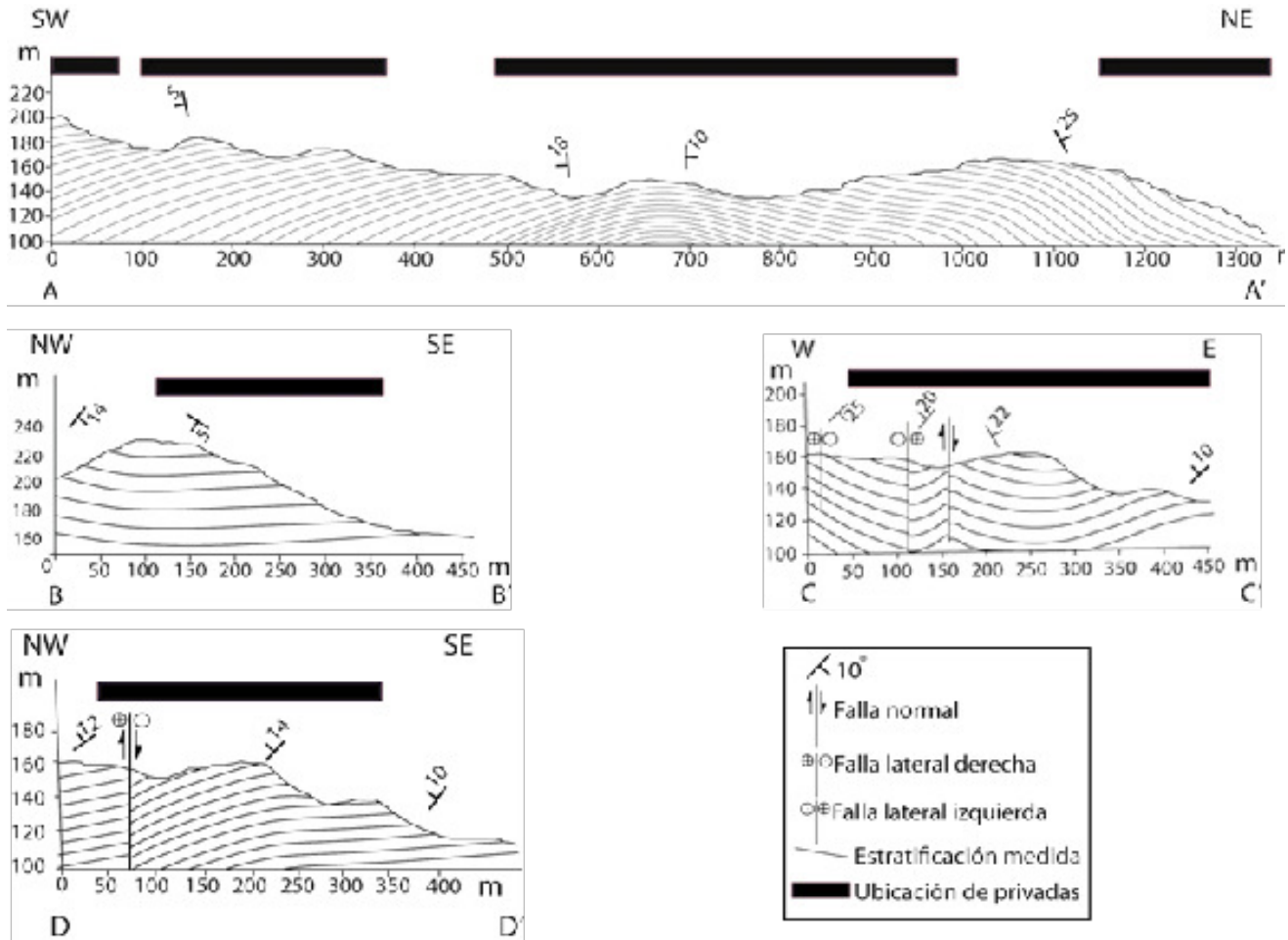


Figura 9. Secciones estructurales esquemáticas (topografía de 1999) en donde se aprecia el rumbo e inclinación de las capas que, en el perfil A-A', tiene 25° como valor máximo en la inclinación, mientras que los perfiles B-B' y D-D' no superan los 18°; en el perfil C-C' la inclinación máxima es de 25°. Es importante resaltar que las barras negras corresponden a la zona con viviendas.

DAÑO ESTRUCTURAL EN LAS VIVIENDAS

De acuerdo con los criterios establecidos en el apartado de “Materiales y métodos”, se hicieron 136 mediciones de grietas a partir de las cuales se infirió el movimiento del terreno sobre el que se asientan las viviendas a las que se tuvo acceso. Los datos se agruparon en tres tipos de acuerdo con su naturaleza: a) grietas con movimientos horizontales similares a los de las fallas de desplazamiento lateral; b) grietas con

movimiento vertical (hundimientos); y c) grietas en donde la dirección de movimiento se deduce a partir de series de fracturas y que, en lo sucesivo, son mencionadas como dirección de movimiento pues se refiere al sentido del movimiento de bloque donde hay obras civiles. Para facilitar la ubicación y descripción de estructuras, éstas se agruparon en las zonas: Oeste, Centro y Este, que son las mismas descritas en el apartado de “Geología estructural” (Figura 6).

Movimientos horizontales

Se identificaron 18 estructuras que indican movimientos laterales en el fraccionamiento, 10 de ellas izquierdas y ocho derechas (Figura 10). En la Zona Oeste se encontraron cuatro grietas que indican movimiento lateral izquierdo y una con movimiento lateral derecho. El movimiento lateral derecho se midió en la privada Ruiseñores (figuras 1 y 11a). Los movimientos izquierdos se encontraron en las privadas Ruiseñores, Canarias, Las Fuentes y Caoba. En la Zona Centro se observaron cinco grietas con movimiento lateral derecho y cinco con movimiento lateral

izquierdo. Los movimientos laterales derechos se midieron en las privadas Azucenas, Begonias, Del Parque, Hacienda y Jacarandas (Figura 11b). Los movimientos laterales izquierdos se concentran en la parte suroeste de esta zona, en las privadas Crisantemos, Del Parque, Hacienda, Jacarandas y Pino (Figura 11c y d). En la Zona Este se identificaron tres grietas debidas a movimiento lateral, donde uno es izquierdo y dos son derechos. El movimiento lateral izquierdo se encuentra en la privada Las Moras, mientras que los movimientos laterales derechos se midieron en la privada Higueras y en la barda perimetral que se ubica al sur de esta zona.

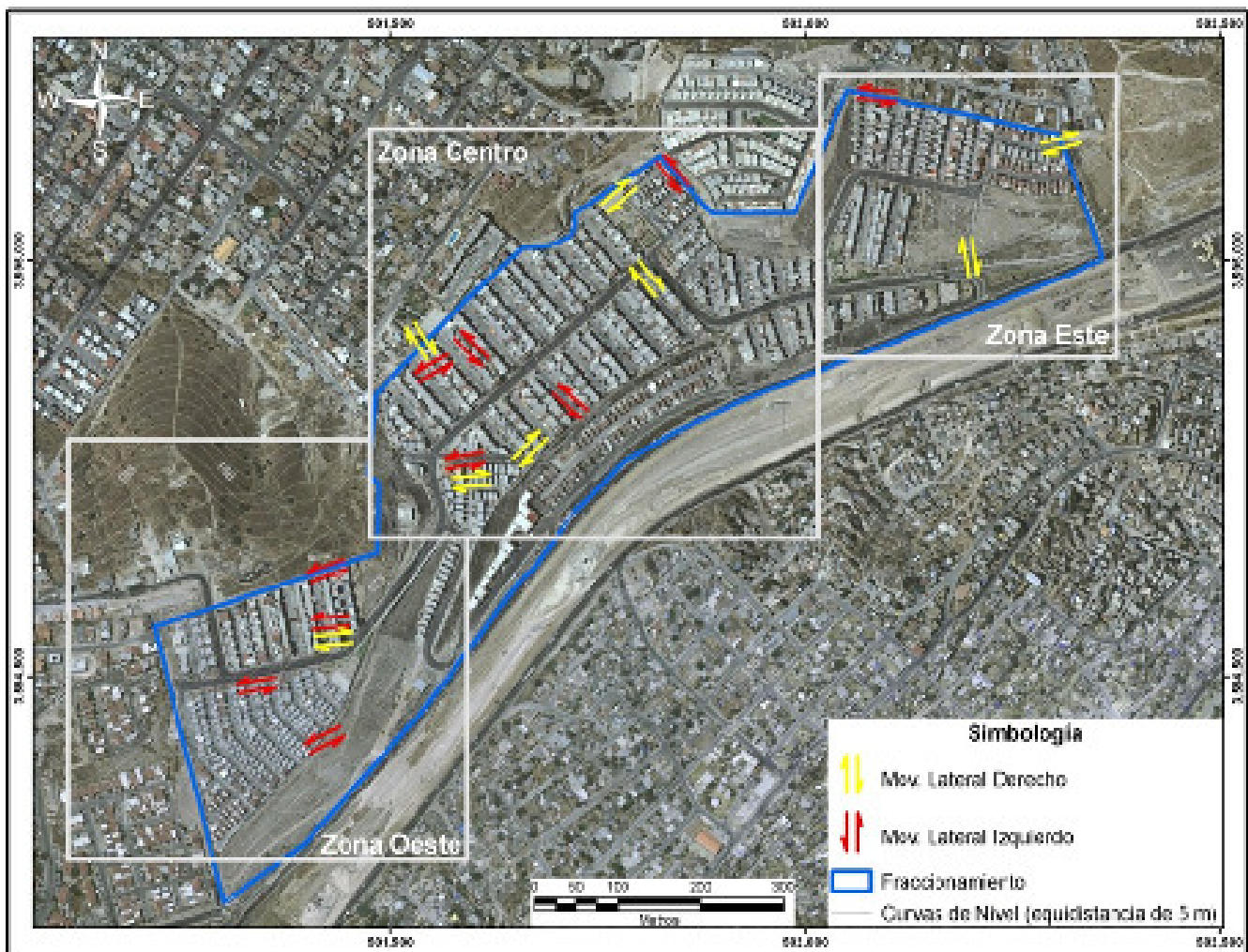


Figura 10. Cartografía de movimientos horizontales indicando el sentido de desplazamiento lateral izquierdo o derecho.



Figura 11. Fotos de movimientos laterales. a) Movimiento lateral derecho ubicado en la privada Ruiseñores. b) Grieta localizada en la privada Begonias, en la cual se observa movimiento lateral derecho. c) Fractura que muestra movimiento lateral izquierdo, que se encuentra en la privada Del Parque. d) Grieta con movimiento lateral izquierdo ubicada en una de las paredes que se localiza junto a la caseta de vigilancia de la privada Hacienda.

Movimientos verticales o hundimientos

En el fraccionamiento se identificaron 35 hundimientos: 10 en la Zona Oeste, 22 en la Zona Centro y tres en la Zona Este (Figura 12).

En la Zona Oeste, los hundimientos son notables al inicio de las privadas Ruiseñores y las Fuentes y al final de las privadas Laurel, Ciprés, Álamo, Pirul y Fresno (Figura 13a). También se observó asentamiento en la privada Las Rocas. De manera general, la mayoría de los hundimientos se encuentran cerca de la barda perimetral al sur de este terraplén. En la Zona Centro la mayoría de los movimientos verticales están en las privadas Clavel, Del Parque, Hacienda, Alcatraces y Noche Buena (Figura 13b). En las privadas Gardenias, Crisantemos, Tulipanes, Jacarandas,

Sauce y Azucenas se observó un hundimiento en cada una. En la Zona Este sólo se identificaron tres grietas debidas a hundimiento, aunque es probable que existan más pero no se pudo medir en dos privadas. Los asentamientos identificados están en las privadas Castaño, Naranja y De las Higueras.

Es importante señalar que a partir de una prospección geoelectrica efectuada después del trabajo geológico (Gutiérrez Zamudio et al., 2012), se interpreta que existe correlación entre las zonas de hundimiento diferencial y deformación con la paleotopografía, esta última, de origen estructural.

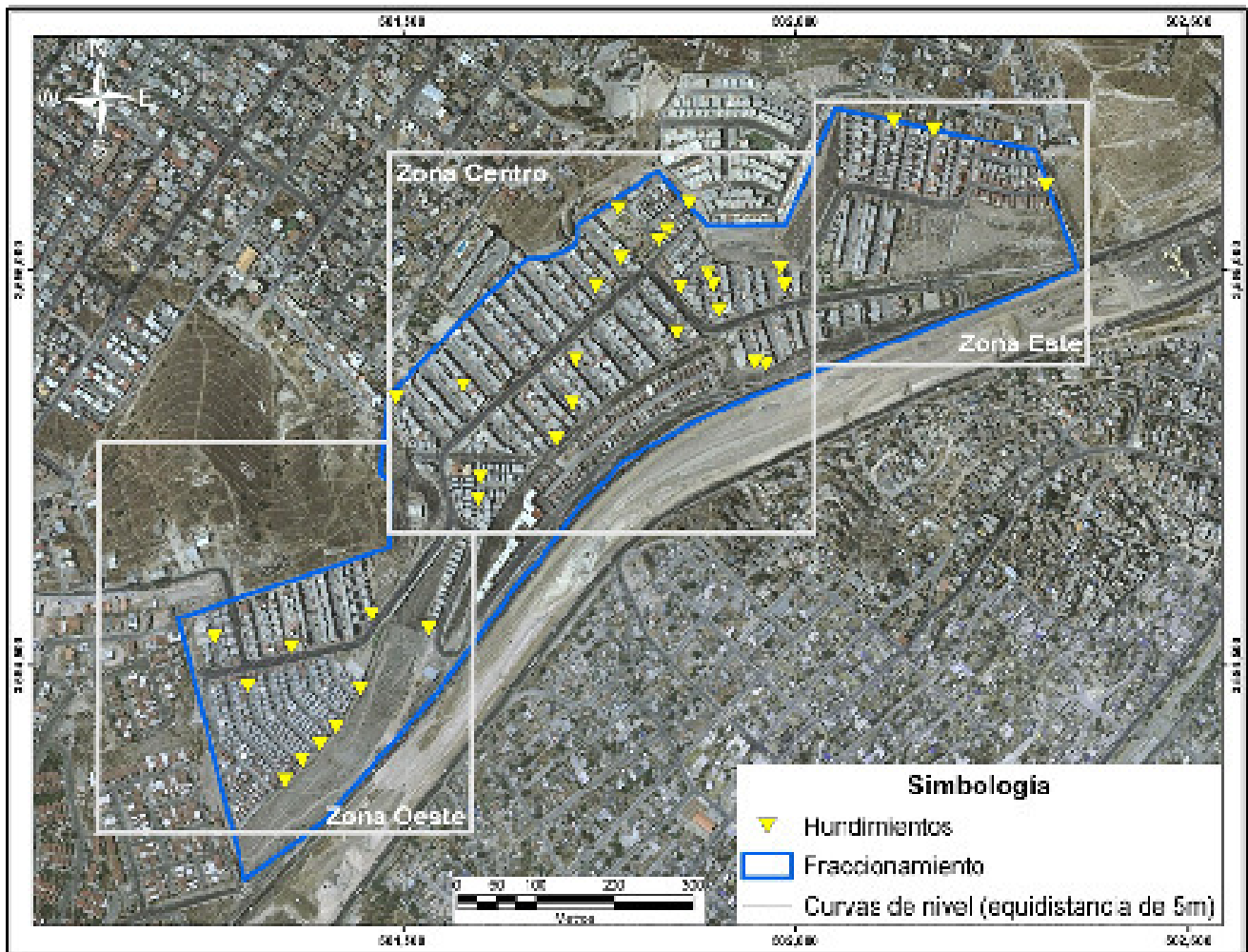


Figura 12. Ubicación de los hundimientos identificados en el fraccionamiento Jardines de Agua Caliente.



Figura 13. Ejemplos de hundimientos. a) privada Pirul y b) privada Alcatraces.

Direcciones de movimiento inferidas de fracturas en los inmuebles

Se registraron 91 grietas que sugieren movimiento horizontal en las privadas y viviendas a las que se tuvo acceso (Figura 14). En estos casos sólo existe un plano de referencia y no se puede identificar el sentido izquierdo o derecho del movimiento. Se identificaron 24 fracturas que indican dirección de movimiento en la Zona Oeste. La mayoría de ellos se midieron en la barda que se localiza al sur del fraccionamiento, en las privadas Canarias y Álamo, así como en

el parque que se ubica al centro de esta zona. En la Zona Centro se identificaron 50 rasgos que indican la dirección de movimiento (Figura 15a), las cuales se encuentran en las privadas Hacienda, Clavel, Azucenas, Del Parque y Noche Buena, así como en la barda perimetral sur. En la Zona Este se cartografiaron 17 grietas donde se puede interpretar la dirección de movimiento; la mayoría se encuentra en la privada De La Higuera, De La Mora y Castaño, así como en el parque que se encuentra en la entrada del fraccionamiento (Figura 15b).

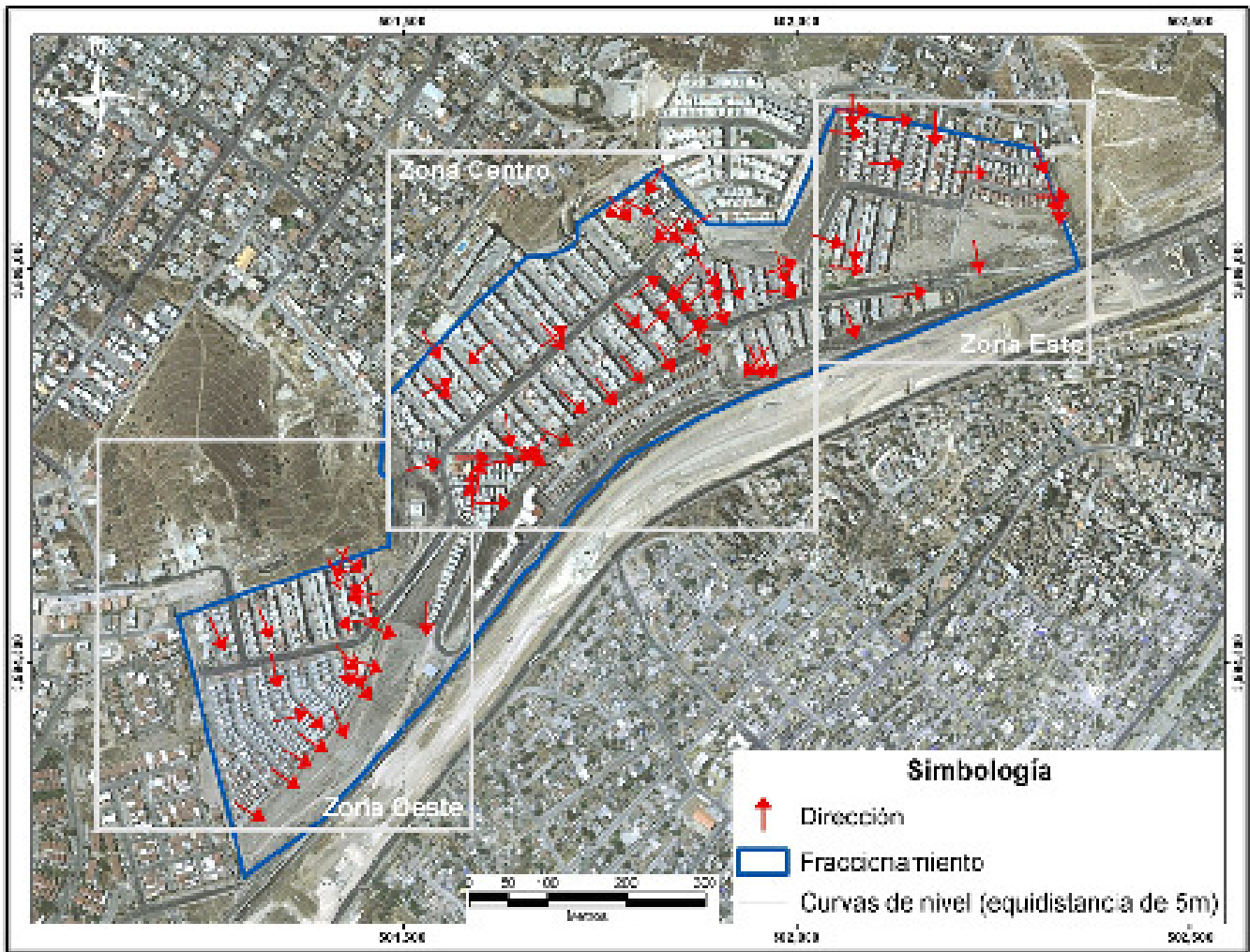


Figura 14. Cartografía de tendencias observadas en los inmuebles del área de estudio indicando la orientación preferente de movimiento.



Figura 15. Ejemplos de movimientos. a) Barda perimetral en la privada Azucenas, Zona Oeste, con movimiento del piso hacia la derecha y hacia arriba. b) Grieta de separación localizada en el patio trasero de una vivienda en la privada De la Higuera, al NW de la Zona Este.

DISCUSIÓN

Los datos estratigráficos y estructurales obtenidos en la periferia del área donde se asientan las viviendas del fraccionamiento sólo pueden correlacionarse utilizando los perfiles estructurales de la Figura 9. Las sección A-A' está orientada SW-NE, es paralela a la vialidad Aeropuerto indicada en la Figura 1 y atraviesa las tres zonas en las que se dividió el fraccionamiento. La B-B', localizada en la Zona Oeste, se orienta hacia NW-SE; en la sección A-A' se observa un anticlinal amplio, mientras que en B-B' las capas se ven suavemente plegadas en el extremo NW debido posiblemente a un efecto de arrastre del bloque de techo de la falla normal regional que se encuentra al W de la zona de estudio (Figura 3b). En ambos casos, los pliegues no son responsables de los daños en las construcciones salvo, en el extremo oriental de la Zona Este en donde, tanto el movimiento lateral derecho (Figura 10), como las direcciones de movimiento interpretadas en la Figura 14, posiblemente están influenciadas por la estratificación con echado de 25° hacia el NE. Las secciones C-C' y D-D', en sus partes W y

NW, respectivamente, intersectan fallas normales con componente de movimiento lateral a las que se les atribuyen los cambios en la actitud de los estratos. No hay evidencias en el campo que indiquen actividad reciente de esas estructuras de falla, sin embargo, la forma del drenaje natural antes del desarrollo del fraccionamiento puede correlacionarse con la distribución de las fallas y las fracturas (Figura 16).

Se considera que el nivel base de erosión local, responsable del relieve de la zona de estudio, está controlado por el drenaje principal ocupado actualmente por la vialidad Aeropuerto, o Arroyo Aeropuerto, que es paralelo a las fallas regionales normales NE-SW (Figura 3). El drenaje de las colinas donde se desarrolló el fraccionamiento fluía hacia el Arroyo Aeropuerto y se fue excavando siguiendo el patrón de fallas y fracturas del terreno, lo que explica el arreglo de enrejado del drenaje en la zona de estudio anterior al desarrollo del fraccionamiento y, como se muestra en seguida, la correlación entre las zonas afectadas y la paleotopografía.

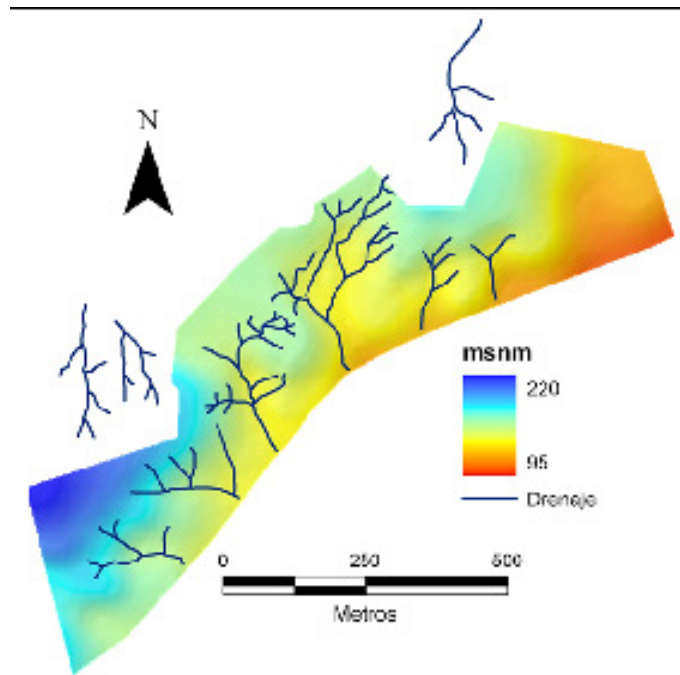


Fig. 16. Paleotopografía obtenida a partir de la base digital de alturas de 1999 del INEGI. El drenaje natural de esa época muestra una tendencia marcadamente rectilínea, de donde se infiere que está estrechamente relacionada con rasgos estructurales, principalmente fallas y fracturas.

Análisis de la paleotopografía y su relación con los daños en las viviendas

La explicación a los movimientos cartografiados puede plantearse a partir del análisis comparativo entre la paleotopografía y el relieve actual. Se construyó un mapa en el que se muestran las zonas de corte y relleno con los datos del relieve del año 1999 y los de 2002, correspondientes a los momentos antes y después de la preparación del terreno para urbanizarse (Figura 17). Son notables en la Zona Oeste los rellenos de hasta 23 m, mientras que los cortes más pronunciados, del orden de los 23 m, se efectuaron en la Zona Este. Comparativamente, la Zona Centro tiene valores intermedios de corte y relleno. En estas imágenes también son notables los contornos de aspecto rectilíneo de las zonas de corte y relleno. Cabe destacar que el límite topográficamente más bajo del fraccionamiento, en su Zona Oeste, es paralelo a la vialidad Aeropuerto y corresponde básicamente a una zona de relleno que, a su vez, coincide con las pendientes más fuertes que se ven en la Figura 2.

En la Figura 18 se presentan los mapas indicando los daños en construcciones, el paleodrenaje y las zonas de corte y relleno. La relación entre ellos se discute enseguida.

Movimientos horizontales (laterales derechos e izquierdos)

Los movimientos laterales identificados en el fraccionamiento guardan una buena correlación con la dirección del drenaje. En particular, en la Zona Oeste y esquina inferior izquierda de la Zona Centro, estos movimientos son notablemente paralelos al drenaje orientado E-W. En la parte central de la Zona Centro los movimientos principales son NW-SE, paralelos al drenaje principal de la cuenca más grande la que, a su vez, drenaba en el sentido de la paleopendiente hacia la vialidad Aeropuerto (Figura 19). En la Zona Este sólo hay tres datos de esa naturaleza, los cuales coinciden con los márgenes de una zona de relleno profunda (casi 23 m), aunque los movimientos son paralelos a la pendiente actual (SSE) y al echado de los estratos (NE).

Movimientos verticales o hundimientos

El 70% de los hundimientos en la Zona Oeste se ubica en la franja de relleno de más de 250 m de longitud que se orienta paralela a las pendientes, tanto actual como anterior a 1999 (Figura 18c). En la Zona Centro, sólo el 27% de los asentamientos está relacionado con áreas de relleno; sin embargo, el 60% de los hundimientos que ocurren en esta zona coinciden con paleodrenajes, lo que demuestra la importancia de identificar el drenaje natural original. En la Zona Este sólo se observaron tres hundimientos, de los cuales, dos están prácticamente en el límite de corte y relleno. Visto en su conjunto, el 68% de los hundimientos coinciden con las zonas de relleno y/o paleodrenaje (Figura 18c). Esta interpretación fue posteriormente verificada a partir de información geoeléctrica proporcionada por Gutiérrez Zamudio et al. (2012) con penetración hasta de 20 m. Se interpreta que el terreno original es más competente que el de relleno y que los alineamientos de contraste de resistividad son producto de fracturas que incrementan la permeabilidad y le imprimen una geometría definida por alineamientos inclinados aproximadamente 45° que, lo más probable es que se hayan desarrollado por carga litostática y variaciones en los contenidos de humedad durante los periodos alternados de lluvias y estiaje. Los pliegues formados, ya sea por compresión lateral o por carga litostática, desarrollarán un patrón de fracturas de abertura en la parte convexa o cima de pliegue de aspecto anticlinal, y de fracturas cruzadas en la parte cóncava o parte baja de un pliegue de aspecto sinclinal.

Direcciones de movimiento inferidas de fracturas en las viviendas

Las direcciones de movimiento inferidas a partir de un conjunto de datos de fracturas en los inmuebles indican que, en la Zona Oeste, el 79% de los movimientos identificados se encuentra en áreas de relleno (Figura 18d). Además, los movimientos se concentran cerca del límite sur del fraccionamiento donde siguen

preferentemente la dirección de la pendiente. En la Zonas Centro y Este el 43% y 20% de los movimientos están relacionados con zonas de relleno, respectivamente. Se observa también que las direcciones preferentes cerca del límite sur son paralelas a las pendientes. Este tipo de movimientos no guarda una buena correlación con las áreas de relleno en las Zonas Centro y Este.

Puede establecerse una correlación entre la distribución de los daños con respecto a su posición en las zonas de corte y relleno. En las columnas del lado derecho en los mapas “c” a “d” de corte y relleno de la Figura 18 se indica el porcentaje de las afectaciones a partir de un valor cero de referencia, donde los números positivos indican relleno y los negativos corte. En el caso de los movimientos horizontales (Figura 18b), el 61% ocurre en el intervalo de -6 m y +6 m, mientras que el 43% de los hundimientos (Figura 18c) y el 44% de los movimientos direccionados (Figura 18d) ocurren en el intervalo de 12m. Al abrir el intervalo a 24m, entre -12 m y +12 m, encontramos la siguiente distribución: 88% de los movimientos horizontales, 74% de los hundimientos y 73% de los movimientos direccionados. Dichas distribuciones indican que la zona de “interfase” entre los materiales del medio natural recortado y el de relleno, tiene correspondencia con las zonas donde el terreno es más susceptible de moverse debido al contraste entre las características físicas tales como porosidad, resistencia a la deformación y superficie de reposo, entre otras. En ese sentido, dicha “interfase” se comporta como una superficie de ruptura o de despegue de deslizamientos gravitacionales de traslación.

Relación del movimiento del terreno con las pendientes

Debido a que la gravedad es la fuerza promotora principal de los movimientos, también se sobrepusieron los movimientos cartografiados al mapa de pendientes de la Figura 2. Se presentan en la Figura 19 las direcciones de movimiento en una roseta con los datos para

cada zona y se observa que en la Zona Oeste la mayoría de los movimientos registrados tienen direcciones SSE y SE, paralelos a las direcciones de las pendientes. Según se muestra en la fotografía de la Figura 15a, existe la posibilidad de que esta zona sea una de deslizamiento de traslación, diferente a los rotacionales que son más rápidos. En la Zona Centro los movimientos tienen direcciones en arreglo ortogonal hacia el SW, SE y NE; las familias de datos de movimiento hacia el SE y NE son notablemente paralelas a las pendientes, principalmente las orientadas

hacia la vialidad Aeropuerto. En la Zona Este la dirección dominante de movimiento es hacia el E, en la dirección del echado de las capas y de la pendiente por lo que, en este caso en particular, puede interpretarse que hay deslizamiento traslacional, como los documentados por Highland y Bobrowsky (2008), lo cual también fue documentado fotográficamente (Figura 15b). De acuerdo con la Figura 19, puede interpretarse que las direcciones de movimiento en el fraccionamiento también están fuertemente influenciadas por las pendientes.

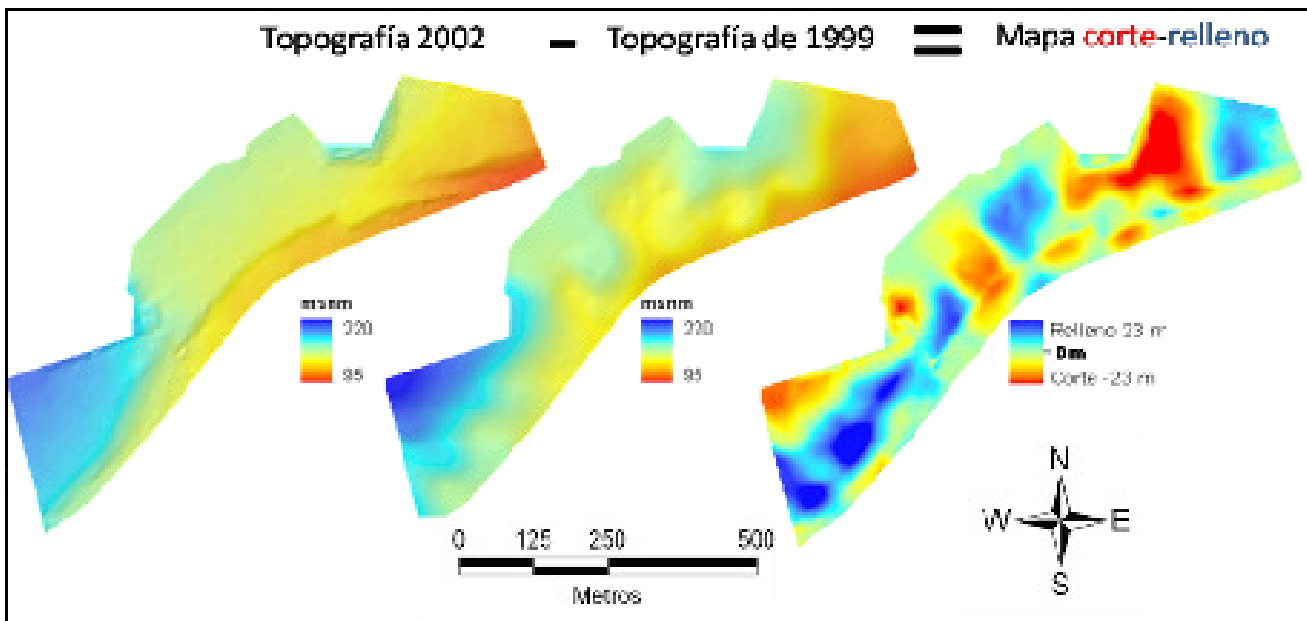


Figura 17. Mapa de corte-relleno obtenido al restar las elevaciones de 1999 a la topografía de 2002; se obtienen valores positivos en las zonas con relleno y negativos en aquellas áreas donde se cortó el terreno. La resolución en todas las imágenes es de 2m.

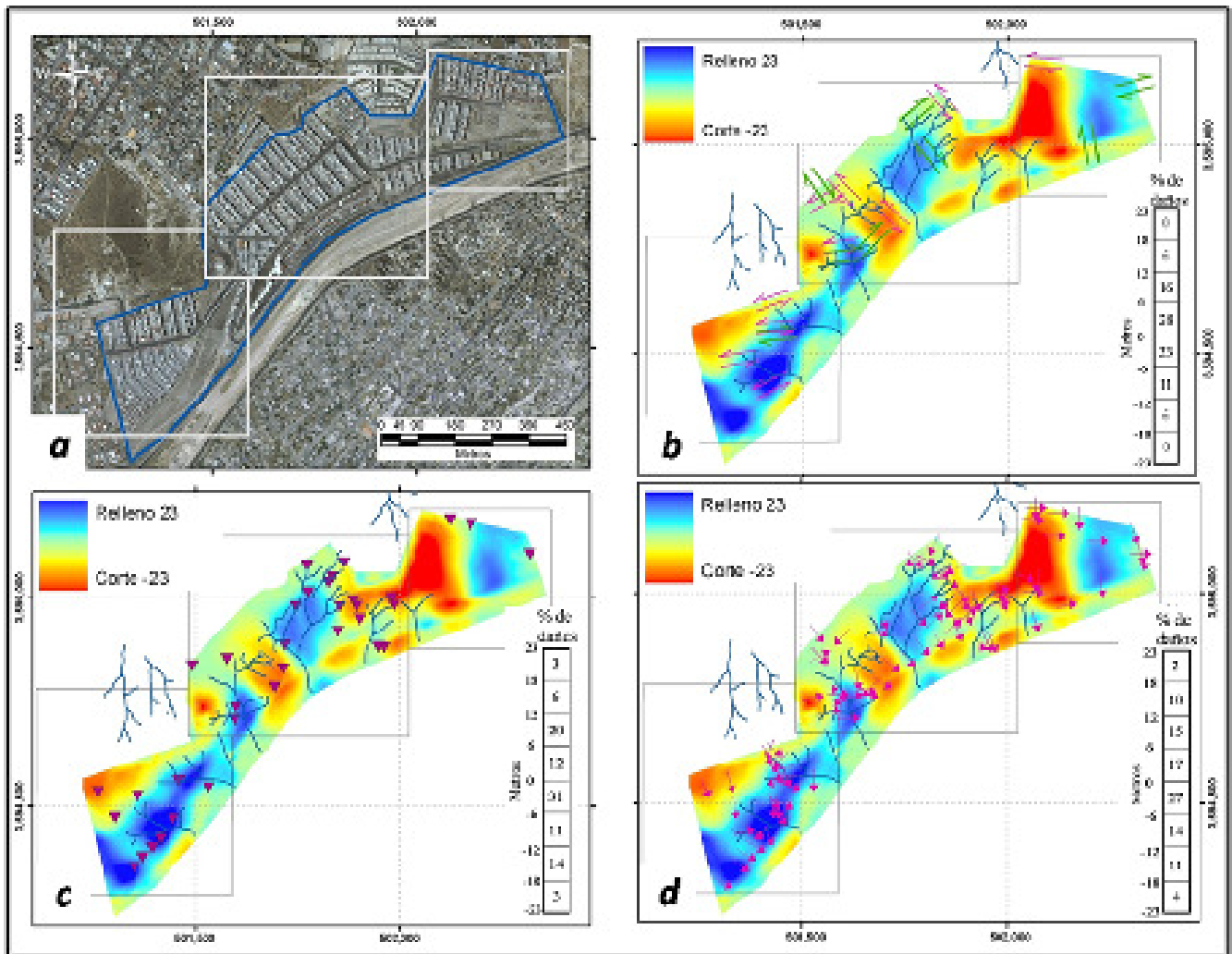


Figura 18. a) Fraccionamiento Jardines de Agua Caliente delimitado por el polígono azul. b) Mapa de corte-relleno con movimientos horizontales. c) Mapa de corte-relleno con hundimientos. d) Mapa de corte-relleno con direcciones de movimiento. En cada mapa se muestra el porcentaje de daños por intervalo de metros

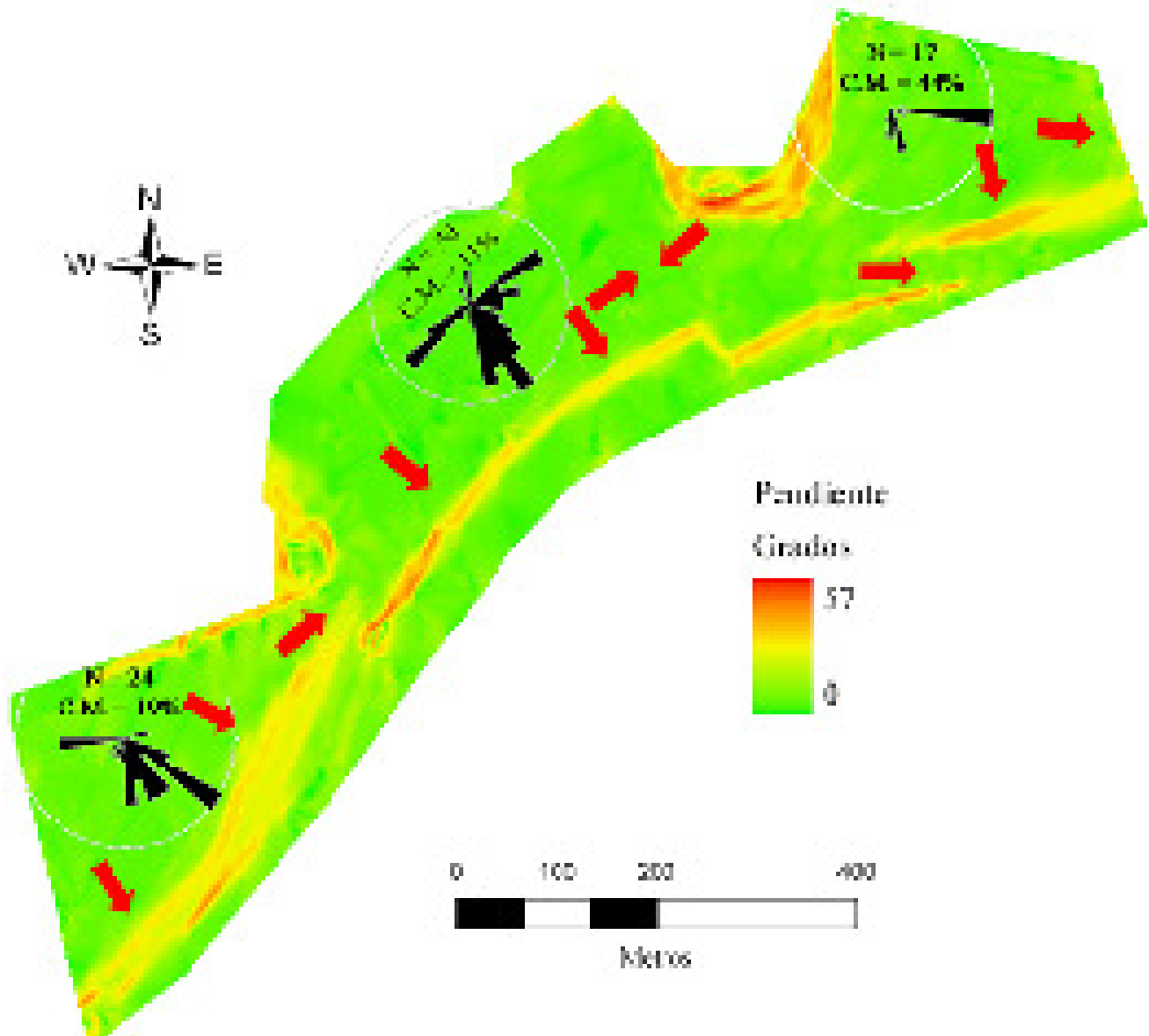


Figura 19. Mapa de pendientes del fraccionamiento indicando su dirección en cada zona con flechas rojas. Se muestran los diagramas de rosa de las direcciones de movimiento así como el número de datos y valor porcentual del círculo máximo para cada zona.

CONCLUSIONES

1. Aunque existe un registro instrumental pobre de la sismicidad en Tijuana y sus alrededores, la existencia de fallas regionales activas en la península y en el borde continental, hacen ineludible el análisis de la respuesta sísmica del terreno sobre el que se hacen desarrollos urbanos. Ciertos taludes de la zona ameritana, dada su precaria estabilidad, una evaluación que contemple un escenario sísmico tal y como se hizo ante la eventualidad del rompimiento de la falla La Nación en el condado de San Diego, California (Acosta-Chang y Montalvo-Arrieta, 1997).
2. El fraccionamiento Jardines de Agua Caliente se localiza entre fallas normales orientadas NE-SW en el interior de un amplio graben caracterizado por el desarrollo paralelo de fallas normales secundarias con componente de movimiento lateral que afectan a secuencias estratigráficas Plio-pleistocénicas de arenas y conglomerados.
3. Las secuencias estratigráficas están expuestas en algunos lugares de la parte superior de las zonas Oeste y Centro en que se dividió el fraccionamiento para su estudio, en donde se pueden hacer las mejores observaciones litológicas, como de fallas y fracturas. Las unidades estratigráficas están, en general, pobremente consolidadas, aunque existen algunas cementadas con carbonatos que definen horizontes competentes. En algunas unidades se observaron cortes de canales fluviales que incluyen fragmentos de material limo-arcilloso. En otras unidades arenosas es común encontrar matriz de ceniza volcánica.
4. La actitud de las unidades estratigráficas muestran pliegues anticlinales y sinclinales amplios con echados suaves, salvo en aquellos lugares donde fallas normales con componente de desplazamiento lateral aumentan la inclinación de las capas. No se observaron evidencias de reactivación de fallas.
5. El patrón geométrico del drenaje principal obtenido a partir de la topografía de 1999, que drena hacia el arroyo de la actual vialidad Aeropuerto, es predominantemente rectilíneo y sigue el patrón de las fallas y fracturas.
6. La topografía actual muestra que el drenaje original fue prácticamente rellenado en su totalidad. De la diferencia de alturas entre la topografía de 2002 y de 1999 resulta un mapa de corte y relleno con valores extremos de +23.35 m y -23.62 m, respectivamente.
7. Se identificaron tres tipos de daños a los inmuebles caracterizados por grietas o fracturas que indican movimiento relativo: a) movimientos horizontales mapeados como fallas de rumbo, b) hundimientos de pisos y paredes, y c) agrietamiento relacionado con movimiento horizontal del subsuelo.
8. Existe una buena correlación entre la distribución de los daños con respecto a la ubicación de las zonas de corte y relleno. Con respecto a los valores de corte y relleno, en el intervalo entre -12 m y +12 m, se observa el 88% de los movimientos horizontales, el 74% de los hundimientos y el 73% de los movimientos direccionados. Se interpreta que la zona de "interfase" entre los materiales del medio natural recortado y el de relleno corresponde a las zonas donde el terreno es más susceptible de moverse debido al contraste entre las características físicas y, que dicha "interfase", se comporta como una superficie de ruptura o de despegue de deslizamientos gravitacionales lentos de traslación.
9. En vista de que la gravedad es la principal fuerza promotora de los movimientos, en la Zona Oeste la mayoría de los movimientos registrados son SSE y SE, paralelos a las direcciones de las pendientes; en la Zona Centro, los movimientos hacia el SE y NE son notablemente paralelos a las pendientes, principalmente aquellas orientadas hacia la vialidad Aeropuerto; en la Zona Este la

dirección dominante de movimiento es hacia el E, en la dirección del echado de las capas y de la pendiente por lo que, en este caso particular, puede interpretarse que ocurre deslizamiento traslacional.

10. Finalmente, durante diciembre de 2011 y enero de 2012, los sondeos eléctricos y sísmicos efectuados por Gutiérrez Zamudio et al. (2012) en las zonas donde los daños en las construcciones y vialidades son más evidentes. Existe una buena correlación entre los cuerpos conductores y la distribución del paleodrenaje de la Figura 16, desarrollado a lo largo de zonas de falla o fractura. En los perfiles geoeléctricos los cuerpos resistivos correlacionan con el material sedimentario natural, mientras que la conductividad se incrementa por la existencia de fracturas, tanto en material natural como de relleno. Los resultados de los perfiles sísmicos manifiestan una correlación menos clara debido, principalmente, a que el contraste entre los cuerpos de relleno hechos durante la preparación del terreno tienen un contraste bajo de velocidades de onda con respecto al terreno sedimentario natural. Sin embargo, los perfiles sísmicos definen claramente los planos de estratificación mostrados en los perfiles estructurales.

RECOMENDACIONES

Con base en las conclusiones de este estudio de caso y otras experiencias en esta ciudad (Delgado-Argote et al., 1996 y 2011), es pertinente hacer las siguientes recomendaciones:

1. Bajo la premisa de que los movimientos principales ocurren en las zonas donde las pendientes del terreno natural cambian drásticamente, así como en las zonas correspondientes a los intervalos de -12 m y +12 m del mapa de corte-relleno (Figura 18), debe mantenerse un monitoreo permanente de movimientos en donde las viviendas muestren grietas .
2. En vista de que los inmuebles que han sufrido daños se encuentran en zonas que son susceptibles de seguir moviéndose, particularmente en los linderos de rellenos, es recomendable contar con la opinión de expertos en obras civiles que evalúen la estabilidad de las construcciones ubicadas en terrenos inestables o de estabilidad precaria ante escenarios que contemplen la sismicidad de la región. Un sismo es un factor disparador de deslizamientos y hay que tomar en cuenta que ya durante la década de los ochenta ocurrieron dos sismos de magnitud entre 2.5 y 3 dentro de un radio de 5 km de la zona de estudio.
3. Evitar las ampliaciones o modificaciones que impliquen mayor peso a los inmuebles para no aumentar la carga al terreno, o bien, construir bajo códigos sísmicos, considerando profundidades de cimentación por debajo de la zona de interfase.
4. El agua es un factor adicional, por lo que es indispensable mantener en estado óptimo el sistema de drenaje pluvial durante la época de lluvia. Además, debe revisarse periódicamente que no existan fugas de agua potable y drenaje, tanto en instalaciones domiciliarias como en las redes públicas. Los asentamientos diferenciales generan rupturas en las tuberías y, en consecuencia, fugas de agua, que incrementa la humedad y presión de poro, y disminuye la resistencia al cortante, principalmente en materiales granulares como los de la zona.
5. Monitorear la evolución de las fracturas en las casas midiéndolas en periodos mensuales o trimestrales, dependiendo de los antecedentes de la zona y evitar cubrirlas, para poder observar su desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos las facilidades otorgadas por los colonos del fraccionamiento para efectuar las observaciones y mediciones en sus Privadas y, en particular, a la Sra. Silvia Mora y al grupo de colonos que nos acompañó durante diferentes fases de este trabajo y nos facilitó los resultados preliminares de los sondeos eléctricos y sísmicos efectuados por GEOLAB. El alcance de este estudio no hubiera sido el mismo sin la ayuda documental proporcionada por la Dirección de Protección Civil de Tijuana, en particular, el material digital facilitado por el Oc. Ramón Moldrano. La versión final de este manuscrito se benefició enormemente gracias al arbitraje estricto de Víctor Manuel Hernández Madrigal, Felipe Escalona A. y un revisor anónimo.

REFERENCIAS

- Acosta-Chang, J.G. y Montalvo-Arrieta, J.C., 1997. Intensidades sísmicas para la región de Tijuana, Baja California, a partir del posible rompimiento de la falla La Nación (Mw = 6.5). *GEOS*, 17-3, p.128-138.
- Ashby, J. R., 1989. A resume of the Miocene stratigraphic history of the Rosarito Beach Basin, northwestern Baja California, Mexico. En: Patrick L. Abbott, editor, *Geologic studies in Baja California*, Book 63, p. 37-45.
- Bocco, G., Sánchez R., Riemann, H., 1993. Evaluación del impacto de las inundaciones en Tijuana (enero de 1993). Uso integrado de percepción remota y sistemas de información geográfica. *Frontera Norte*, Vol. 5, No.10, COLEF, p. 54-58.
- Böhnel, H., Delgado-Argote, L.A. and Kimbrough, D., 2002. Discordant paleomagnetic data for Middle-Cretaceous intrusive rocks from northern Baja California: Latitude displacement, tilt, or vertical axis rotation? *Tectonics*, V. 21-5. p. 1029-1043.
- 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*, 16-2, 57-89.
- 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*, vol. 30-2, 1-15.
- 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. and Allison, E., 1975. Reconnaissance geology of the State of Baja California, *Geological Society of America Memoir* 140, 170 pp.
- Gutiérrez Zamudio, A., Murillo Zapién, J. y Gómez Corzo, D., 2012. Exploración geofísica y geotécnica; Reporte de estudios geofísicos. Informe digital.
- 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.
- INEGI, 1999. Conjunto de datos vectoriales de la carta topográfica I11D71 La Presa, escala 1:50,000.
- 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, A. J., Ashby, J., Deméré, T. and Kuper, T., 1984. Correlation and depositional environments of the Middle Miocene Rosarito Beach Formation of northwestern Baja California, Mexico. En: J.A. Minch and J.R. Ashby, Editors, Miocene and Cretaceous depositional environments, northwestern Baja California, Mexico: Pacific Section, American Association of Petroleum Geologists, V. 54, p. 33-46.
- RESNOM, 2011, Catálogo de eventos sísmicos, División de Ciencias de la Tierra, CICESE.
- Rockwell, K. T., Hatch, E. M. and Shug, L.D., 1987. Late Quaternary rates Agua Blanca and borderland faults: Final Technical Report USGS, contract No. 14-08-0001-22012, 122 pp.
- 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.
- Suárez-Vidal, F., Armijo, R., Morgan, G., Bodin, P. and Gastil, G., 1991. Framework of recent and active faulting in 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. 285-300.
- Suárez-Vidal, F., 1993. Marco estructural de la Falla Agua Blanca, Baja California, México. En: Delgado-Argote, L. A. y Martín-Barajas, A., Editores, Contribuciones a la Tectónica del Occidente de México, Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 1, p. 24-39.

Manuscrito recibido: 15 de mayo de 2012
Recepción del manuscrito corregido: 25 de agosto de 2012
Manuscrito aceptado: 6 de septiembre de 2012

Calidad del agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos, Estado de Zacatecas, México

Diego Alonso Padilla-Reyes¹, Ernesto Patricio Núñez-Peña^{2*}, Felipe de Jesús Escalona-Alcázar²
y Jorge Bluhm-Gutiérrez²

¹Departamento de Geología, CICESE,
Carretera Ensenada-Tijuana 3918, Zona Playitas, C.P. 22860,
Ensenada, Baja California

²Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Zacatecas,
Calzada de la Universidad 108, Col. Progreso, C.P. 98058,
Zacatecas, Zacatecas

* epnunez@yahoo.com.mx

RESUMEN

El acuífero Guadalupe-Bañuelos está ubicado en la cuenca hidrológica del mismo nombre, en la región central del Estado de Zacatecas. Ahí se llevó a cabo un estudio de la hidrodinámica y de la calidad del agua a partir del examen de las concentraciones de los iones mayoritarios, litio y elementos traza determinados por medio de análisis químicos en 14 muestras de agua subterránea. Las obras muestreadas son nueve pozos profundos, tres norias, un manantial y un canal. La importancia de este acuífero es muy grande, ya que es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable para las ciudades de Zacatecas y Guadalupe, así como para las demás poblaciones distribuidas dentro de la cuenca. La secuencia estratigráfica de la cuenca -de la base a la cima- está formada por el Complejo Las Pilas del Cretácico Inferior, el Conglomerado Zacatecas del Paleoceno-Eoceno, el Grupo Volcánico Superior del Terciario y un Conglomerado Indiferenciado del Plioceno. Estas dos últimas unidades litológicas poseen propiedades hidráulicas de porosidad y permeabilidad que dan lugar a la zona saturada que conforma el acuífero. La calidad del agua fue determinada a partir de las concentraciones de los iones mayores (e.g. pH, Sólidos Totales Disueltos, Na, cloruros, sulfatos, nitratos) y de elementos traza (e.g. As, Pb, Hg, Li). Los resultados obtenidos fueron comparados con los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA-1994 y sus modificaciones del año 2000. Fue posible llegar a la conclusión de que el agua se encuentra dentro de los límites permisibles para uso y consumo humano. Con la información de campo se desarrollaron bases de datos en el programa ArcGIS Ver. 9.3, con el que se realizó el análisis espacial de la hidrodinámica y de la calidad del agua. La interpretación de la caracterización de los flujos de agua subterránea fue apoyada con gráficas de sodio vs. litio y temperatura vs. litio, definiéndose dos sistemas de flujo local, uno que fluye de sureste a noroeste cuya área de recarga está en la parte sur del acuífero en las poblaciones de San Antonio y San Francisco las Cumbres, y la descarga está en las cercanías de la población de Bañuelos, hacia la parte centro. El otro flujo tiene su área de recarga en la margen oriental de la Sierra de Zacatecas, sigue una dirección suroeste-noreste hasta llegar a la zona de descarga en las poblaciones de La Zacatecana y Laguna de Arriba.

Palabras clave: acuífero Guadalupe-Bañuelos, hidrodinámica, Zacatecas, calidad del agua, NOM-127-SSA-1994.

ABSTRACT

The Guadalupe-Bañuelos aquifer is located in the center-southeast part of the state of Zacatecas, México. In this aquifer a hydrodynamics and water quality study based on the concentrations of major ions, lithium and trace elements measured in 14 groundwater samples was conducted. The samples were taken from nine deep wells, three draw-wells, one spring and one channel. This aquifer is important because is the major source of fresh water for the Zacatecas and Guadalupe cities. The stratigraphic sequence of the basin, from bottom to top, is made up by the Lower Cretaceous Las Pilas Complex, the Paleocene Zacatecas Conglomerate, the Tertiary Upper Volcanic Group and a Pliocene Undifferentiated Conglomerate. The last two lithological units have hydraulic properties that form the saturated zone. Water quality was defined by using the concentrations of the following parameters: hydrogen potential, total dissolved solids, chlorides, sulfates, fluorides, nitrates, sodium, arsenic, lead, lithium and mercury. The results were compared with those defined in the NOM-127-SSA-1994 and its amendments of 2000, concluding that the groundwater has good quality. Characterization of groundwater flows was supported by graphics of temperature vs. lithium and sodium vs. lithium, concluding the existence of two local groundwater flow systems: one from southeast to northwest having its recharging area in the southern part of the aquifer. Its discharge area is near Bañuelos towards the center of the basin. The other groundwater flow has its recharging area in the Sierra de Zacatecas foothills. The flow moves from southwest towards northeast, in the area located in La Zacatecana and Laguna de Arriba.

Keywords: Guadalupe-Bañuelos aquifer, hydrodynamics, Zacatecas, water quality, NOM-127-SSA-1994.

INTRODUCCION

En los últimos diez años la población de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe se ha incrementado un 28%, lo que representa un incremento de 65,200 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI, 2000 y 2010). Este aumento ha propiciado una mayor presión en el uso del territorio principalmente en vivienda, lo que conlleva a la demanda creciente de servicios, especialmente el abastecimiento de agua potable.

El acuífero Guadalupe-Bañuelos, localizado dentro de la cuenca hidrológica del mismo nombre, es una de las principales fuentes

de abastecimiento de agua potable de estas ciudades. La cuenca hidrológica está ubicada en la parte central del estado de Zacatecas (Fig. 1). Al norte limita con la cuenca de Chupaderos y al sur con la de Ojo Caliente. Sus límites occidentales y oriental son las sierras de Zacatecas y de Tolosa, respectivamente.

Los conocimientos de la hidrodinámica y de la calidad del agua subterránea se basan en reportes inéditos de la Comisión Nacional del Agua (e.g. Investigaciones Técnicas del Subsuelo, 1982, Estudios y Proyectos Moro, 1997). Con la creciente

demanda en el consumo de agua, es indispensable actualizar la información hidrogeológica para que, tanto las instancias gubernamentales, como los usuarios de los aprovechamientos hidráulicos del acuífero Guadalupe-Bañuelos, tengan datos exactos que les permitan planificar su uso. De esta manera se podrán prevenir y atender oportunamente los problemas de calidad de agua, de posible contaminación ambiental y de uso eficiente y sustentable del agua subterránea. En este trabajo se presentan los resultados del muestreo hidrogeoquímico de 14 sitios del acuífero Guadalupe-Bañuelos. El análisis de esta información permitió actualizar la información de la calidad del agua y las características hidrodinámicas del acuífero.

METODOLOGÍA

La realización de este trabajo fue en campo y gabinete. El trabajo de gabinete consistió en la recopilación y revisión bibliográfica y cartográfica de la zona de estudio y áreas circunvecinas, con el fin de contar con un referente general que apoyara en la planeación de las actividades a seguir.

El trabajo de campo consistió en el muestreo de nueve pozos, tres norias, un manantial y un canal que conducía agua extraída del acuífero, y que en conjunto suman 14 aprovechamientos hidráulicos (Fig. 1). El muestreo se realizó siguiendo el protocolo para la toma de muestras propuesto por Cardona (2003), que consiste en: 1) mediciones y registros hidrogeológicos (profundidad al nivel estático y profundidad al nivel dinámico); 2) toma de la muestra; 3) filtrado y

preservación de la muestra; 4) mediciones fisicoquímicas de la muestra de agua *in situ*; 5) almacenamiento y 6) uso de blancos.

En cada aprovechamiento hidráulico se tomaron datos de oxígeno disuelto con un equipo de la marca Conductronic modelo Ox25. Los datos de pH, temperatura y conductividad eléctrica se tomaron con un Conductronic modelo PC18.

Los envases en los que se tomaron las muestras son de polietileno y fueron lavados con jabón libre de sulfatos, enjuagándolos primero con agua directa de la llave y por último dos veces con agua destilada.

El agua colectada en campo se tomó adaptando a las tuberías de descarga de los pozos un sistema de embudo con mangueras conectadas a una celda de aislamiento. Para el caso del manantial y el canal, el sistema se adecuó al flujo de la corriente de agua. Se eligió un área donde hubiese la menor turbulencia para evitar en lo posible la presencia de sólidos en suspensión. Se eliminaron las burbujas de aire llenando por completo el recipiente para evitar la interacción del aire con la muestra, y se procedió inmediatamente a su cerrado hermético utilizando tapa y contratapa.

En cada aprovechamiento se tomaron tres muestras en envases diferentes. La muestra para la determinación de aniones y cationes fue de 500 mL, y no se añadió ningún conservador; para la determinación de nitratos fue de 120 mL y se añadió un mililitro de H_2SO_4 al 97.9% como estabilizador para evitar la precipitación de los elementos en solución y la disolución de los sólidos contenidos en suspensión.

Para el análisis de los elementos traza se utilizó un envase de 60 mL y se filtró con una membrana de acetato de celulosa con aberturas de 45 μm de diámetro y se le agregó un mililitro de HNO_3 al 70% como estabilizador, para evitar la precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos. Todas las muestras fueron refrigeradas a 4°C para inhibir la acción bacteriana y retardar los cambios químicos que pudieran derivar como consecuencia del cambio de las condiciones originales en que se encontraba el agua dentro del acuífero.

La determinación de los parámetros físicos y los análisis químicos de aniones y cationes se realizaron en el Laboratorio AgroLab ubicado en el municipio de Morelos, Zacatecas, utilizando los métodos indicados en la Tabla I. La determinación de los elementos traza fue realizada en los laboratorios ActLabs en Ontario, Canadá, utilizando el método de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS).

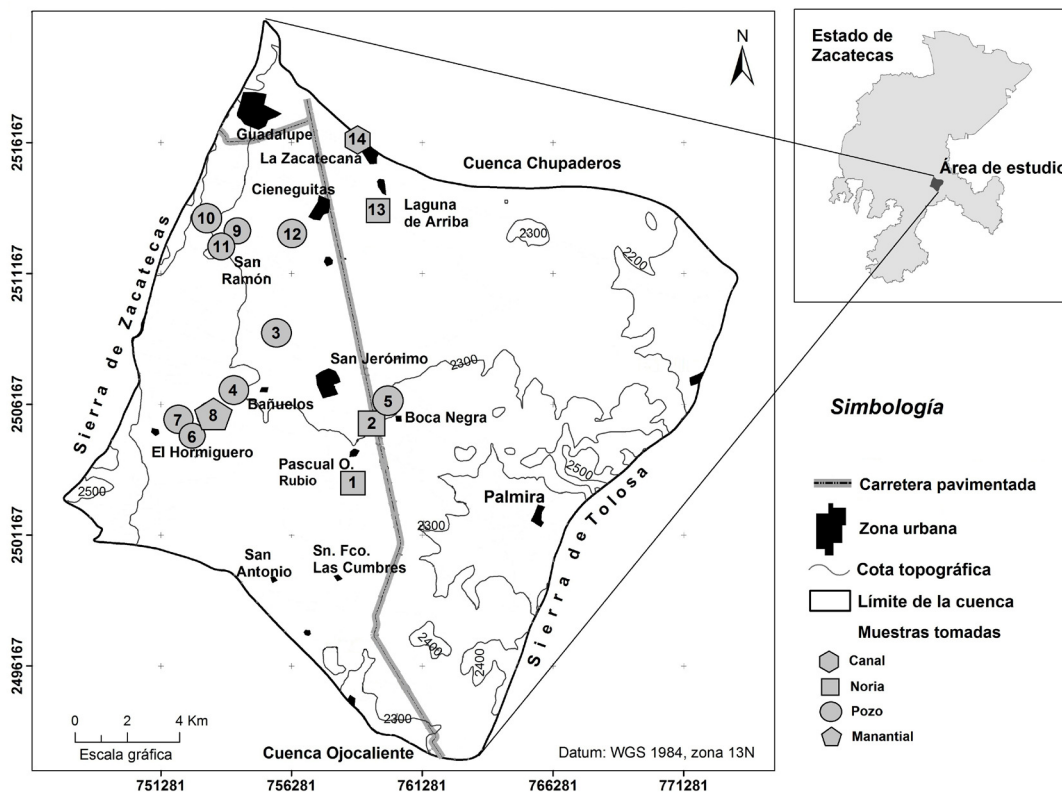


Figura 1. Mapa de localización de la cuenca hidrográfica Guadalupe-Bañuelos. Se muestran la ubicación de las muestras y el tipo de aprovechamiento.

Tabla I. Métodos utilizados para la medición de los elementos mayores.

Parámetro medido	Método utilizado
Cationes mayoritarios (Na ⁺ , Ca ⁺² , K ⁺ y Mg ⁺²)	Espectrofotometría de absorción atómica
Sulfatos (SO ₄)	Turbidimétrico
Fluoruros (F)	Potenciométrico
Cloruros (Cl)	Argentométrico
Nitratos (NO ₃)	Espectrofotométrico
Carbonatos y bicarbonatos (CO ₃ y HCO ₃)	Volumétrico de neutralización

La información obtenida en este estudio y la proporcionada por la Comisión Nacional del Agua fue procesada en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis 9.3.

GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Estratigrafía

La descripción de la estratigrafía está basada en las cartas geológico-mineras F13-B68 Guadalupe, y F13-B58 Zacatecas, escala 1:50000 editados por el Consejo de Recursos Minerales (1997) (COREMI), y en el trabajo de Escalona-Alcázar y colaboradores (2009) (Fig. 2). En el área de estudio afloran unidades volcánicas del Cretácico al Oligoceno que, por su trama son prácticamente impermeables (Investigaciones Técnicas del Subsuelo, 1982). Sin embargo, las unidades en donde se encuentra el acuífero son depósitos sedimentarios del Pleistoceno y períodos posteriores, caracterizados por su porosidad y permeabilidad y por su consolidación que varía de poca a moderada. A continuación se presenta una síntesis de la secuencia estratigráfica que de la base a la cima es:

Cretácico

Las unidades litológicas más antiguas son del Cretácico Temprano y son la Formación Zacatecas y el Complejo Las Pilas

(Escalona-Alcázar et al., 2009). La primera está formada por wackas y grauvacas, con algunos lentes de caliza, conglomerado y derrames de lava. El Complejo Las Pilas es una sucesión de flujos de lava de composición máfica, escasas tobas, diques, sills y lacolitos dioríticos interestratificados con grauvacas feldespáticas, lodolitas y calizas (Escalona-Alcázar et al., 2009). La edad de esta secuencia fue definida como del Cretácico Temprano a partir de edades U-Pb obtenidas en circones detríticos (Escalona-Alcázar et al., 2009).

Paleoceno

Durante el Paleoceno-Eoceno Temprano se depositó un conglomerado polimíctico, el conglomerado Zacatecas (Loza-Aguirre et al., 2008) el cual es de color rojo y consiste de clastos subangulares a subredondeados de cuarcita, filita, esquisto, diorita y rocas máficas, soportados por una matriz arcillo-arenosa. Varía de moderado a bien consolidado (Escalona-Alcázar et al., 2009).

Eoceno

El Conglomerado Zacatecas está cubierto en contacto transicional por el Grupo Volcánico Superior (GVS) de edad Eoceno-Oligoceno (Edwards, 1955; Escalona-Alcázar et al., 2003). El GVS está formado por la interestratificación de depósitos de piroclásticos de caída y de flujo que contienen cantidades variables de pómez y de fragmentos líticos. Los fragmentos de cristales son principalmente de plagioclasa y cuarzo y en menor proporción hay biotita y sanidino (Escalona-Alcázar et al., 2003).

Oligoceno

De acuerdo con la descripción realizada por Escalona-Alcázar et al. (2003), derrames riolíticos en varios tonos de rosa sobreyacen a las rocas del Eoceno. Las texturas dominantes son, en todos los casos, porfídica, esferulítica y brechada, en ese orden de abundancia, con una estructura bandeada. Los fenocristales son fragmentos de cristales de plagioclasa, biotita y escaso cuarzo. Cortan a la secuencia estratigráfica domos de composición presumiblemente riolítica que varían de color rosa a negro verdoso. La textura dominante es porfídica, perlítica y ocasionalmente esferulítica. La mineralogía está constituida por fenocristales de plagioclasa y escasos de cuarzo y biotita, en una matriz que varía de vítrea a afanítica (Escalona-Alcázar et al., 2003).

Plioceno

A las unidades litológicas antes mencionadas las cubre un Conglomerado indiferenciado formado por clastos de ignimbritas, tobas riolíticas y en menor grado por filitas, areniscas y andesitas (COREMI, 1997). Esta unidad solamente

es mencionada por el COREMI (1997) y es probable que se trate de depósitos de abanicos aluviales y fluviales. Es en esta unidad en donde se encuentra el acuífero Guadalupe Bañuelos. Su espesor varía de 20 m a 600 m CONAGUA (2002). El punto de salida de la cuenca que está ubicado en la comunidad de La Zacatecana.

Geología Estructural

En este trabajo los rasgos estructurales del área de estudio se tomaron de las cartas geológico-mineras F13-B68 Guadalupe, y F13-B58 Zacatecas editadas por el Consejo de Recursos Minerales (1997) y del trabajo realizado por Escalona-Alcázar y colaboradores (2009) (Fig. 2).

En el área de estudio hay dos eventos de deformación; el más antiguo es del Mesozoico y corresponde a la compresión debida a la Orogenia Laramide que formó fallas inversas y plegamientos de gran amplitud. Durante el Cenozoico la deformación fue extensional (Escalona-Alcázar et al., 2009). En el área de estudio solamente aflora una falla inversa de aproximadamente 7.3 km de longitud que se localiza al sur de Palmira y que afecta a las rocas del Cretácico Temprano.

La deformación extensional del Cenozoico de la parte centro y norte de México incluye al menos cinco eventos que formaron estructuras de rumbo NW-SE y NE-SW. De éstos, la deformación de Cuencas y Sierras es la más reciente y formó horst y grabens cuya orientación varía de NNE a NNW (Aranda-Gómez et al., 2000; Nieto-Samaniego et al., 2005). Las sierras de Zacatecas y de Tolosa (Fig. 2) son dos horst que limitan al poniente y al oriente, respectivamente con el acuífero Guadalupe-Bañuelos. En el

interior del área de estudio se observan dos sistemas de fallas normales, uno dirigido hacia el NW y el otro hacia el NNE cuyas dimensiones varían de 390 m a 3.7 km y de 300 m a 1.7 km, respectivamente. Estas estructuras afectan el flujo subterráneo porque ponen en contacto a las rocas volcánicas del Cretácico y Terciario Temprano, impermeables, con el Conglomerado Indiferenciado del Plioceno que es permeable. La distribución de estas estructuras define la configuración estructural de la cuenca en donde está el acuífero, por lo que, aunque en la Fig. 2 solamente se observan unas pocas estructuras, no significa que no existan más estructuras que estén sepultadas por los sedimentos recientes y afecten el flujo del agua subterránea.

Hidrogeología

El acuífero Guadalupe-Bañuelos ha sido estudiado con diferentes niveles de detalle por algunas dependencias del Gobierno Federal. El primer trabajo fue realizado por Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados (1978) y estableció que el agua subterránea de este acuífero cumple con las normas de calidad para su clasificación como agua potable.

En 1982, Investigaciones Técnicas del Subsuelo estableció que la transmisibilidad del acuífero, determinada en pruebas de bombeo de corta duración en pozos y norias en el Conglomerado Indiferenciado, varía entre 0.015 y 0.0443 m²/s. En el trabajo de Investigaciones Técnicas del Subsuelo (1982) se mostró por primera

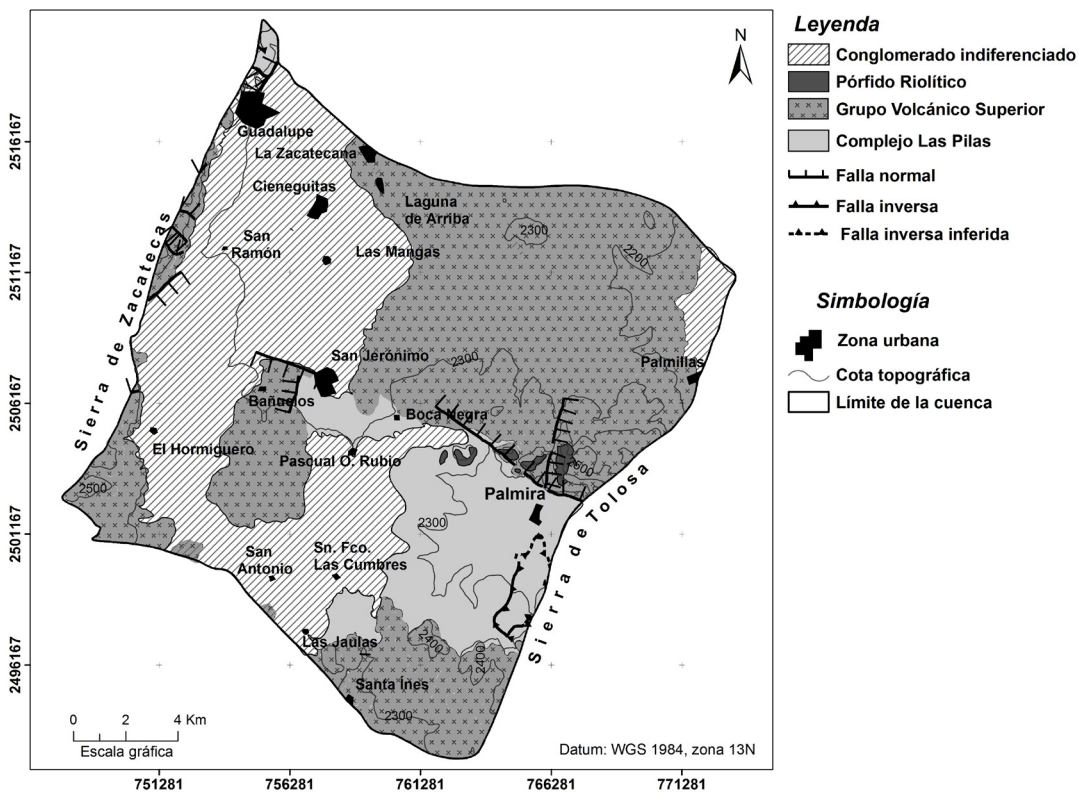


Figura 2. Mapa geológico de la cuenca hidrológica Guadalupe-Bañuelos (Modificado de Consejo de Recursos Minerales, 1997 y Escalona-Alcázar et al., 2009).

vez la configuración del nivel piezométrico del acuífero Guadalupe-Bañuelos en donde se observa que la dirección del flujo subterráneo va de sur a norte. Unos años después, Ingeniería de Evaluación y Prospección (1986) describió que el nivel piezométrico se localiza entre los cinco y 100 m de profundidad, y que el acuífero se mantiene en equilibrio hidrodinámico. Cabe hacer mención que los estudios referidos en este apartado y otros mencionados más adelante solamente pudieron ser consultados en las oficinas de la Comisión Nacional del Agua, sin que se haya obtenido el permiso para publicarlos.

Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C.V., en 1997, definió con base en la configuración piezométrica, que existen dos zonas de recarga, una al sur del acuífero y la otra al oeste, y que el sentido de los flujos subterráneos se orientan de sur a norte y de oeste a este. Ambos flujos confluyen hacia La Zacatecana.

El acuífero de Guadalupe-Bañuelos es de tipo libre y ocupa aproximadamente el 90% de la Cuenca de Guadalupe-Bañuelos. Tiene un espesor que varía de 20 m a 600 m. Las partes más someras son las ubicadas en los bordes de las sierras, mientras que las más profundas están en la parte central y norte. La única determinación del coeficiente de almacenamiento dio un valor de 0.2 a 0.29 (Investigaciones Técnicas del Subsuelo, 1982).

A partir de las observaciones hechas durante la perforación de los pozos se definieron tres unidades hidrogeológicas que agrupan a la litología de acuerdo con su permeabilidad y funcionamiento hidrogeológico (Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A., 1986). De la base a

la cima las unidades hidrogeológicas que forman el acuífero Guadalupe-Bañuelos están formadas por materiales de piamonte que se encuentran en el límite entre las sierras de Zacatecas y de Tolosa y el valle. Por su granulometría formada por la interestratificación de gravas y arenas, estos sitios son permeables y facilitan la filtración de agua hacia el acuífero. La segunda la constituyen depósitos fluviales formados por gravas y arenas con matriz arcillosa que están interestratificados. Esta unidad representa el receptáculo más importante de aguas subterráneas debido a que es permeable y a que fue detectada en toda la cuenca. Por último, está la unidad formada por el Complejo Las Pilas que constituye el basamento impermeable de la cuenca hidrológica (Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A., 1986).

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

Los parámetros fisicoquímicos permiten conocer de una manera general las características del agua asociadas a la cantidad de sólidos totales disueltos, interacción con las condiciones atmosféricas, profundidades diferentes de circulación y la actividad del ion hidrógeno. Estos parámetros deben ser medidos en el campo y, aunque sean menos precisos que las medidas hechas en el laboratorio, son más exactos porque reflejan las condiciones originales del agua dentro del acuífero. Los resultados de las mediciones hechas en campo se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en el campo.

Muestra	Tipo de aprovechamiento	Localidad	Conductividad eléctrica ($\mu\text{mhos/cm}$)	Oxígeno disuelto		Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	pH
				%	mg/L		
1	Noria	Pascual O. Rubio	644	38	3.5	16.1	8.43
2	Noria	Boca Negra	425	115	11.5	15.6	8.3
3	Pozo	San Jerónimo	433	106	8.2	26	7.76
4	Pozo	Bañuelos	492	129	9.4	27.7	8.25
5	Pozo	Boca Negra	480	142	12.8	16.8	7.85
6	Pozo	El Hormiguero	412	142	9.8	31.3	7.49
7	Pozo	El Hormiguero	455	152	10.8	29.1	7.74
8	Manantial	Bañuelos	506	98	9.3	13.2	8.37
9	Pozo	San Ramón	440	143	10.3	26.3	7.67
10	Pozo	San Ramón	595	137	9.9	27.4	8.1
11	Pozo	San Ramón	452	154	10.9	30.1	8.6
12	Pozo	Cieneguitas	467	154	9.1	26.7	7.85
13	Noria	Laguna de Arriba	1502	95	8.3	18.5	7.84
14	Canal	La Zacatecana	1035	44	4.1	19.1	7.2

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica del agua está determinada por la cantidad de iones disueltos en ella, por lo tanto, sirve como una medida indirecta de la concentración de sólidos disueltos totales. Las conductividades varían de 425 $\mu\text{mhos/cm}$ a 1502 $\mu\text{mhos/cm}$. En la figura 3 se observa que existen dos zonas de baja conductividad, una está en la parte sureste del acuífero y la otra hacia la parte noroeste. También se pueden ver dos zonas de alta conductividad. Una está en el centro y la otra en la región noreste. Ya que la conductividad eléctrica está directamente relacionada a la concentración del total de sólidos disueltos (STD), se infieren éstas áreas como las de mayor concentración de (STD) y podrían estar relacionadas a zonas de descarga del acuífero.

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto en el agua subterránea generalmente indica la exposición del agua a la influencia de la atmósfera, por lo tanto, este parámetro da una noción relativa de una incorporación reciente o no del agua al flujo subterráneo. A mayor cantidad de oxígeno disuelto, menor es la profundidad de circulación, o menor el tiempo de haberse incorporado al flujo subterráneo. En caso contrario, con un porcentaje menor de oxígeno disuelto se indica, ya sea que la circulación se encuentra a gran profundidad, o que ha tenido un mayor tiempo de residencia relativa (Edmunds y Smedley, 2000), lo cual nos ayuda en la identificación de posibles zonas de descarga.

Las cantidades de oxígeno disuelto medido en los 14 aprovechamientos varían de 38% y 3.5 mg/L hasta 154% y 10.9 mg/L. En la figura 3 se puede observar una zona de alto contenido de oxígeno disuelto cerca de San Jerónimo y Boca Negra hacia el sureste del acuífero, y otra también de alto contenido en la parte noroeste. Hacia la zona noreste se encuentra una zona de bajo contenido de oxígeno disuelto. Estas diferencias de oxígeno disuelto coinciden con los valores de la conductividad eléctrica señalados en el apartado anterior.

Temperatura

Las mediciones del agua subterránea varían de 13°C en la parte sureste del acuífero cerca de las comunidades de El Hormiguero y Pascual O. Rubio, hasta 31°C en la porción noroeste del mismo, en los alrededores de San Ramón (Fig. 3).

La clasificación de Schöeller (1962) establece las condiciones para caracterizar el agua subterránea de acuerdo a su temperatura en hipotermal, ortotermal e hipotermas de acuerdo a lo siguiente:

1. Sí la temperatura del agua subterránea es mayor a la temperatura media anual +4°C, entonces se consideran como aguas termales.
2. Sí la temperatura del agua subterránea es mayor a la temperatura media anual pero menor a la temperatura media anual +4°C, entonces se consideran aguas ortotermas o normales.
3. Sí la temperatura del agua subterránea es menor a la temperatura media anual, entonces se clasifica como aguas frías o hipotermas.

Dado que la temperatura media en superficie para el periodo 2000-2008 (los años 2009 y 2010 se omitieron por no tener los datos completos al momento de realizar éste estudio) es de 15.0°C en la estación San Jerónimo y de 16.5°C en la estación Guadalupe, se obtuvo que la temperatura media en superficie de la cuenca hidrológica es de 15.75°C. Bajo las condiciones de la clasificación de Schöeller (1962) y definida la temperatura media, se obtuvo que el 57% de las muestras recolectadas tienen temperatura superior a 19.75°C, valor mínimo para que se consideren como aguas termales. La elevada temperatura puede deberse a reacciones exotérmicas del agua con los minerales que forman la roca encajonante; este proceso estaría favorecido por la cercanía con el Distrito Minero de Zacatecas. Otro origen podría ser la circulación del agua a mayor profundidad, es decir, proceder de un flujo regional. La comprobación de cualquiera de estas hipótesis está más allá del objetivo de este trabajo. El 28% de las muestras se encuentran en la clasificación de aguas ortotermas y el restante 15% referido a las muestras dos y ocho tienen temperatura menor a los 15.75°C, y por lo tanto se clasifican como aguas frías.

Potencial hidrógeno

Las muestras analizadas tienen un pH que varía de 7.2 a 8.6 y se encuentran dentro del rango permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y sus modificaciones en el año 2000, en la cual se establece como límites permisibles para el consumo humano el valor mínimo de 6.5 y como valor máximo 8.5, a excepción de la muestra número 11 que presenta un valor de 8.6.

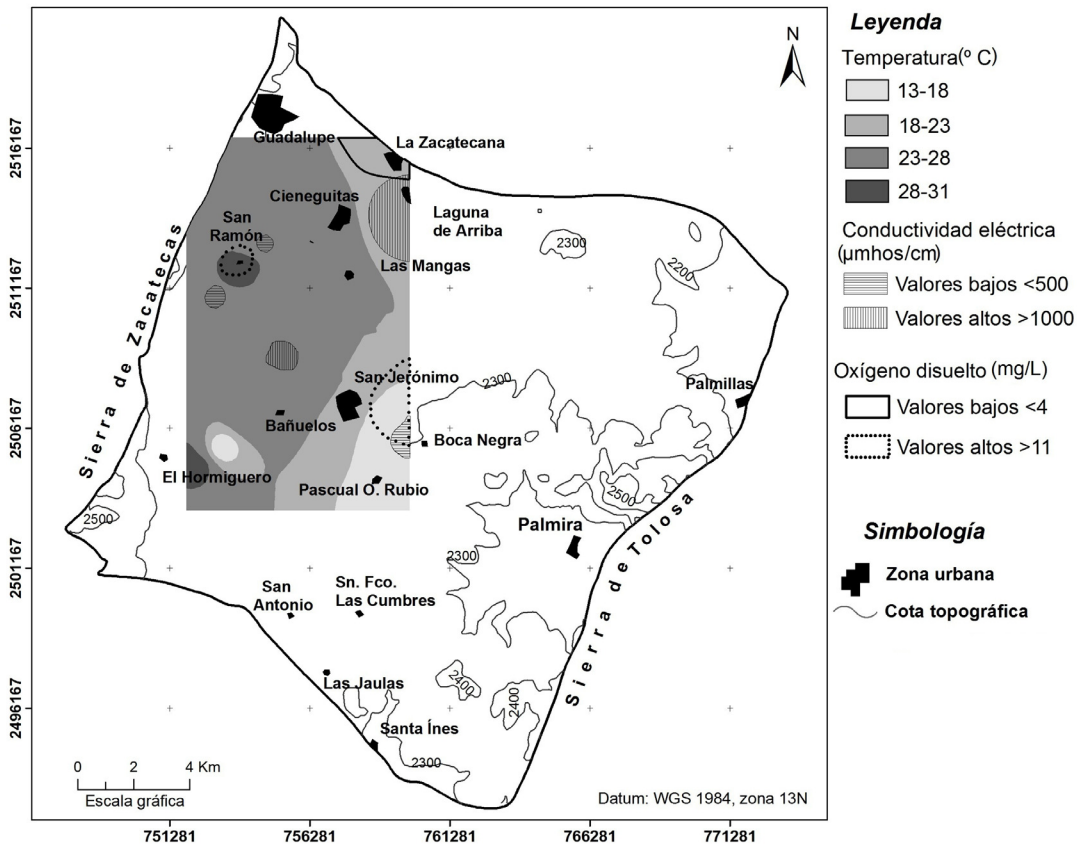


Figura 3. Distribución de los parámetros físicoquímicos medidos en los aprovechamientos hidráulicos muestreados.

CALIDAD DEL AGUA

En México la Secretaría de Salud a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, y sus modificaciones en el año 2000 (en adelante sólo Norma), establece las características microbiológicas, físicoquímicas y radiactivas que debe cumplir el agua para su uso potable. Esta Norma fue la referencia para la comparación de los resultados de los análisis físicoquímicos obtenidos en las muestras.

Familias de agua

Los aniones: bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^-), nitrato (NO_3^-), fluoruro (F) y carbonato (CO_3^-) y los cationes: sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^+) y magnesio (Mg^+) se utilizaron para identificar las familias de agua (Fig. 4). Las muestras se agruparon considerando las concentraciones de aniones (HCO_3^- , Cl^- y SO_4^-) y las concentraciones de los cationes ($\text{Na}^+\text{+K}^+$, Ca^+ , Mg^+) en miliequivalentes por litro. La clasificación que se utilizó fue definida utilizando una hoja de Excel, considerando para ello los porcentajes de las concentraciones de aniones (Ec. 1) y cationes mayores (Ec. 2), en donde el

grupo y su composición se establece si la muestra sobrepasa el 50% de un anión o catión. El cálculo de las concentraciones fue utilizando la Ecuación de Balance de Iones:

$$\%anión = \frac{anión}{HCO_3^- + Cl^- + SO_4^{2-}} [1]$$

$$\%catión = \frac{catión}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} [2]$$

Los resultados permitieron definir cuatro familias de agua: bicarbonatada-cálcica, bicarbonatada-mixta, mixta-cálcica y sulfatada. Los primeros dos grupos contienen el 86% del total de las muestras. Las dos familias restantes solo representan una por muestra.

Sólidos totales disueltos (STD)

Los valores de sólidos totales disueltos contenidos en las muestras varían de

188 mg/L a 709 mg/L (Tabla III), es decir, debajo de los 1,000 mg/L que es el límite oficial permisible según la Norma para que el agua sea apta para consumo humano.

Cloruros

Los valores de Cloruros obtenidos en las muestras analizadas varían de 32 mg/L a 222 mg/L (Tabla III) que están debajo de lo establecido por la Norma. Se observa que solo los valores más altos y cercanos al límite oficial se localizan en los alrededores de las poblaciones de Laguna de Arriba y la Zacatecana. Este aumento en las concentraciones de cloruros podría ser de origen antrópico, ya que se tiene conocimiento de que anteriormente en esta región se descargaban aguas residuales.

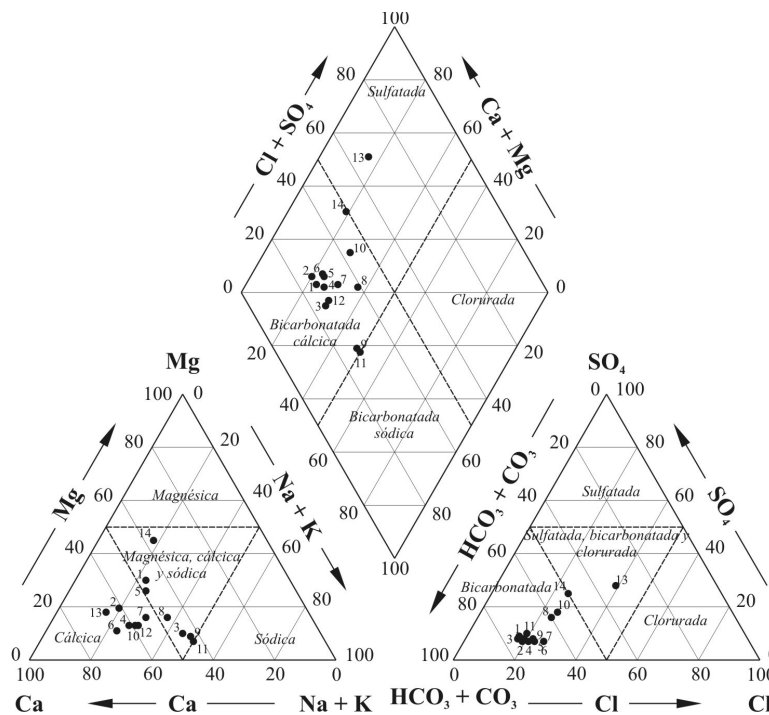


Figura 4. Diagrama de Piper con las familias de agua de las muestras analizadas.

Sulfatos

En lo que se refiere a los sulfatos, el contenido de las muestras analizadas se varía de 18.7 mg/L a 212 mg/L, esto es, debajo de los 400 mg/L establecidos por la Norma (Tabla III). Al igual que con los cloruros, los valores más altos están en los alrededores de las localidades Laguna de Arriba y La Zacatecana. Este incremento podría deberse a una alteración antrópica, debido a las descargas de aguas residuales que anteriormente se realizaban en esta región. Además, en tiempos de la Colonia, en La Zacatecana se depositaban los residuos de las minas, por lo que la alteración de los antiguos jales, ahora sepultados por sedimentos y cubiertos por el agua de la laguna, podría ser la causa de este aumento.

Fluoruros

El contenido de fluoruro varía de 0.48 mg/L a 3.20 mg/L, el valor más alto corresponde a la muestra número diez, recolectada en San Ramón (Fig. 5). El resto se encuentra dentro del rango permitido para agua potable por la Norma que tiene como límite oficial 1.5 mg/L (Tabla III).

Arsénico

Los valores de arsénico varían de 0.00147 mg/L a 0.3 mg/L, lo que en general los ubica debajo del límite de 0.05 mg/L establecido por la Norma. Solamente la muestra diez, cuyo valor es de 0.3 mg/L (Tabla III), rebasa el límite definido por la Norma. Esta muestra está en las inmediaciones de San Ramón (Fig. 5). La muestra contiene seis veces más arsénico que lo permitido para que el agua sea aceptable para consumo humano. Además, considerando que no es zona agrícola ni de alguna otra actividad antrópica que pudiera generar

esos valores, se sugiere contaminación de naturaleza geogénica; no se cuenta con más datos que permitan tener una mejor idea del tipo de roca o estructura que lo pudiera generar.

Plomo

El contenido de plomo de las muestras varía de 0.00445 mg/L a 0.00986 mg/L. El total de las muestras se localiza por debajo del límite oficial permitido de 0.01 mg/L. Las concentraciones más altas relativas se localizan en la parte noroeste del acuífero, cerca de la población de San Ramón; mientras que los más bajos están en la parte noreste del acuífero, donde se localizan las poblaciones de Laguna de Arriba y La Zacatecana (Tabla III).

Mercurio

Los resultados de los análisis de las muestras recolectadas tienen valores dentro del rango 0.0003 mg/L a 0.0006 mg/L. Esto significa que todas están debajo del límite oficial permitido de 0.001 mg/L para calificar como agua potable según la Norma (Tabla III).

Como puede observarse en la Tabla III la mayoría de los parámetros se encuentran por debajo del límite permitido por la Norma, a excepción de la muestra número diez que tiene valores elevados de arsénico y flúor. Si tomamos en cuenta que la muestra fue tomada en los alrededores de San Ramón (que no es zona agrícola ni de alguna otra actividad antrópica) podemos sugerir que los valores elevados de arsénico y flúor se deben a contaminación de carácter geogénico. Finalmente, el agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos califica como agua potable de buena calidad según la Norma.

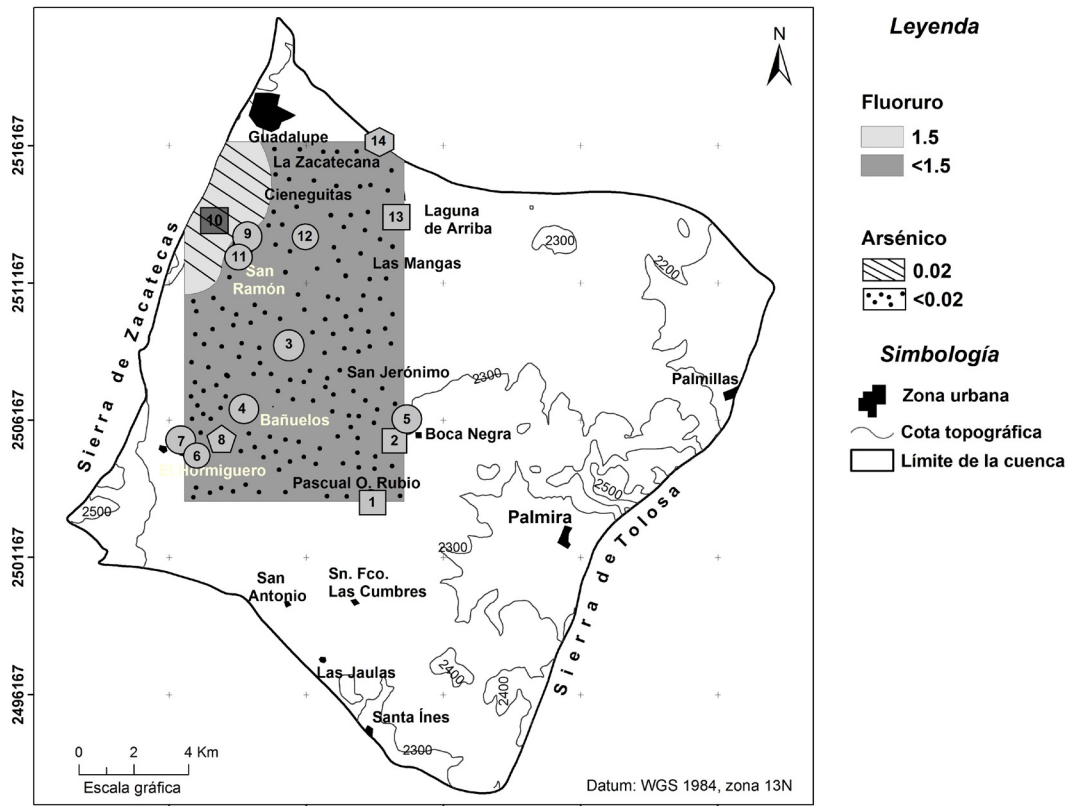


Figura 5. Mapa que muestra la zona de influencia debida a la muestra diez, la cual sobrepasa la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en el contenido de fluoruro y arsénico.

CARACTERIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO

El agua, a medida que fluye por el subsuelo, interactúa con los distintos tipos de roca y así incorpora al líquido los elementos que le proporcionan al acuífero sus características hidrogeoquímicas. La interpretación de los datos hidrogeoquímicos aporta valiosos recursos para una correcta caracterización de los sistemas de flujo (Custodio y Llamas, 1983).

Las zonas con mayor contenido de oxígeno disuelto se localizan hacia la parte sureste del acuífero, cerca de las poblaciones de

San Ramón, San Jerónimo y Boca Negra (Fig. 3). Con base en el alto contenido de oxígeno disuelto, concentraciones bajas de STD y bajas temperaturas del agua subterránea se sugiere que la margen occidental de la Sierra de Tolosa y en los alrededores de las localidades de San Jerónimo y Boca Negra podrían ser zonas potenciales de recarga. Los valores bajos de oxígeno disuelto obtenidos en La Zacatecana, aunados a la presencia de las mayores concentraciones de STD sugieren que es una zona de descarga.

Tabla III. Resultados de los análisis químicos de las muestras de agua. Los límites permisibles corresponden a los establecidos en la Norma, (ne= no establecido en la Norma). Todos los valores están expresados en mg/L. En negritas los valores que están sobre el límite permitido.

Mues- tra	Localidad	STD	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	HCO ₃ ⁻	As	Pb	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	Li	Hg
1	Pascual O. Rubio	323	49.01	33.2	0.81	366.35	0.00514	0.00807	31.4	15.5	74.0	28.1	0.014	0.0005
2	Boca Negra	229	42.88	21.6	0.48	282.88	0.00364	0.00758	15.4	20.7	72.4	13.6	0.016	0.0004
3	San Jerónimo	199	32.67	20.7	1.12	252.73	0.0154	0.00634	28.6	9.4	60.5	6.3	0.04	0.0004
4	Bañuelos	195	42.88	18.7	1.13	250.41	0.0101	0.00491	21.2	8.6	52.8	6.9	0.038	0.0004
5	Boca Negra	232	53.09	20.2	1.16	272.44	0.00464	0.00473	21.4	10.3	48.2	15.8	0.02	0.0003
6	El Hormiguero	188	46.97	20.6	0.92	253.89	0.00667	0.00497	22.4	6.3	65.5	7.0	0.044	0.0003
7	El Hormiguero	202	57.18	22.6	0.93	257.37	0.00955	0.00481	26.7	9.2	49.6	9.0	0.021	0.0003
8	Bañuelos	240	53.09	50.6	0.65	238.82	0.00147	0.00549	37.8	11.4	49.5	10.4	0.002	0.0004
9	San Ramón	206	44.93	21.8	1.28	246.94	0.0163	0.00507	41.0	7.2	32.4	3.1	0.075	0.0003
10	San Ramón	283	63.3	62.4	3.2	244.62	0.3	0.00986	34.9	7.9	73.1	9.5	0.169	0.0006
11	San Ramón	215	38.8	29.4	1.34	252.73	0.0166	0.00778	44.6	5.0	34.3	3.1	0.081	0.0003
12	Cieneguitas	201	36.76	21.7	0.94	248.10	0.0126	0.0056	21.2	10.4	46.1	6.2	0.031	0.0003
13	Laguna de Arriba	709	222.59	212	0.8	322.29	0.00698	0.00733	43.4	22.3	204.6	33.5	0.03	0.0006
14	La Zacatecana	487	110.27	150	0.73	374.46	0.0272	0.00445	68.2	26.5	143.2	105.9	0.063	0.0005
<i>Límite permisible</i>		<i>1000</i>	<i>250</i>	<i>400</i>	<i>1.5</i>		<i>0.05</i>	<i>0.025</i>	<i>200</i>	<i>ne</i>	<i>ne</i>	<i>ne</i>	<i>ne</i>	<i>0.001</i>

La conductividad eléctrica está directamente relacionada con la cantidad de sólidos disueltos totales en el agua, los cuales se incorporan a medida que el agua interactúa en su recorrido por el medio geológico. En la Tabla III los valores más bajos de STD están en la población El Hormiguero, en la base occidental de la Sierra de Zacatecas. La margen occidental de la Sierra de Zacatecas se considera de recarga debido al bajo contenido de STD y alto contenido de oxígeno disuelto en el agua (Fig. 3). Además, siguiendo con el desnivel topográfico, hacia las poblaciones

de La Zacatecana y Laguna de Arriba se incrementa la cantidad de STD, es decir hacia la zona de descarga. Otra zona que presenta los mayores contenidos en STD se localiza en la parte centro del acuífero, hacia el norte de Bañuelos, lo cual puede representar otra zona de descarga.

La piezometría también es un recurso importante en la caracterización de los sistemas de flujo subterráneo pues mide las variaciones de las cargas hidráulicas, y permite una interpretación de la configuración de los flujos del agua

subterránea. En el mapa de elevación del nivel piezométrico se observan dos flujos (Fig. 6). Uno representa un flujo con dirección sureste-noroeste (A-A' en la Fig. 6) variando desde la elevación más alta de 2350 m.s.n.m. en el sureste a 2230 m.s.n.m. en la parte central de la cuenca, cerca de la población de Bañuelos. Se define otro flujo subterráneo (B-B' en la Fig. 6) que está en la porción occidental del acuífero y fluye de suroeste a noreste, hacia La Zacatecana, variando el nivel piezométrico de 2320 m.s.n.m. hasta 2230 m.s.n.m.. Como se señaló en párrafos anteriores, los STD se incrementan en esta misma dirección y el oxígeno disuelto disminuye siguiendo esta misma tendencia.

A lo largo de cada uno de los flujos anteriormente indicados se realizaron las secciones hidrogeoquímicas, A-A' y B-B' (Fig. 7). Estas secciones son la base para interpretar la evolución química del agua subterránea a partir de los parámetros temperatura y litio. La temperatura y el litio pueden ser utilizados como parámetros que indican el tiempo de residencia relativa del agua en un sistema de flujo; a mayor temperatura y concentración de litio, mayor será el tiempo de residencia relativa, por el contrario a menor temperatura y concentración de litio, su residencia relativa será menor. Esto se debe a que el litio de las rocas ígneas félsicas es fácilmente liberado y no se incorpora a la formación de nuevos minerales, ni es sometido al proceso de precipitación, además de que la concentración de litio en el agua subterránea tampoco es afectada por procesos de oxidación-reducción (Edmunds y Smedley, 2000).

En la Fig. 7 se representa la relación temperatura-litio para la sección A-A', la cual muestra una tendencia lineal positiva a lo largo del flujo. Esto representa mayores tiempos de residencia relativa en el sistema hidrogeológico, pues las concentraciones aumentan siguiendo la dirección del flujo (Edmunds y Smedley, 2000). Las mayores concentraciones de litio y de temperatura están representadas por la familia bicarbonatada cálcica. El grupo del agua bicarbonatada mixta, presenta temperaturas bajas y concentraciones pobres de litio, por tanto podemos concluir que estos dos grupos, aunque están asociados al mismo sistema de flujo, poseen tiempos de residencia diferentes en el acuífero.

En la sección B-B' (Fig. 7) la familia bicarbonatada mixta tiene las mayores temperaturas y concentraciones de litio, a excepción de la muestra 10, caso contrario de lo que sucede en la sección A-A', lo que indica que las dos secciones representan dos flujos distintos entre sí. La familia bicarbonatada cálcica presenta un amplio rango en cuanto a concentración de litio. Se observa que el comportamiento de la relación temperatura-litio en la sección B-B' también muestra un comportamiento lineal. Esto indica que la familia bicarbonatada mixta posee un mayor tiempo de residencia relativa en el sistema.

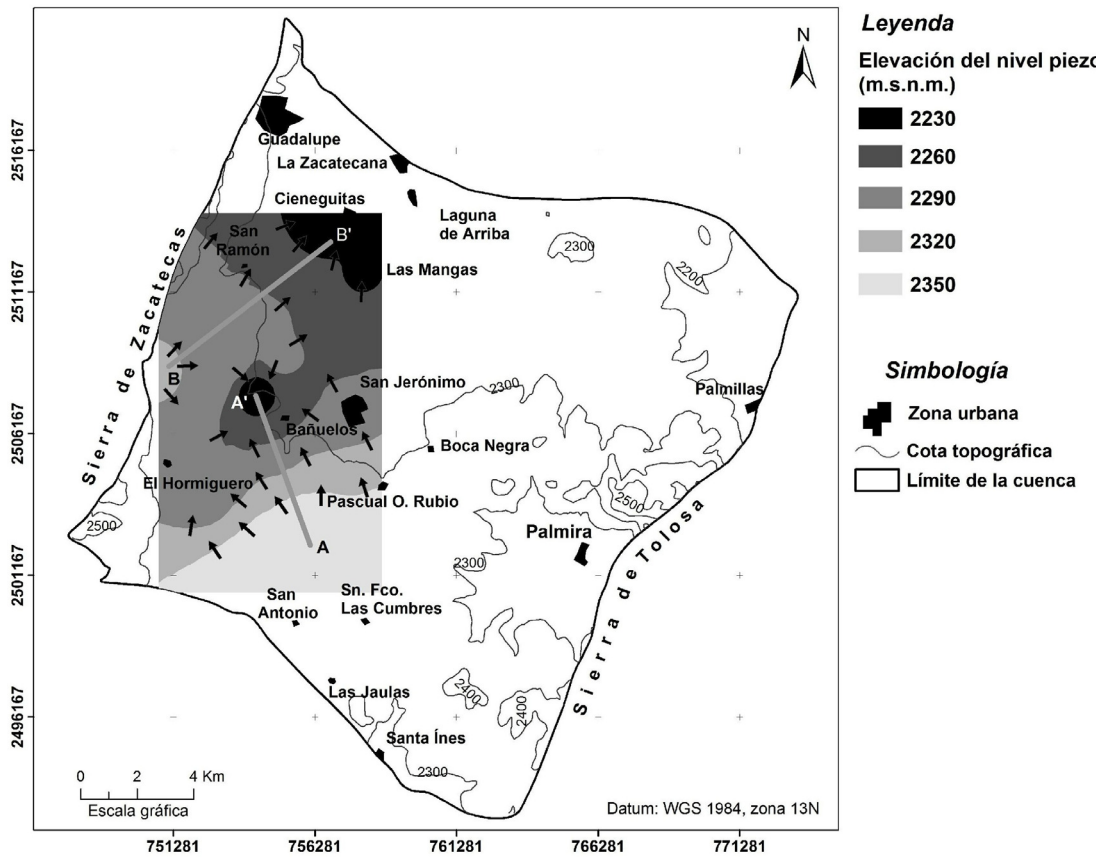


Figura 6. Mapa de elevación del nivel piezométrico para el año 2001 (datos proporcionados por la Comisión Nacional de Agua). A-A' y B-B' son las secciones hidrogeoquímicas.

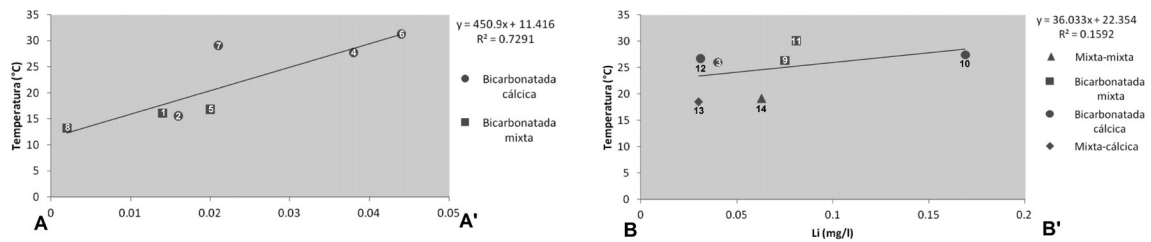


Figura 7. Gráficas con la relación de la temperatura vs litio para las secciones A-A' y B-B', respectivamente.

CONCLUSIONES

La hidrodinámica y la calidad del agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos se obtuvieron a partir de las muestras obtenidas en nueve pozos profundos, tres norias, un manantial y un canal, así como de niveles piezométricos de estudios anteriores.

Las muestras fueron analizadas por elementos mayores, lo que permitió definir 4 familias de agua: bicarbonatada mixta, bicarbonatada cálcica, mixta-mixta y mixta-cálcica, en ese orden de abundancia.

El agua del acuífero clasifica como agua potable ya que los valores de pH, STD, cloruros, sulfatos, arsénico, plomo y mercurio están por debajo de lo establecido por la Norma y sus modificaciones en el año 2000. Aunque el agua es de buena calidad, una muestra presentó valores altos en flúor y arsénico. El origen de estos valores altos podría ser de carácter geogénico.

Con base la piezometría, los STD, el oxígeno disuelto y las secciones hidrogeoquímicas A-A' y B-B', se definieron dos sistemas de flujo subterráneo. Uno cuya área de recarga está en la parte sureste de la cuenca, en la margen occidental de la Sierra de Tolosa. Este flujo mantiene una dirección de sureste-noroeste y tiene su área de descarga en las inmediaciones de la población Bañuelos. El otro flujo posee su área de recarga en la parte noroeste de la cuenca y hacia la margen oriental de la Sierra de Zacatecas, sigue una dirección suroeste-noreste hasta llegar a la zona de descarga localizada en los alrededores de las poblaciones La Zacatecana y Laguna de Arriba.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue posible gracias al proyecto "Calidad del agua del acuífero Guadalupe-Bañuelos, Estado de Zacatecas" coordinado por Ernesto P. Núñez Peña y financiado por la Dirección de Protección Civil y Bomberos del Estado de Zacatecas, con registro U.A.Z.-2010-35786. Los autores agradecen el apoyo de José de Jesús de Fernández Ávalos, ex-director de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra. Asimismo, agradecen al Ing. Rafael Guardado Flores, de la Gerencia Estatal Zacatecas de la CONAGUA por su amabilidad y gran disponibilidad para la consulta de información. Por último, agradecen los comentarios y sugerencias hechos por Jorge Ramírez-Hernández y un árbitro anónimo que ayudaron a mejorar este manuscrito.

REFERENCIAS

- Aranda-Gómez, J. J., Henry, C. D. y Luhr, J. F., 2000. Evolución tectonomagmática post-Paleocénica de la Sierra Madre Occidental y la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LIII: 59-71
- Cardona, A., 2003. Curso: Evaluación de la contaminación difusa en el agua subterránea. 4° Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, San Luis Potosí, S.L.P. 26 pp.
- CONAGUA, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Guadalupe-Bañuelos, Estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas,

- Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. México D. F. 17 pp. (Inédito).
- Consejo de Recursos Minerales, 1997. Carta geológica-minera F13-B68 Guadalupe, escala 1:50000.
- Consejo de Recursos Minerales, 1997. Carta geológica-minera F13-B58 Zacatecas, escala 1:50000.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. 1983. Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, 2350 pp.
- Edmunds, W. M., and Smedley, P. L., 2000. Residence time indicators in groundwater: The East Midlands Triassic Sandstone aquifer. *Applied Geochemistry*, 15 (6): 737-752.
- Edwards, J. D., 1955. Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico. United States Geological Survey, Professional Paper 264-H: 153-183.
- Escalona-Alcázar, F. J., Suarez-Plascencia, C., Pérez-Román, A. M., Ortiz-Acevedo, O. y Bañuelos-Álvarez, C., 2003. La secuencia volcánica terciaria del Cerro La Virgen y los procesos geomorfológicos que generan riesgo en la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe. *GEOS*, 23 (1): 2-16.
- Escalona-Alcázar, F. J., 2009. Evaluación preliminar de los riesgos debidos a la geomorfología de la zona urbana Zacatecas-Guadalupe y sus alrededores. *GEOS*, 29 (2): p. 252-256.
- Escalona-Alcázar, F. J., Delgado-Argote, L. A., Weber, B., Núñez-Peña, E. P., Valencia, V. A. y Ortiz-Acevedo, O., 2009. Kinematics and U-Pb dating of detrital zircons from the Sierra de Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (1): 48-64.
- Estudios y Proyectos Moro, S.A. de C.V. 1997. Estudio para la reactivación de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de: Calera-Benito Juárez, Chupaderos, Guadalupe-Bañuelos, Cuenca del Aguanaval, Ojocaliente y La Blanca, en el estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua. Inédito. Contrato: GAS-003-PRO-97.
- Ingeniería de Evaluación y Prospección S.A. 1986. Estudio geohidrológico para la ciudad de Zacatecas, Zacatecas. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Inédito. Contrato: 86-G-DC-A-018-Y-0-6.
- Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados, S.A. 1978. Estudio de fuentes de abastecimiento en Zacatecas, Zacatecas. Dirección General de Construcción de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado. Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. Inédito. Contrato: BIOU-08/079-78.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. XII Censo de población y vivienda, Tomo I, 577 pp.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. XIII Censo de población y vivienda. Inédito.

Investigaciones Técnicas del Subsuelo S.A. 1982. Estudio geohidrológico de la zona de Guadalupe-Bañuelos, Zacatecas. Secretaria de agricultura y recursos hidráulicos. Dirección general de aprovechamientos hidráulicos. Inédito. Contrato: GZA-82-86-EG.

Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Iriondo, A., 2008. Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y el graben de Aguascalientes, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 25 (3): 533-548.

Nieto-Samaniego, A. F., Alaniz-Alvarez, S. A. y Camprubí í Cano, A., 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII (3): 285-318.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. 2000. "Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano- límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". *Diario Oficial de la Federación*. 20 octubre 2000. 21 pp.

Schöeller H. 1962. *Les eaux souterraines*. Ed. Masson, Paris, 642 pp.

Manuscrito recibido: 1 de noviembre de 2011.

Recepción del manuscrito corregido: 26 de septiembre de 2012.

Manuscrito aceptado: 14 de octubre de 2012.

EMPLEO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) EN ESTUDIOS DE GRAVIMETRÍA REGIONAL

César Jacques Ayala¹ y Jorge Ramírez Hernández²

¹Instituto de Geología, UNAM, Apdo. Postal 1039, Hermosillo, Sonora
(jacques@servidor.unam.mx),

²Instituto de Ingeniería, UABC, Mexicali, BC.
(jramirez@iing.mxl.uabc.mx)

RESUMEN

Se presentan los resultados del levantamiento topográfico para estudios gravimétricos regionales utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Para el control topográfico se utilizaron antenas Trimble 4600SL, de una frecuencia (L1). Se hicieron levantamientos "fast-static" y "stop & go". En el primer caso se hicieron mediciones de 20 minutos o más con líneas base de más de 200 km. En el segundo caso se hicieron mediciones de 5 minutos y líneas base de hasta 20 km, trasladando un valor de altitud de la estación fija en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Los resultados en ambos casos fueron satisfactorios para un levantamiento gravimétrico regional, ya que los errores ocurrieron dentro de tolerancia. Si bien el método "fast-static" tiene el inconveniente de requerir de mucho tiempo de observación, es muy confiable cuando la estación fija está a una distancia muy grande o no es posible acceder a ella en vehículo.

Palabras clave: GPS, gravimetría, Sonora, México.

ABSTRACT

Results of a topographic survey for a regional gravimetric study using the Global Positioning System are presented. For the topographic survey were used 4600SL Trimble antennae (L1). Fast-static and stop & go methods were applied. In the first case, recording time was at least 20 minutes with baselines of more than 200 km. In the second case recording time was 5 minutes and baselines as large as 20 km, using the altitude of a fixed base station in Hermosillo, Sonora, Mexico. The results in both cases were satisfactory for a regional gravimetric survey, with errors within tolerance. Even though the fast-static method has the inconvenience of long periods of time for acquisition of data, it is very confident in long baselines or sites where there is no access by vehicle.

Keywords: GPS, gravimetry, Sonora, Mexico

INTRODUCCION

En levantamientos de gravimetría es muy importante contar con un buen control topográfico, especialmente en la altitud. Hace años, los levantamientos gravimétricos se hacían con barómetro, plancheta, tránsito y/o nivel automático. Después se utilizaron estaciones totales y distanciómetros más sofisticados, pero la operación requería aún de varios operadores y brigadas para realizarla. Estos levantamientos consumían tiempo y los costos eran elevados, especialmente en áreas montañosas con pocas vías de comunicación. Con la llegada del sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas en inglés) la operación se ha hecho más económica y expedita. Incluso es posible que dos operadores, y en algunos casos sólo uno, haga tanto la medición gravimétrica como la topográfica.

De acuerdo con los fabricantes de antenas GPS, para obtener la precisión garantizada se deben seguir algunas reglas durante el levantamiento de datos. Además se debe utilizar el "método diferencial" (DGPS) con dos antenas, una fija y la otra móvil. Con antenas de una frecuencia ($L1=1575.42$ MHz) la línea base (distancia entre la estación fija y la móvil) no debe ser mayor de 20 km. Con antenas de doble frecuencia ($L1/L2$; $L2=1227.60$ MHz) la línea base se puede extender hasta 50 km. La precisión en las alturas para las antenas 4600SL se define como (Trimble, 2003):

$\pm 10 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ (partes por millón) de x (≤ 10 km) en levantamientos "fast static", y $\pm 2 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$ de x para levantamientos "stop & go", en donde x es la longitud de la "línea base" y K es una constante

($K=\pm 2 \text{ cm}$). En estudios de gravimetría regional se considera aceptable un error en altitud dentro del rango 30-50 cm. En regiones montañosas, un metro de error puede ser aceptable. Un error de esa magnitud se compensa con la corrección por efecto topográfico (rugosidad), en el trazo de isolíneas de anomalía de Bouguer o residual y en el modelado (error producido por el ajuste general entre datos observados y calculados, así como en el modelo geológico utilizado).

Se realizó un levantamiento regional de gravimetría para estudiar cuencas cenozoicas en el norte de Sonora, el cual fue financiado por el CONACYT. Se empleó el método de posicionamiento DGPS usando dos antenas receptoras de 12 canales, L1, marca Trimble modelo 4600SL, con una máscara de elevación a 15° . La precisión que se obtiene en las alturas de acuerdo con el fabricante es de $\pm 2 + 1 \text{ ppm}$. Debido a un accidente, una de las antenas resultó dañada por lo que el levantamiento se hizo usando como antena fija una estación ubicada en Hermosillo. Se llevaron a cabo algunas pruebas para verificar la calidad de los resultados. Estos fueron tan buenos que se optó por usar este método con líneas base de más de 200 km. Existen dos estaciones GPS de monitoreo continuo en Hermosillo: una de la Red Geodésica Nacional Activa (RGN) (HER2) y la otra de la empresa Precisión GPS (PPSH), la cual nos proporcionó los datos para hacer el post-proceso de nuestra información colectada.

Adicionalmente se realizó el método de adquisición de datos “stop & go”, para el levantamiento de una sección regional Bahía de Kino–Hermosillo–Mazocahui, en Sonora. Se presentan algunos resultados de ambos levantamientos altimétricos. Uno en el área de Ímuris-Nogales y el otro en el área entre Hermosillo y Mazocahui (Fig. 1). Para la adquisición de datos, en el primer caso se utilizó el método “fast-static” con periodos de lectura de 20 minutos o más en cada estación, con un intervalo de registro cada 15 segundos; en el segundo caso se utilizó el método “stop & go” con tiempos de lectura de 5 minutos y con los mismos parámetros de adquisición de datos mencionados.

En gabinete se procesaron los datos usando el “software” proporcionado por el fabricante (Trimble) para obtener, para cada estación, las coordenadas horizontales ajustadas con proyección UTM Zona 12 Norte y Datum NAD27. Las alturas obtenidas a partir de observaciones GPS están referidas al elipsoide WGS-84 (Fig. 2) y se les llama alturas elipsoidales. El mismo “software” permite obtener las alturas ortométricas utilizando un modelo geoidal global. En este caso se usó el modelo geoidal OSU91A (Rapp et al., 1991). En ese tiempo aún no estaba disponible un modelo geoidal regional como el MEX97 o de la serie GGMOX para México, elaborados por el INEGI.

RESULTADOS

Para verificar los resultados de nuestro levantamiento regional se utilizaron algunos bancos de nivel del INEGI colocados a lo largo de la carretera Ímuris-Nogales.

En las Tablas 1 and 2 se muestran los

resultados comparando los obtenidos por medio de GPS y el modelo geoidal con los datos de los bancos de nivel. Éstos se pueden obtener en la página del INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/inventarioPuntos.aspx>)

Se observa que sólo el banco BN-918 tiene una diferencia mayor que la tolerancia permitida en el cálculo de la altura elipsoidal, la cual es función de la distancia de la línea base; sin embargo, estos resultados se consideran aceptables para nuestros fines.

El banco de nivel BN-918 se encuentra en el Centro de Salud de Ímuris. Este banco se usó como punto de inicio y término de la operación diaria del gravímetro. Se fijó el receptor GPS varios días para registrar las variaciones en las alturas; esto es, para ver la repetibilidad de los resultados. En la Fig. 3 se muestran las diferencias obtenidas en 10 días de observación. La diferencia mayor obtenida es de 83.39 cm, con una tolerancia de 37.53 ± 1 cm. El eje Y de la figura es la altura ortométrica del banco. Esta altura ortométrica comúnmente es referida como altura sobre el nivel medio del mar (msnm).

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de varios bancos de nivel. Sólo el banco BN-918 tiene errores mayores que la tolerancia. Estos resultados se consideran aceptables para nuestros fines. Otra prueba consistió en colocar en una estación dos antenas receptoras simultáneamente con el fin de observar la constancia de los resultados. En la Tabla 3 se muestran las diferencias de altura obtenidas después del procesado. Los resultados obtenidos son aceptables y permiten confiar en ellos.

En cuanto al perfil regional en Sonora central (entre Hermosillo y Mazocahui, Fig. 1), se usaron las mismas antenas 4600SL, L1. En este caso se trasladó la altura ortométrica de la estación fija PPSH de la empresa Precisión GPS en segmentos de 40 km, colocando una antena fija a la mitad del mismo segmento. De esta manera, la línea base siempre fue de 20 km o menos. En el poblado de Mazocahui (Fig. 1) se tiene el banco de nivel BN-236, el cual se usó para verificar los resultados. En un ejercicio para comparar resultados se hizo el cálculo de alturas tomando como base fija una de nuestras estaciones y la estación fija PPSH. En otras palabras, la estación 1113, ocupando el banco de nivel, se corrigió con respecto a dos bases fijas. Se tomó el banco de nivel BN-236, de altura conocida y se hizo el ajuste con respecto a la estación PPSH y nuestra estación 1103, estación fija de ese segmento de la línea regional. El tiempo de toma de datos fue de 5 minutos. En la Tabla 3 se muestran los resultados de las alturas. En el cálculo con respecto a la estación PPSH se tiene un error ligeramente mayor que la tolerancia, mientras que el error con respecto a la estación 1103 es pequeño. Tómese en cuenta que el tiempo de captura de datos fue de 5 min.



Figura 1. Esquema de localización de las áreas donde se hicieron las mediciones aquí reportadas.

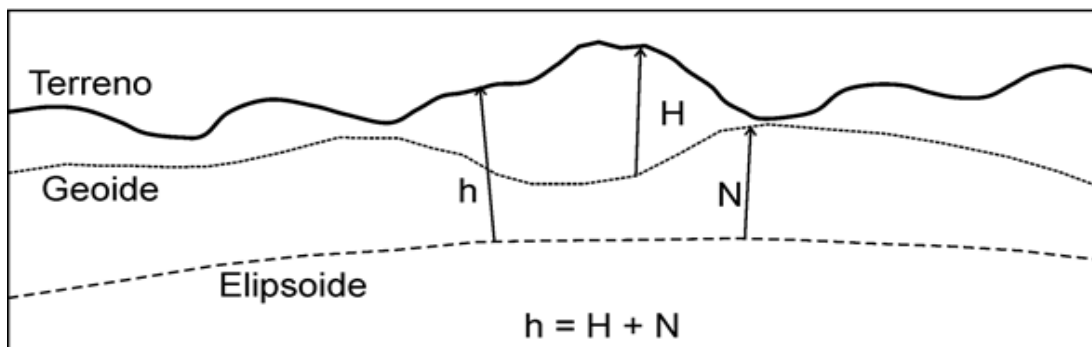


Figura 2. Diagrama que ilustra las tres superficies fundamentales del sistema de posicionamiento satelital GPS. La altura ortométrica, $H(=h-N)$, es la altura con respecto al geoide.

Tabla 1. Comparación de las alturas en metros sobre el nivel del mar entre bancos de primer orden y datos obtenidos mediante GPS

Banco de nivel	Longitud de la línea base (km)	Altura (msnm) por nivelación diferencial	Altura (msnm), GPS	Diferencia (m)	Tolerancia (m) ± 0.010
BN-20	220.199	1078.6783	1078.6352	-0.0431	0.4404
BN-911	229.200	1150.9450	1151.0606	+0.1156	0.4584
BN-912	224.370	1107.3340	1107.5397	+0.2057	0.4487
BN-913	218.425	1070.9870	1070.7810	-0.2060	0.4368
BN-916	200.357	931.3850	931.6248	+0.2398	0.4007
BN-918	187.678	855.5210	854.9752	-0.5458	0.3753

Tabla 2. Determinación de la altura (msnm) usando simultáneamente dos antenas L1 en una misma estación. En los tres casos la línea base es mayor a 200 km.

Estación	Antena 1	Antena 2	Diferencia
214	1322.3251	1322.3385	0.0134
238	1274.1453	1274.1938	0.0485
242	1357.7169	1357.7211	0.0042

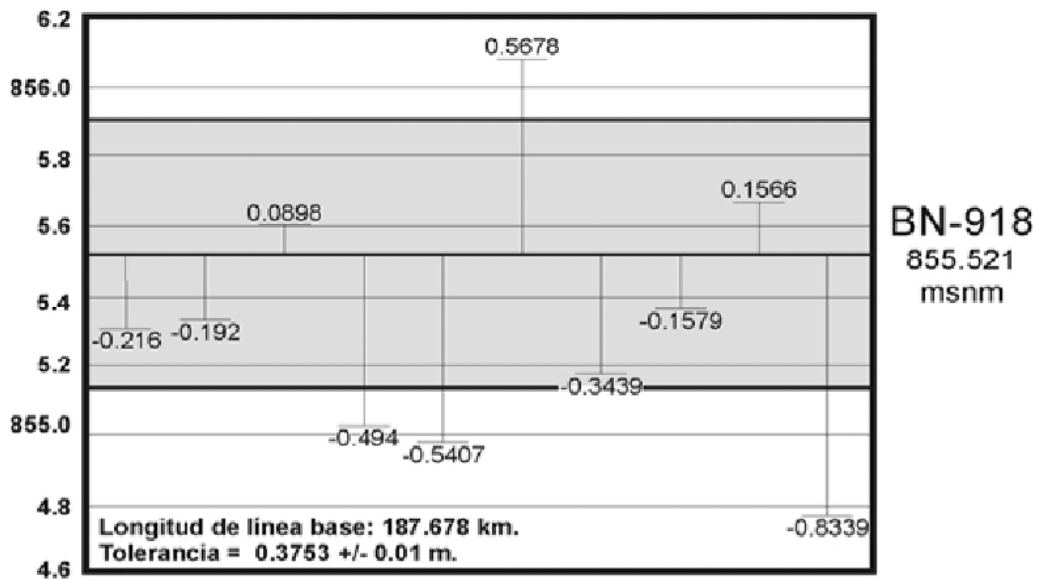


Figura 3. Errores obtenidos en la medición de alturas ortométricas en 10 días diferentes, del banco de nivel BN-918, ubicado en el Centro de Salud de Ímuris.

Tabla 3. Resultado de la determinación de altura del banco de nivel BN-236 con respecto a la base fija PPSH y la estación fija 1103 del levantamiento regional. El tiempo de observación es el mismo en ambos casos.

Estación fija	Longitud de la Línea base (m)	BN-236 (msnm)	Altura con GPS (msnm)	Diferencia (m)	Tolerancia (m)
PPSH	94,567.42	497.837	497.950	0.113	.1891 ± 0.01
1103	17,743.77		497.832	-0.005	.0377 ± 0.02

En conclusión, para un estudio de gravimetría regional es posible utilizar equipos receptores GPS de una frecuencia (L1), cuyo costo es mucho menor que el de un equipo de doble frecuencia (L1/L2). Sin embargo, deben seguirse todas las indicaciones dadas por el fabricante con el fin de obtener los mejores resultados. En el caso de que sea necesario tener una mayor línea base, es indispensable ampliar el tiempo de adquisición de datos. También deben anotarse todas las posibles fuentes de error para poder estimar la validez de los datos. En estudios gravimétricos, en los que se estime o espere 1 mGal de error en el cálculo de la anomalía de Bouguer, se pueden usar antenas de una frecuencia, siempre y cuando se dé tiempo suficiente de adquisición de datos para obtener buenos resultados.

Finalmente, el sistema GPS es lo mejor para estudios de exploración geofísica. Tiene muchas ventajas sobre métodos tales como los distanciómetros, barómetros y de nivelación. En los casos que reportan Marín et al. (1998), así como Sabah y Nashwan (2008), se obtuvieron resultados muy pobres porque utilizaron antenas receptoras de mano, las cuales no permiten, hasta ahora, hacer trabajo DGPS ni los ajustes adecuados para determinar

alturas ortométricas. Se requiere equipo de levantamiento topográfico, el cual es mucho más preciso aún cuando resulta en una inversión inicial más fuerte. Un equipo L1 para DGPS puede costar, incluyendo el software, aproximadamente \$20,000 dólares estadounidenses. Un equipo L1/L2 puede costar el doble o más. Es un poco más preciso, pero al reducir el tiempo de adquisición, la productividad se quintuplica. Una forma de incrementar la precisión y la productividad, es usando GPS diferencial (DGPS), en la que se usan dos antenas simultáneamente: una fija y la otra móvil, funcionando continuamente.

AGRADECIMIENTOS

El equipo GPS se adquirió por medio del proyecto 3185p-t, financiado por el CONACYT. Se agradece al Ing. José Ramos Herrera, de la empresa Precisión GPS por proporcionarnos la información para el procesamiento de nuestros datos, además de su apoyo técnico en la operación del equipo. De la misma manera, se agradece al árbitro anónimo que amablemente revisó este trabajo. Gracias a él se mejoró significativamente, tanto el texto como el aspecto técnico.

REFERENCIAS

- Marín, L.E., Pérez, X. y Rangel, E., 1998: Comparison of three surveying techniques applied to hydrogeological studies: level, barometric and GPS: *Geofísica Internacional*, vol. 37, pp. 127-129.
- Rapp, R.H., Wang, Y.M. y Pavlis, N.K., 1991: "The Ohio State 1991 geopotential and sea surface topography harmonic coefficient models": Report 410, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Sabah Hussein Ali y Nashwan Kamal-Aldeen, 2008: Using of GPS and leveling techniques for determining the orthometric heights inside Mosul University: *Al-Rafidain Engineering*, vol.16, No.3, p. 132-142.
- Trimble, 2003: 4600 LS and Trimble Digital Fieldbook: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-148058/022543-059A_4600LS_DS_1103_lr.pdf

Manuscrito recibido: 23 de marzo, 2012

Recepción del manuscrito corregido: 12 de septiembre, 2012

Manuscrito aceptado: 27 de septiembre, 2012

GAIA: DE HIPOTESIS A TEORÍA Y LA XVII OLIMPIADA DE CIENCIAS DE LA TIERRA

Enrique Gómez Treviño

egomez@cicese.mx

División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California

En esta la decimoséptima olimpiada quisimos recordar cómo se hace la ciencia, esta vez con un ejemplo que explícitamente reconoce su inicio como hipótesis y que busca convertirse en teoría. La Ciencia del Sistema Tierra está en sus inicios y ya ha dado algunos frutos, pero necesitamos más, muchos más si hemos de intervenir en procesos globales sin mayores riesgos para el planeta. Le llaman geo-ingeniería: la manipulación intencional a gran escala del medio ambiente planetario para contrarrestar el cambio climático producido por la quema de combustibles fósiles. ¿Sabemos lo suficiente para no hacer del remedio algo peor que la enfermedad?

Sabemos bastante de física, química, geología y biología, pero como disciplinas más o menos aisladas, cada una en su propio ámbito. Recién hemos empezado a pensar en forma global e interdisciplinaria como una ciencia en sí misma. Desde siempre ha habido interacciones entre las diferentes disciplinas, pero no engarzadas bajo una hipótesis para guiar la búsqueda de procesos desconocidos. Si la Hipótesis de Gaia resulta, a final de cuentas, ser sólo una hipótesis de trabajo y no una teoría general es lo de menos. Sus logros a la fecha son bastante significativos.

Un total de 90 estudiantes de bachillerato provenientes de todas las ciudades de Baja California participaron en la XVII Olimpiada Estatal de Ciencias de la Tierra. En esta ocasión resultaron ganadores: Brenda Esperanza Salvador García (primer lugar) y Sergio Damián Camacho Aguilar (segundo lugar), del COBACH, plantel La Mesa, quienes fueron asesorados por el profesor Manuel Armando Gómez. El tercer lugar fue para Rodrigo Silva Meza del Centro Educativo Patria, quien fue asesorado por la profesora Rita Guevara.

En lo que sigue se incluye la guía para el examen, la cual es simplemente un pequeño ensayo sobre La Hipótesis de Gaia y temas relacionados, así como indicaciones sobre los temas de olimpiadas anteriores que también se incluyen en el examen. Al final se presentan las preguntas nuevas sobre el tema de la Hipótesis de Gaia.

Gaia: de Hipótesis a Teoría. Guía de la XVII Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California. Viernes 1 de junio de 2012, Auditorio de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California.

La Teoría de Gaia es tal vez el mejor ejemplo reciente que ilustra cómo se hace la ciencia. En la pasada olimpiada exploramos la historia fascinante de cómo Aristarco de Samos midió el tamaño de la Luna y del Sol y sus distancias a la Tierra hace muchísimos años. Para esta olimpiada hemos preparado un tema también fascinante pero de actualidad. De hecho, de bastante actualidad porque está relacionado con el tantas veces mencionado en los medios como Cambio Climático Global, del que una de las consecuencias es el Calentamiento Global de la Tierra. El tema mismo del Cambio Climático Global lo tratamos en 2004. Lo que veremos ahora es la historia del descubrimiento de un mecanismo que tiene la Tierra para mantener una temperatura más o menos constante, a pesar de perturbaciones externas que tienden a cambiar su temperatura.

Homeostasis: ¿Una enfermedad?

Imagínense dentro de una casa en invierno, con temperaturas exteriores que fluctúan entre -10 grados centígrados en la noche y hasta 10 grados en el día. Esto es, con fluctuaciones de 20 grados en 24 horas. Y sin embargo, ustedes que han puesto el termostato de la calefacción a 25 grados, notarán, si es que lo notan, que en el interior de la casa los cambios son de tan sólo uno o dos grados. No es difícil imaginar cómo se las arregla la calefacción para mantener constante la temperatura de las casa sin la intervención de ustedes. Simplemente si la temperatura baja hasta determinado valor se enciende la calefacción y, cuando sube a ese valor se apaga. Lo mismo para el aire acondicionado o refrigeración, pero al revés y, así, ocurre con muchos aparatos que utilizamos diariamente y que no necesariamente tienen qué ver con temperaturas. Tinacos, cisternas y tanques de sanitarios utilizan un flotador donde, si baja el agua a menos de cierto nivel, se abre una válvula para que entre agua y así volver al nivel requerido.

Los dispositivos descritos son muy simples y controlan procesos también muy simples. Procesos más complejos pueden requerir combinaciones de dispositivos y programas de computadora que tomen las decisiones de activarlos o desactivarlos. Hay automóviles que tienen lo que se llama control de crucero el cual, si se activa, hace que el auto viaje a la velocidad estipulada aunque haya subidas o bajadas. Si la velocidad disminuye el auto automáticamente acelera y viceversa, de tal forma que la velocidad se mantiene alrededor del valor indicado. Las plantas que producen energía eléctrica como la que se encuentra en Rosarito, Baja California, también requieren de muchos de esos dispositivos para controlar la producción de energía eléctrica según la estemos necesitando los usuarios.

Todos los dispositivos mencionados son invenciones humanas. Algunos son muy simples y otros son tan complejos que necesitan computadoras para funcionar, pero todos tienen en común que están hechos de diferentes componentes y que esas partes funcionan en su conjunto para un fin determinado. El término que se utiliza para caracterizar al conjunto de las partes y su comportamiento es el de sistema de control. Y resulta que por más orgullosos que estemos de nuestros inventos, los sistemas de control no son nuevos pues los utilizan los seres vivos desde hace miles de millones de años, desde microorganismos unicelulares hasta los seres más complejos. En nuestro cuerpo están actuando en cada minuto muchos sistemas de control para mantener niveles constantes de azúcar, sales, líquidos y demás. No nos damos cuenta pero nuestro cuerpo es muy efectivo en mantener una temperatura constante, haga frío o calor. En casos extremos suda o envía sangre extra a la piel, dependiendo del caso. En general, trátase de temperaturas o de cualquier otra propiedad, el término que se utiliza para caracterizar esta tendencia automática al equilibrio es el de homeostasis y no es una enfermedad, sino todo lo contrario. El diccionario de la Real Academia Española lo define así: homeostasis. (De homeo- y el gr. stasis, posición, estabilidad). 1) f. Biol. Conjunto de fenómenos de autorregulación, que conducen al mantenimiento de la constancia en la composición y propiedades del medio interno

de un organismo. 2. f. Autorregulación de la constancia de las propiedades de otros sistemas influidos por agentes exteriores.

La Hipótesis de Gaia

¿Y qué tiene que ver todo esto con la Tierra? Pues resulta que la temperatura de la Tierra se ha mantenido más o menos constante durante la mayor parte de su existencia, a pesar de que el Sol ha estado aumentando su luminosidad en la escala de millones de años. También se esperaba que la erosión continua de los continentes aumente la salinidad de los océanos, sin embargo, ésta no ha llegado hasta valores críticos que impidan la existencia de vida en el mar, a pesar de que recibe de los ríos tanta sal que ya debería ser al menos diez veces más salado. También la composición de la atmósfera ha permanecido más o menos constante por muchos millones de años. En todos los casos se trata de condiciones que favorecen la existencia de vida en la Tierra. Por mucho tiempo se pensó que estas condiciones eran producto de la casualidad. Pero no para James Lovelock, científico inglés que por cierto todavía vive, a quien estas condiciones de estabilidad no le parecían debidas a la casualidad, y se propuso encontrarles una explicación. Para ello planteó la Hipótesis de Gaia, en la que propone que en la Tierra actúan sistemas de control homeostático y, que esos sistemas, los controlan los seres vivos. Esto es, que la Tierra se comporta como un ser vivo que controla su propia temperatura para beneficio de la vida y, que los responsables de dicho control, son los propios seres vivos en su conjunto.

Un malentendido

Desafortunadamente para Lovelock, los biólogos no tardaron en descalificar la Hipótesis de Gaia, considerándola como pseudociencia. En realidad todo se trató de un malentendido, lo que demuestra que aún entre científicos existen malentendidos. Los biólogos entendieron que Lovelock proponía que la Tierra era un ser vivo, cuando en realidad sólo decía que la Tierra se comportaba en muchos sentidos como un ser vivo, no que era un ser vivo. Mientras duró el malentendido uno de los argumentos de los

biólogos era que las diferentes especies de seres vivos buscan su propia supervivencia, y que nunca colaboran en forma altruista para un fin común. Si acaso llegan a colaborar, como en los casos de simbiosis, necesitan estar tan cerca unas de otras que difícilmente afectan al ambiente. A lo más, como en el caso de los castores que pueden crear lagos artificiales, el alcance de sus efectos está limitado a pocos kilómetros. Pensar en colaboraciones que alcancen a toda la Tierra y por millones de años era simplemente impensable. Que la vida pudiese controlar la temperatura de la Tierra para su propio beneficio se antojaba, y todavía se antoja, como una especie de argumento místico ya superado hace siglos por la ciencia. Tampoco ayudó mucho que movimientos como new age (nueva era) acogieran la Hipótesis de Gaia con mucho entusiasmo, lo cual confundió a muchos científicos quienes se negaban a acreditar estas ideas como científicas.

Lovelock ahora agradece a sus críticos por haberlo estimulado a buscar un sistema de control homeostático que pudiese estar actuando al nivel de toda la Tierra. Se propuso resolver el problema de que la temperatura de la Tierra no había aumentado de manera paralela a la luminosidad del Sol en la escala de cientos y miles de millones de años. ¿Si el Sol está cada vez más caliente, cómo es que la Tierra se las podría arreglar para mantener constante su temperatura? Lo que Lovelock hizo no fue descubrir cómo lo hace la Tierra, eso lo veremos más adelante, sino cómo podría hacerlo. Esto es, que diseñó un mecanismo para que la Tierra pudiera lograr ese fin. Sus talentos de inventor salieron a relucir. Y, como veremos más adelante, nadie creía que eso era posible. En ese entonces Lovelock ya era considerado como un gran inventor. Había inventado instrumentos para medir cantidades pequeñísimas de contaminantes como los clorofluorcarbonos (CFC), los principales compuestos industriales responsables del famoso Hoyo del Ozono. También se le atribuye la invención del horno de microondas, aunque no lo diseñó para preparar comida sino para revivir hámsteres congelados en experimentos criogénicos.

El Mundo de Margaritas

Busquen la palabra Daisyworld o Mundo de Margaritas. Así le llamó Lovelock al sistema de control homeostático que ideó para demostrar que su propuesta era una posibilidad real. Supuso que el Sol aumentaba su luminosidad con el tiempo y, como consecuencia, la Tierra estaría cada vez más caliente. Supuso además que en la Tierra existían dos tipos de flores (daisies o margaritas), unas blancas y otras negras, así como suelo raso sin margaritas. Las blancas absorben menos luz que el suelo y el suelo menos que las negras. Por lo tanto, las negras tenderán a calentarse más que el suelo y el suelo más que las blancas. En cada caso el grado de calentamiento modifica los alrededores de las margaritas y del suelo. Se tiene además que ambos tipos de margaritas se reproducen mejor a una temperatura media y mueran a temperaturas menores de una mínima, y mayores de una máxima. Esto es todo.

Veamos ahora qué pasaría si la Tierra sin margaritas tuviera una temperatura menor a la mínima. Obviamente ninguna margarita podría existir. Sin embargo, si ponemos una margarita negra ésta hará que su alrededor se caliente y, si la temperatura sube más allá de la mínima, entonces empezarán a reproducirse. Se reproducirán tanto negras como blancas, pero las negras tendrán ventaja porque el planeta está frío. ¿Pero qué pasará si hay demasiadas? Pues el planeta se calentará más allá de la temperatura máxima. Sin embargo, como también hay margaritas blancas, éstas al reproducirse estarán afectando su entorno hacia un enfriamiento. Y si el Sol aumenta su luminosidad, pues entonces las favorecidas serán las blancas, porque ellas pueden bajar la temperatura. Y si la bajan demasiado, favorece a las negras que la pueden aumentar. Y si la aumentan demasiado, pues eso favorece a las blancas que la pueden bajar. Y si la bajan demasiado..... ¿Se entiende?

Simple, brillante y demoledor. Lovelock se sacudió las críticas de los biólogos utilizando los mismos argumentos manejados por ellos. Mostró cómo dos especies que actúan en su propio beneficio pueden terminar creando condiciones que las beneficien a ambas. La idea es importante

pero más importante es que sea realista. Una manera de demostrarlo es hacer un modelo matemático con ecuaciones basadas en las leyes físicas y mostrar que los efectos anticipados son realmente posibles en un planeta como la Tierra. La investigación de Lovelock incluyó el desarrollo de las ecuaciones y su solución. De hecho, el trabajo se realizó como tesis de doctorado de uno de sus estudiantes. Ya existen en Internet programas interactivos que ustedes pueden utilizar y hasta jugar con las variables para experimentar con el modelo. <http://www.gingerbooth.com/flash/daisyball/DaisyBall.html> es la liga que utilizaremos. En esta liga hay dos opciones, DaisyWorld and DaisyBall. La última considera que la Tierra tiene una inclinación de 23.5 grados con respecto al plano de su órbita con respecto al Sol, y que la cantidad de luz por metro cuadrado que llega a la Tierra depende de la latitud. DaisyWorld y DaisyBall utilizan las mismas ecuaciones pero en este último se resuelven para diferentes latitudes. Por eso verán que unas margaritas se concentran en el ecuador y otras en los polos. Consulten las ecuaciones en DaisyWorld-theMathy piensen cómo las resolverían ustedes. ¿Cuál resuelven primero?

Siéntanse libres de cambiar las diferentes variables en la opción de *avanzado (advanced)*, para familiarizarse con el simulador. Empiecen con la opción por **omisión (default)**, y revisen que la temperatura de la Tierra realmente se estabiliza cuando hay margaritas en comparación con la situación cuando no las hay. Cambien albedos, temperaturas máximas y mínimas, luminosidad, etc. Para volver a la opción por omisión utilicen *restore defaults*.

El examen tendrá algunas preguntas específicas sobre las gráficas de la opción por omisión, en su modalidad de DaisyBall. Por ejemplo ¿Cuál es la temperatura de la Tierra para el Sol actual, cuando hay margaritas blancas y negras? Al inicio del calentamiento por las margaritas negras ¿Por qué prosperan las margaritas blancas? Y ¿Por qué las margaritas negras disminuyen cuando aparecen las blancas? Por otro lado, para luminosidades grandes, inmediatamente antes de que mueran todas las margaritas, la temperatura de la Tierra es muy inferior a la máxima de 40 grados que

pueden soportar las margaritas. La pregunta sería: ¿Por qué entonces se mueren las margaritas en masa?

Una de las variables del simulador de Gaia es la cantidad mínima de suelo raso en donde no existen margaritas. La variable la llaman *deathrate* y por omisión tiene el valor de 0.3, significando que al menos 30% del terreno está sin margaritas. La *deathrate* puede variar desde 0 hasta 1.0 y según podrán observar la estabilización de la temperatura depende mucho del valor que utilicen. ¿Cuál es el mínimo terreno libre de margaritas para que la temperatura sea la adecuada para las margaritas? ¿Y cuál es el máximo terreno libre de margaritas para que la temperatura sea la adecuada para las margaritas? Utilicen como criterio de temperatura adecuada el que ésta no sea inferior a 21.5 ni mayor a 23.5 para luminosidad =1.0.

Otra de las opciones a las que se puede acceder en la opción de *avanzado (advanced)* es la de seleccionar un solo tipo de margaritas. La opción supone que sólo hay margaritas negras. La opción de sólo margaritas blancas se puede acceder optando por una sola especie y moviendo el albedo de las margaritas negras al lugar de las blancas. Vean qué pasa en cada caso y traten de explicarlo.

Teoría por Fin

Para que una hipótesis se convierta en teoría es necesario, primero, que haga predicciones sobre algo nuevo y, segundo, que esas predicciones se comprueben en la realidad. Hemos aprendido a través de milenios que ésta es la manera más segura de avanzar los conocimientos sobre la realidad. En nuestro caso, la Hipótesis de Gaia plantea que, de alguna manera todavía desconocida, en la Tierra operan mecanismos que regulan procesos globales en beneficio de los seres vivos y que los propios seres vivos son los que producen estos efectos. Lo que faltaría es encontrar uno de esos procesos en la naturaleza y la hipótesis se convierte en una teoría científica. Pero si ni siquiera se cree en la hipótesis nadie va a buscar esos procesos. Por eso es que Lovelock tuvo que desarrollar su Mundo de Margaritas,

para convencer a los demás científicos, no para probar la existencia de tales procesos en la naturaleza sino, por el momento, sólo mostrar que son posibles.

El Mundo de Margaritas es más un invento que un descubrimiento. De hecho, Lovelock lo considera su mayor invento. Le faltaba el descubrimiento en la Tierra de uno de esos procesos y, con los años lo encontró, pero no resultó ser exactamente el Mundo de las Margaritas porque uno los actores resultó no ser un ser vivo. Veamos los detalles. El proceso es el de la regulación de la temperatura de la Tierra mediante el reflejo de la luz del Sol por las nubes. A mayor nubosidad menor temperatura y viceversa. Nada nuevo hasta aquí. Tampoco es nuevo que a mayor nubosidad menos luz que llega al mar, ni que a menos luz menos fotosíntesis y por lo tanto menos producción de algas. En corto, que las nubes afecten a las algas no es nada nuevo. Lo que sí es nuevo, sorprendente, increíble y hasta inverosímil, es que las algas afecten a las nubes. ¿Cómo podrían hacerlo? Pues resulta que si no hay algas no hay nubes en el mar, o hay muy pocas. Las algas producen como desecho un compuesto de azufre conocido como sulfuro de dimetilo, que en la atmósfera se descompone y produce pequeñísimas gotitas de ácido sulfúrico que son indispensables para la formación de las nubes en el mar. Con esto, las nubes afectan la producción de algas y a su vez las algas afectan la producción de nubes.

El ciclo del azufre

Al mismo tiempo que Lovelock buscaba su mecanismo de control, otros científicos buscaban de dónde obtenían las algas el azufre con el que hacen el sulfuro de dimetilo. Sabían que lo obtenían del mar, y que el mar lo recibía de los continentes mediante los ríos. Lo que no sabían era cómo regresaba el azufre del mar a los continentes. Y es que se trata de cientos de millones de toneladas. En los continentes hay pocas fuentes de azufre que, como los volcanes, provean de este elemento tanto a los continentes como al mar. El azufre lo necesitan los seres vivos porque forma parte de las proteínas y otros compuestos esenciales para la vida. Si ni en los continentes ni en el mar hay suficientes fuentes de

azufre que aporten esas cantidades, la posibilidad que queda es que se esté reciclando entre los continentes y el mar. Pero permanecía el enigma de cómo regresa del mar a los continentes. La respuesta seguramente ya la están entreviendo ustedes con lo que han leído aquí sobre Gaia. De hecho, la búsqueda de la solución al enigma del azufre fue estimulada por la otra búsqueda, la del mecanismo de control de la temperatura de la Tierra. Y bien: ¿Cómo regresa el azufre a los continentes? Para los que no lo han adivinado: en la lluvia. Lovelock considera como su mayor invento al Mundo de las Margaritas, y como su mayor descubrimiento al Ciclo del Azufre. No es lo mismo invento que descubrimiento.

La Ciencia del Sistema Terrestre

La Ciencia del Sistema Terrestre (EarthSystemScience) es una disciplina nueva inspirada por la Teoría de Gaia. Se basa en las disciplinas tradicionales pero el enfoque lo define el concepto de sistema. La Tierra como un sistema global donde interactúan la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y la biósfera. El énfasis es en descubrir y entender fenómenos o procesos en los que intervienen las cuatro esferas, y que nunca se entenderían trabajando aisladamente. El ciclo del azufre es un ejemplo. El metabolismo de las algas, la formación de nubes en los océanos y el acarreo de azufre por los ríos, aparentemente no se relacionan entre sí. En su descubrimiento fue muy importante pensar en forma gaiana – esto es, en forma global y considerando posibles mecanismos homeostáticos. Ésta es posiblemente la mayor contribución de la Hipótesis de Gaia a la cultura universal: una nueva forma de pensar sobre los procesos que suceden en la Tierra, más allá de como lo hacen las disciplinas tradicionales.

¿Es Gaia Todopoderosa?

Seguramente que ya se les habrá ocurrido que el mecanismo de homeostasis que descubrió Lovelock podría encargarse de evitar el Calentamiento Global. La opinión de Lovelock es que no. De hecho, como seguramente se enterarán, uno de sus últimos libros tiene el título apocalíptico de *La Venganza de Gaia*. Su posición es que debemos de dejar de quemar carbón,

gas y petróleo en las plantas generadoras de energía eléctrica y que debemos reemplazarlas por plantas que no emitan dióxido de carbono. Sus predicciones eran muy pesimistas pero poco a poco las ha ido suavizando. Al parecer, lo que deseaba era asustarnos para de esa manera llamar la atención y que los gobiernos hagan algo al respecto. Sea lo que sea, encontrarán que hay todavía mucha controversia sobre los efectos del Cambio Climático Global. Por lo tanto, no se asusten. Infórmense, comparen opiniones y analicen por ustedes mismos. Y a propósito: ¿Quién es Gaia?

Lovelock vs Molina

A pesar de todos sus éxitos como científico e inventor Lovelock no es infalible, como ningún científico lo es. El hecho de que su Hipótesis de Gaia resultara correcta en sus predicciones, no garantiza que sus opiniones sobre el Cambio Climático Global lo sean. Asimismo, si en algún momento anterior se equivocó sobre otras cuestiones, no significaba que sus ideas sobre Gaia estuvieran equivocadas. Cada cosa tiene que analizarse siguiendo un criterio de verdad y no por el prestigio o desprestigio de quien lo diga. Así es como se trabaja en la ciencia. Los científicos se critican y se revisan sus resultados unos a otros de tal forma que en corto tiempo se acaban las controversias. El mismo Lovelock fue protagonista de un incidente en el que estuvo completamente equivocado por varios años. Siendo el inventor del aparato para medir cantidades pequeñísimas de compuestos CFC, y además el descubridor de que estos se encontraban distribuidos por toda la Tierra (atmósfera), fue llamado por el congreso de los EEUU para atestiguar si estos eran potencialmente dañinos para la vida. El problema era que Mario Molina de la Universidad de California había demostrado en 1974, que los CFC pueden liberar cloro al descomponerse en las altas capas de la atmósfera y así destruir la capa del ozono. Lovelock atestiguó que los CFC eran extremadamente estables y que los resultados de Molina no eran concluyentes. A la vuelta de 20 años a Mario Molina le otorgaron el Premio Nobel de Química. En los últimos años Lovelock ha sido reconocido con muchos premios alrededor del mundo, aunque no con un Nobel, aunque tal vez

lo merezca. ¿Ustedes qué piensan, lo merece? Y a propósito: ¿Quién es Mario Molina? Lean también sobre Thomas Midgley y sus inventos.

El Examen

Como siempre, se presentarán 100 preguntas. Sobre el tema de Gaia serán 20 preguntas, sobre Aristarco de Samos (XVI olimpiada) serán 30, sobre Rayos y Centellas (XV) serán 25 y, sobre Los Colores del Cielo (XIV), serán 25. Las preguntas nuevas serán sobre el presente tema de Gaia, así como en la XVI fueron nuevas las de sobre Aristarco de Samos, en la XV las de Rayos y Centellas y en la XIV sobre los Colores del Cielo. Estas 80 preguntas las pueden consultar en los informes correspondientes a las olimpiadas mencionadas, los cuales están disponibles en esta misma página (www.ugm.org.mx).

Para los que nunca han asistido a una de nuestras olimpiadas se les recomienda ver en YouTube:

<http://www.youtube.com/watch?v=Q5d-4HvP32U>

Inscripciones

Por favor recuerden que es muy conveniente para nosotros que se inscriban con anterioridad, ya sea en forma individual o en grupo, electrónicamente, según se indica en esta página, porque nos permite planear mejor la cantidad de exámenes que debemos imprimir, preparar un día antes los gafetes con sus nombres, imprimir los diplomas de participación, así como el número de asientos que necesitaremos y la cantidad de alimento que debemos ordenar. Sin embargo, aún si no se inscriben con anticipación, pueden llegar ese mismo día e inscribirse. Hasta la fecha hemos podido manejar a los pocos que a última hora se deciden en participar.

Habrà pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado.

De 8:00 a 10:00 se entregarán los gafetes con sus nombres.

A las 10:00 inicia el examen y se suspenderá a las 12:01.

Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios de Geología y Geofísica Aplicada, incluyendo la red sismológica donde se reciben las señales de los sismos que ocurren en Baja California. Entre las 14:00 y 15:00 PM se harán las premiaciones.

Les envío un saludo cordial y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño.
Coordinador de las Olimpiadas

Las 20 preguntas nuevas del examen

1) En su faceta de inventor, James Lovelock ideó y construyó un aparato para medir cantidades pequeñísimas de CFC en el aire. Con ese instrumento se estableció que había presencia de compuestos de CFC hasta en el aire de la Antártida, el lugar más lejano de donde se producían, el hemisferio norte. El nombre de este instrumento es el de Detector por Captura de Electrones y su principio se sigue utilizando en equipos modernos. Hace 40 años la concentración de CFC en la atmósfera era de 50 ppt (partes por trillón) y actualmente es de 250 ppt. Esta concentración está actualmente

- a) aumentando b) es estable
- c) disminuyendo d) no se sabe

2) Una de las críticas que recibió el Mundo de Margaritas es que era demasiado simple. Que la interacción de sólo dos especies no correspondía a la realidad en la Tierra, en donde conviven muchas especies de plantas y que no contemplaba a los animales que se comen a las plantas, ni a animales que se alimentan de otros animales. Las matemáticas en este caso son más complicadas que para los dos tipos de margaritas. Cuando se incluyen más tipos de margaritas además de animales virtuales en el Mundo de Margaritas, el sistema regulador de temperatura debería cambiar. ¿En qué sentido cambia?

- a) mejora b) empeora
- c) queda igual d) nunca se hizo esa prueba

3) Thomas Midgley, Jr. fue un inventor norteamericano quien en su tiempo recibió muchos premios y distinciones además de cuantiosas regalías por sus patentes. Sin embargo, con el tiempo sus inventos se convirtieron en verdaderas pesadillas para la humanidad. Algunos historiadores consideran que Thomas Midgley "Tuvo más impacto en la atmósfera que cualquier otro organismo en toda la historia de la Tierra". Y es que no es para menos. En 1921 descubrió que agregando plomo a la gasolina se corregía el retraso en la combustión de gasolina en los motores de combustión interna, problema conocido en español como pistoneo. La patente la compartía con la compañía General Motors, y para no perder sus ganancias, mintieron siempre sobre el efecto tóxico del producto. Ustedes no tienen plomo en sus cuerpos pero gran parte de la humanidad sí lo tiene porque hace apenas unas décadas que se prohibió su uso. Otro de los inventos de Midgley fueron los CFC, utilizados por décadas en refrigeración con el nombre comercial de Freón, y que son los principales responsables del famoso Hoyo del Ozono. Midgley nació en 1889 y murió a los 55 años de edad. ¿Mintió Midgley sobre los efectos nocivos de los CFC?

- a) no se sabe
- b) sí mintió
- c) no mintió
- d) sí, pero se arrepintió

4) La abreviatura CFC nos es una fórmula química, pero cada una de las letras corresponde a la primera letra de un elemento químico. En el mismo orden de la abreviatura, estos elementos son (Cadmio=Cd, Flúor=F, Hierro=Fe, Cloro=Cl, Carbono=C)

- a) Cd F Cl
- b) Cl Fe C
- c) C F Cl
- d) Cl F C

5) El Mundo de Margaritas sorprendió a los biólogos porque les demostró que dos especies que buscan su propio beneficio pueden sin proponérselo crear condiciones para la supervivencia de ambas. Extrapolando esto a muchas especies resultaría un super-organismo o super-especie que modifica la temperatura de la Tierra para su propia supervivencia. Las células en nuestro cuerpo hacen precisamente eso, están organizadas de tal forma que conservan nuestra

temperatura más o menos constante a pesar de que haga frío o calor, evitando en lo posible la fiebre y la hipotermia. Pero que las multitudes de especies estuvieran organizadas como si fueran células en un cuerpo que es la Tierra, pues ya era y de hecho lo es, algo difícil de aceptar. ¿Es la Tierra un ser vivo? A juicio del mismo Lovelock, el Mundo de Margaritas es su mayor

- a) hallazgo
- b) proyecto
- c) invento
- d) descubrimiento

6) En la búsqueda de un mecanismo estabilizador de la temperatura de la Tierra se determinó el Ciclo del Azufre. A juicio del mismo Lovelock, el Ciclo del Azufre es su mayor

- a) creación
- b) proyecto
- c) invento
- d) descubrimiento

7) Cuando Lovelock le comentó sus idas sobre la Tierra a su vecino William Golding, éste le sugirió el nombre de Gaia para su hipótesis. Gloding era escritor y posteriormente recibió el Premio Nobel de literatura en 1983, no por su sugerencia sino por sus novelas, la más conocida de las cuales es El Señor de las Moscas, sobre la cual se hizo una película. Gaia es la diosa de la Tierra en la mitología

- a) griega
- b) romana
- c) galia
- d) celta

8) Si bien en algunos círculos científicos la Hipótesis de Gaia fue recibida con escepticismo, en otros fue acogida como la salvación a muchos de nuestros problemas ambientales. Esto es, que no importa lo que nosotros hagamos para alterar su funcionamiento, la Madre Tierra (Gaia) de alguna manera arreglará las cosas por ella misma. La opinión de Lovelock es que las cosas no son así, y que debemos actuar rápido con relación al Calentamiento Global. Que debemos dejar de quemar carbón, petróleo y gas para producir energía eléctrica y que debemos optar por otras fuentes de energía. Para Lovelock la mejor solución es el uso de energía

- a) solar
- b) eólica
- c) nuclear
- d) geotérmica

9) Se ha detectado que en las últimas seis décadas ha disminuido del 10 al 15 % la luz que llega a la superficie de la Tierra. Esto es, que se trata de una obstrucción de la luz cuyo origen está en la atmósfera. Si está llegando menos luz a la superficie de la Tierra entonces la temperatura de la Tierra debería estar

- a) aumentando b) disminuyendo
- c) equilibrándose d) deteriorándose

10) Al fenómeno del decremento de la luz que llega a la superficie de la Tierra se le ha llamado Oscurecimiento Global, y hasta hace unos pocos años, no se les ponía atención a los científicos que lo reportaban porque al parecer va en contra del Calentamiento Global. ¿Cuánto ha aumentado la temperatura promedio de la Tierra en los últimos 100 años, en grados centígrados?

- a) 0.5 b) 1.0
- c) 2.0 d) 3.0

11) Parte de la luz que llega a la Tierra se refleja al espacio. La luz la reflejan en diferente medida desiertos, bosques, océanos, nubes y suelos cubiertos de nieve. A la fracción de luz que se refleja se le ha llamado albedo. ¿Qué tiene más albedo?

- a) desiertos b) bosques
- c) océanos d) nieve

12) Las gráficas que aparecen en el simulador del Mundo de Margaritas corresponden a valores por omisión (by default) que el autor del programa utiliza para ilustrar el funcionamiento del simulador. La opción que utilizaron según se indicó en la Guía es la de DaisyBall, en lugar de la DaisyWorld que es la alternativa por omisión. La temperatura ideal para las margaritas es 22.5 grados. Sin embargo, este valor raramente se obtiene para la temperatura de la Tierra, sino valores cercanos. También pudieron observar que la temperatura depende de la luminosidad del Sol, la cual varía desde menos de 0.7 hasta 1.65 en la opción por omisión. El valor de luminosidad de 1.0 corresponde a la del Sol actual, valores menores son para el pasado y mayores para el

futuro. ¿Cuál es la temperatura de la Tierra para el Sol actual?

- a) 21.2 b) 22.2
- c) 23.2 d) 24.2

13) Una de las variables que se pueden cambiar en el simulador de DaisyBall le llaman allí deathrate, y significa que en ningún momento podrán existir todas las margaritas que puedan caber en la Tierra, sino que siempre debe existir esa fracción libre de margaritas. Por omisión esa fracción es de 0.3, lo cual puede comprobarse en la gráfica superior monitoreando el área denominada barren, la cual corresponde a terreno sin margaritas. Este valor se puede cambiar desde 0 al 100% (0 a 1.0). ¿Cuál es el mínimo terreno libre de margaritas para que la temperatura sea la adecuada para las margaritas?

- a) 0% b) 1%
- c) 3% d) 5%

14) ¿Y cuál es el máximo terreno libre de margaritas para que la temperatura sea la adecuada para las margaritas?

- a) 49% b) 59%
- c) 69% d) 79%

15) Cuando se ejecuta el simulador con la opción por omisión, se puede observar que para luminosidades pequeñas la Tierra está tan fría que las margaritas no pueden reproducirse. Sin embargo, la Tierra se está calentando y a la temperatura mínima empiezan a aparecer margaritas negras. El crecimiento es muy rápido porque, al no haber margaritas blancas, tienen todo el espacio para ellas solas. El resultado es que la temperatura de la Tierra aumenta demasiado rápido, porque las margaritas negras calientan su entorno, por eso pueden reproducirse. ¿Pero por qué prosperan las margaritas blancas? Prosperan porque

- a) pueden
- b) hay espacio
- c) la temperatura aumentó
- d) se requiere disminuir la temperatura

16) ¿Por qué las margaritas negras disminuyen cuando aparecen las blancas? Porque

- a) la temperatura es alta
- b) las blancas les ganan
- c) se requiere disminuir la temperatura
- d) hay espacio para las blancas

17) Una de las opciones que se pueden acceder en la opción de avanzado (advanced) es la de seleccionar un solo tipo de margaritas. La opción supone que sólo hay margaritas negras. En este caso el efecto de las margaritas es que la temperatura de la Tierra en comparación con la temperatura sin margaritas es

- a) menor
- b) mayor
- c) igual
- d) no se puede comparar

18) La opción de sólo margaritas blancas se puede acceder optando por una sola especie y moviendo el albedo de las margaritas negras al lugar de las blancas. En este caso el efecto de las margaritas es que la temperatura de la Tierra en comparación con la temperatura sin margaritas es

- a) menor
- b) mayor
- c) igual
- d) no se puede comparar

19) El Mundo de Margaritas es en realidad un modelo matemático que simula el comportamiento de dos especies en particular. Las ecuaciones no son complicadas y pueden entenderse cada una en términos de álgebra de nivel de preparatoria (según lo vieron en DaisyWorld the Math). Sin embargo, su simplicidad es sólo aparente porque no se pueden resolver como ecuaciones simultáneas normales. Lo que se hace para resolverlas es suponer valores para unas de las variables y calcular las otras, y del resultado volver a calcular las primeras y así hasta que los resultados finales no cambien. El autor del programa recomienda inspeccionar las ecuaciones y descubrir su sentido:

- a) circular
- b) ambiguo
- c) redundante
- d) impreciso

20) Cuando se utiliza la opción por omisión se puede observar que la temperatura de la Tierra aumenta abruptamente para una luminosidad cercana a 1.5. En ese punto las margaritas se mueren y ya no influyen en la temperatura. Sin embargo, se puede observar que la temperatura de la Tierra es de 27.6 grados que si bien no es la óptima de 22.5, está por debajo de la temperatura máxima de 40 grados. ¿Por qué entonces se mueren las margaritas? Se mueren porque

- a) las temperaturas locales son extremas
- b) hay muchas blancas
- c) hay muy pocas negras
- d) se acabaron el espacio disponible

Manuscrito recibido: 14 de junio, 2012.

Manuscrito aceptado: 14 de julio, 2012.

NUEVA IMAGEN DE LA UNIDAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA DE LA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE ZACATECAS

Felipe de Jesús Escalona-Alcázar*, José de Jesús Fernández-Ávalos, Ernesto Patricio Núñez-Peña, Jorge Bluhm-Gutiérrez, Santiago Valle-Rodríguez, Eduardo Valdez-Romero, Alicia Esparza-Martínez, Saydé Reveles-Flores, Ismael Soto-Berumen, Juan Gilberto Moreno-Alanís y Cristian Fernando López-Galván

Unidad Académica de Ciencias de la Tierra
Universidad Autónoma de Zacatecas
Calzada de la Universidad 108
Fracc. Progreso
C.P. 98058
Zacatecas, Zacatecas

(*Ufesc alona@hotmail.com

La Unidad Académica de Ciencias de la Tierra (UACT) de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ), en donde se imparten las licenciaturas en Ingeniero Minero Metalurgista, Ingeniero Geólogo y Licenciado en Ciencias Ambientales sigue renovando su imagen. La actividad minera del Estado de Zacatecas motivó que en 1962 se iniciaran formalmente los cursos de la carrera de Ingeniero Minero Metalurgista en la Escuela de Ingeniería, en el entonces Instituto de Ciencias Autónomo de Zacatecas (ICAZ). La primera generación egresó en 1968, todavía bajo la administración del ICAZ y, durante ese periodo, se gestó la Universidad Autónoma de Zacatecas. En esta nueva institución, la carrera de Ingeniero Minero Metalurgista se encontraba en la Escuela de Ingeniería, de la que se separó en 1982 y adquirió instalaciones propias. Con ese logro, en 1986 se creó la carrera de Ingeniero Geólogo y, en 2006, actualizó su oferta educativa al crear la de Licenciado en Ciencias Ambientales y adquirió el nombre de Unidad Académica de Ciencias de la Tierra (UACT), aún vigente. La población es ahora de 633 estudiantes distribuidos de la siguiente manera: 172 en ingeniería geológica, 282 en ingeniería minera y metalúrgica y 179 en ciencias ambientales.

En la década de los ochenta la UACT contaba con tan sólo cinco aulas, una sala audiovisual, un auditorio, así como con laboratorios de Metalurgia, de Análisis Químicos Cualitativos y

Cuantitativos, y de Mineralogía, además de los museos de Paleontología y de Rocas y Minerales. En estas instalaciones se formaron profesionales en Ciencias de la Tierra durante más de 25 años. Los requerimientos más exigentes para la educación superior favorecieron, en el último lustro, una mejora en la planta docente y la búsqueda de una reforma profunda de las instalaciones y del equipo con el que se ofrecen los entrenamientos a los estudiantes y donde, a la vez, se pueden llevar a cabo trabajos de investigación. Como resultado, la UACT ha incrementado el nivel competitivo de sus egresados, su oferta de servicios es mayor y ahora existen buenas condiciones para emprender investigaciones propias y de colaboración con otras instituciones. Uno de los beneficios más grandes de las mejoras en el plantel docente y material se traduce en haber abierto la posibilidad de ofrecer programas de posgrado y de invitar a realizar estancias sabáticas y posdoctorales en la Unidad Académica.

Durante el último lustro se construyó y equipó el edificio de Laboratorios de Ciencias de la Tierra (Fig. 1) que alberga: a) un Laboratorio de Laminación y Separación de Minerales (Fig. 2a), donde se cuenta con equipo para preparar láminas delgadas y superficies pulidas de rocas (tanto rígidas como deleznales) para estudios petrográficos, minerográficos y de microscopía electrónica, así como de separación de minerales a partir de sus

propiedades magnéticas; b) un Laboratorio de Sedimentación y Pulverización (Fig. 2b) cuenta con una quebradora de quijadas y una pulverizadora de discos, así como con una mesa de sedimentación; c) el Laboratorio de Petrografía (Fig. 2c) cuenta con 18 microscopios petrográficos y 2 petrográficos/minerográficos para la docencia, a la vez que el instructor cuenta con un microscopio conectado a una pantalla HD y un cañón para proyectar la lámina delgada que él tiene en su microscopio; además, este laboratorio incluye colecciones de la casa Ward's de rocas y minerales y kits de trabajo para muestras de mano y láminas delgadas (Fig. 2d); d) el Laboratorio de Geoquímica cuenta con un Espectrómetro de Emisión Óptica de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-OES por sus siglas en inglés), un espectrómetro tipo AR y un equipo para la digestión (microondas Mars) y preparación de muestras de agua y suelo (Fig. 3a). Además de las facilidades del nuevo edificio de laboratorios, se puso en funcionamiento un Georadar con antenas de 100, 250 y 500 Mhz (Fig. 3b) para incrementar los alcances en los estudios sobre riesgos geológicos, entre otros.



Figura 1. Edificio de Laboratorios de Ciencias de la Tierra de la UAZ inaugurado en 2012.



Figura 2a. Laboratorio de Laminación y Separación de MInerales.



Figura 2b. Mesa de sedimentación en el Laboratorio de Pulverización y Sedimentación.



Figura 2c. Laboratorio de Petrografía.



Figura 2d. Laboratorio de Petrología.



Figura 3a. Laboratorio de Geoquímica.



Figura 3b. Georadar.

Durante la construcción del edificio de laboratorios también se remodelaron las instalaciones deportivas, así como cubículos para técnicos y docentes-investigadores. Además, se inauguró el nuevo edificio “Ing. Sergio Flores Gómez” que cuenta con dos aulas, una biblioteca y un auditorio.

Las mejoras mencionadas amplían el panorama profesional, tradicionalmente enfocado a la minería, lo cual se palpa en las últimas experiencias, tanto del personal docente, como estudiantil, pues ambos grupos han asistido y participado activamente en congresos especializados de Geología y Medio Ambiente, como la Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana (2010 y 2011), el Congreso Nacional de Estudiantes de Ciencias de la Tierra (2011 y 2012), la reunión anual 108 de la Geological Society of America Cordilleran Section (2012), la European Geosciences Union General Assembly (2012), el VIII Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, CONAS (2011), el Congreso de Cambio Climático y Desarrollo Sustentable (2009, 2010 y 2011) y el Simposio de Educación Ambiental (2012). Con la participación en estos congresos el quehacer científico de la UACT se está dando a conocer en el ámbito nacional e internacional, fortaleciendo la vinculación académica de los grupos de investigación y promoviendo la movilidad estudiantil y docente.

En estos últimos años se ha ofrecido a los estudiantes un panorama más amplio de la geología a través de los vínculos con instituciones de educación superior y centros de investigación. Con éstos, investigadores y técnicos académicos del Centro de Geociencias de la UNAM, Instituto de Geología de la UNAM, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, Universidad de Guadalajara, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y Universidad Libre de Amsterdam, dieron conferencias y cursos. Además, por parte del Centro de Geociencias de la UNAM y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí se recibió asesoría para el diseño de los Laboratorios de Ciencias de la Tierra. Con la Universidad Autónoma de Barcelona se estableció un convenio de colaboración en el cual, por cada ciclo escolar anual, dos estudiantes pueden ir a esa Universidad en un programa de intercambio

académico a cursar materias y participar en el desarrollo de proyectos de investigación.

Consideramos que actualmente, tanto los programas educativos (<http://ctierra.reduaz.mx/>) como las instalaciones y equipo con que cuenta la UACT, hacen atractivos los programas en Ciencias de la Tierra y amplían las perspectivas a los estudiantes. En estos últimos años el esfuerzo ha cristalizado en una institución moderna, competitiva y de colaboración amplia.

Finalmente, es importante mencionar que en la nueva imagen de la UACT aparecen cuatro docentes-investigadores miembros del SNI, seis con Perfil Deseable PROMEP (Programa de Mejoramiento del Profesorado) y un cuerpo académico en formación con un proyecto apoyado con recursos de PROMEP.

Esperamos su pronta visita.

Manuscrito recibido: 6 de agosto, 2012.

Manuscrito aceptado: 17 de agosto, 2012.

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** 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)
perezacruz@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).

Las 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.

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**.

Secciones:

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

Resumen:

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

Introducción:

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

Metodología:

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

Resultados:

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

Discusiones y conclusiones:

En esta sección se deben discutir las implicaciones de los resultados, su concordancia o divergencia con hipótesis anteriores, construir nuevas hipótesis derivadas de ellos, discutir sus aplicaciones prácticas y posibles limitaciones.

Referencias

Todas las referencias deberán estar agrupadas en orden alfabético por apellido del primer autor. 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. Utilice letras mayúsculas sólo en la primera letra del título y para nombres propios. Incluya el nombre completo de la revista o editorial que la público, 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, p. 51-61.

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)*, Unión Geofísica Mexicana, Monografía No. 2, p. 61-67.

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

Sánchez-Sesma, F. J., and Luzón, F., 1994, Seismic response of three-dimensional alluvial valleys for incident P, S, and Rayleigh waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 85, p. 269-284.

Winkler, H.G.F., 1967, Petrogenesis of metamorphic rocks, 2nd Ed. Springer-Verlag, New York, 237 pp

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/cm^3
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.

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

Recordamos a todos los miembros de la Unión Geofísica Mexicana, A.C.
que la cuota es de \$400.00 para investigadores
y \$300.00 para estudiantes.

página internet: www.ugm.org.mx

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Ligia Pérez Cruz
Editores

Costo anual de anuncios en GEOS

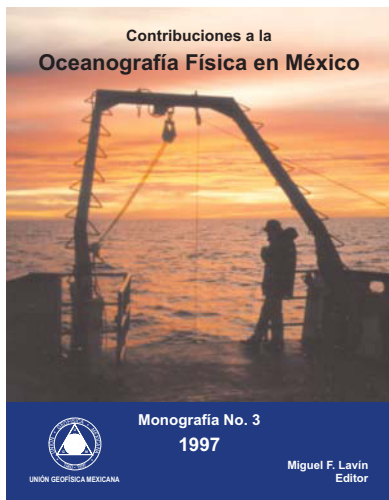
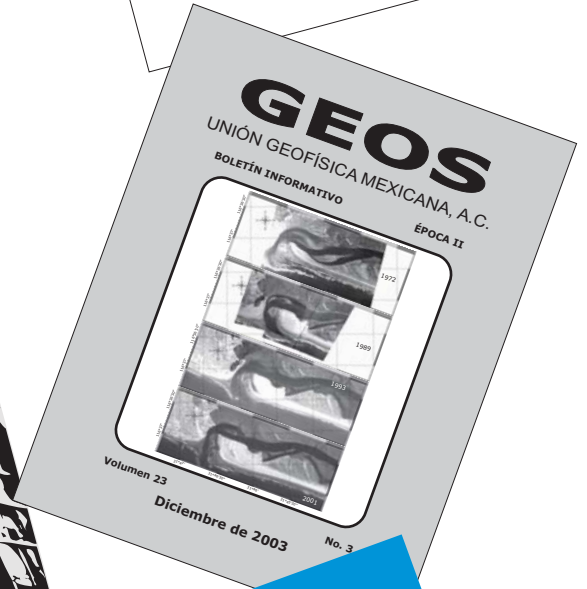
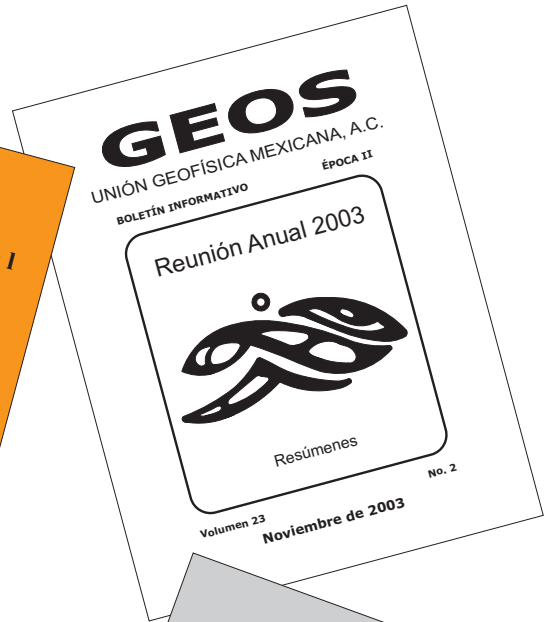
Instituciones:	Comerciales y Gubernamentales	Académicas
Página completa	\$4,000.00	\$2,000.00
Media página	\$2,000.00	\$1,000.00

GEOS

Información con:

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





Tus trabajos de investigación y divulgación tienen cabida en estos foros de la Unión Geofísica Mexicana, A.C.