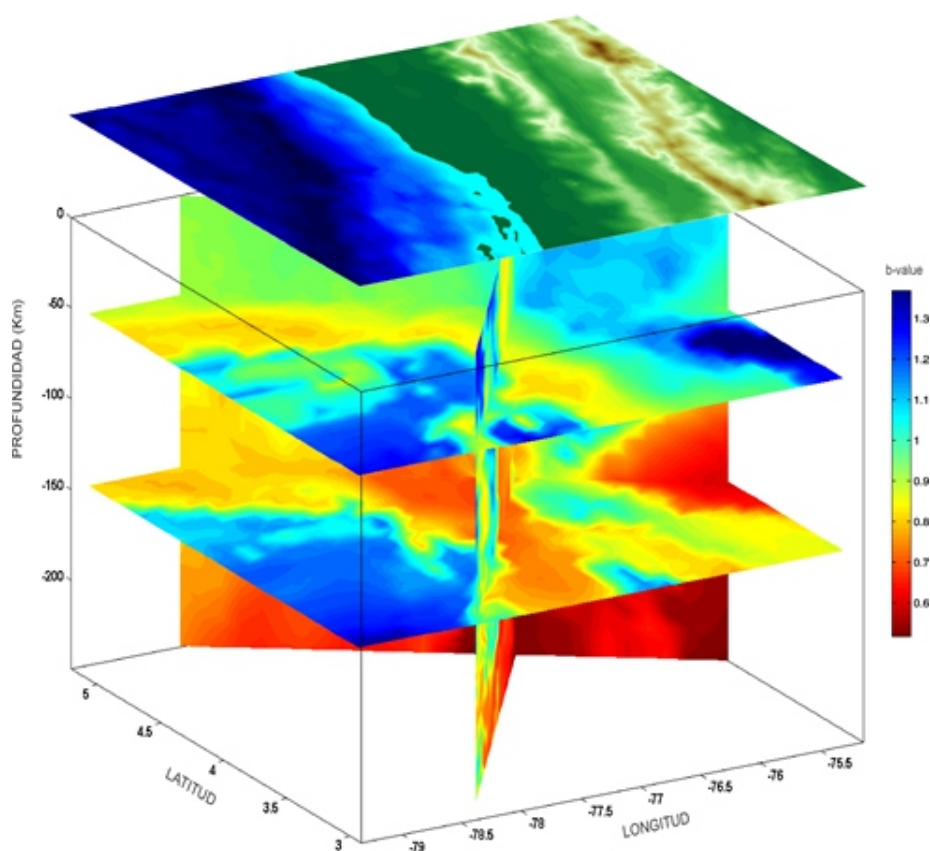


geofísica



**Volumen 35
No. 2
septiembre de 2016**

GEOS

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

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

GEOS se publica dos veces al año 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 2014-2015

Dr. Julián Adem Chain
Presidente Honorario

Dra. Xyoli Pérez Campos
Instituto de Geofísica, UNAM
Presidenta

Dra. Ligia Pérez Cruz
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidenta

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

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

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

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

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

Dr. Víctor Manuel Wong Ortega
Unión Geofísica Mexicana
Tesorero

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Dora Carreón Freyre
freyre@geociencias.unam.mx
UGM

Comité Editorial

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

Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez
Angel Daniel Peralta Castro
María Cristina Álvarez Astorga

GEOS, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana (UGM), se edita conjuntamente por la UGM y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) bajo el patrocinio del CICESE. Se publica dos veces al año, contiene artículos originales de investigación, artículos de divulgación, notas cortas, aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM. Las instrucciones para los autores se encuentran al final de cada número y en <http://www.ugm.org.mx/geos.html>.
GEOS (ISSN 0186-1891) se edita en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

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

Título: GEOS

Periodicidad: semestral

ISSN: 0186-1891

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

EDITORIAL	297
------------------	-----

REPORTES

Estimación de avenidas de diseño en la cuenca baja del Río Pánuco: método de regionalización	
Del Ángel González Marcelino, Ramón Domínguez Mora	299

Análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia	
Condori Quispe Cristóbal, Jhon Leandro Pérez	325

DIVULGACIÓN

La XX Olimpiada de Ciencias de la Tierra: Geotermia y la Teoría de la Tierra Bola de Nieve	341
Enrique Gómez Treviño	

NOTA

Interpretación de lineamientos estructurales en Nayarit, México, aplicando sensores remotos y software libre	351
Carrilo de la Cruz, Juan Luis, Felipe de Jesús Escalona Alcázar, Araceli Zamora Camacho, Francisco Javier Nuñez Cornú	

COMUNICACIONES

POLÍTICA EDITORIAL	359
---------------------------	-----

Haciendo cuentas sobre la educación, la ciencia y la tecnología en México

Como casi todos los días, un recorrido por las páginas de la prensa deja pocas veces alguna huella de optimismo. Las lecturas de los últimos meses no han sido la excepción. En discordancia con el derroche de optimismo institucional con el que arrancaron las reformas estructurales al inicio del sexenio, en particular la energética y la educativa, se nos informó en febrero de este año que habrá un recorte al gasto federal de ~132.3 mil millones de pesos. A la SEP se le retirarán 3.66 mil millones, y 900 millones de pesos al Conacyt, de los cuales, 350 millones afectarán a los apoyos para actividades científicas, tecnológicas y de innovación, y 100 millones a becas de posgrado y apoyos a la calidad. En la lista de recortes está también el programa de Infraestructura Científica y Tecnológica con 250 millones de pesos y otros 200 millones a partidas para impulsar la consolidación de proyectos y centros de investigación en los estados. A mediados de año otro factor internacional (el Brexit) dio un nuevo pretexto para restar al presupuesto de egresos ~31.7 mil millones y anunciaron que a la SEP le recortarán otros 6.5 mil millones de pesos, mientras que al CONACYT sólo 1.8 mil millones de pesos. Para ver cómo se las gastan y dónde están las prioridades nacionales, el Instituto Nacional Electoral recortará 108.9 millones de pesos a su presupuesto, el cual supera los 11 mil millones de pesos este año y hará otras reducciones para reponer, dicen, parte de los 440 millones gastados en la elección de la Asamblea Constituyente de la Ciudad de México. Cabe considerar que el INE comenzará próximamente la construcción de su megaproyecto que incluye dos torres gemelas de 14 pisos, equivalentes a 1.1 mil millones de pesos. El desánimo no mejora cuando se anuncia que los auditores externos de Pemex dudan de la capacidad de la empresa para continuar como negocio pues tiene pérdidas recurrentes en sus operaciones y su capital de trabajo y patrimonio están deteriorados.

Esta revisión de algunos gastos no tiene la finalidad de pasar de un estado de poco optimismo a otro de enojo, sino de poner en un plano de discusión algunos hechos graves y preocupantes. De forma por demás simplista, porque hay sectores primarios del país con grandes necesidades como el agro y la pesca, los panoramas en educación, ciencia y tecnología (ECT) del país, bajo las riendas de los tres niveles de gobierno, se encuentran en un estado de estancamiento más que preocupante. La política de recortes en los temas de ECT en este 2016 particularmente conflictivo en el terreno de la educación, de un desempleo sin precedentes en las áreas energéticas, así como de falta de oportunidades para los egresados de los programas de posgrado, debe llevar a replantear la dirección del gasto público. Por ejemplo, la llamada Reforma Educativa buscaba mejorar la infraestructura de las instituciones oficiales y, en su lugar, se favorece la apertura de nuevas escuelas particulares en construcciones improvisadas, tanto desde el nivel básico como del superior, con la aprobación de la SEP. No sobra



decir que las nuevas escuelas, vistas como negocio, ofrecen poco al ejército de profesionales desempleados. Los campos de la ciencia y la tecnología que, en palabras de muchos políticos transexenales, son catapultas del crecimiento, el desarrollo y elementos para que el país transite hacia la sociedad del conocimiento (palabras más, palabras menos), no están en una situación distinta a la de la educación básica. Parece más redituable invertir en torres para el INE que en infraestructura universitaria o de centros de investigación, o más provechoso construir más gasoductos con fines de importación en lugar de infraestructura para la producción. Si tanto la infraestructura en ECT como en la energética son generadoras de empleos y riqueza, entonces ¿por qué no son prioritarias en los planes de desarrollo? Para que nuestro ánimo mejore, será urgente que los tres niveles de gobierno sean coherentes, o como dijo E. Galeano: ¡Basta de hechos! ¡Queremos promesas!

Estimación de avenidas de diseño en la cuenca baja del Río Pánuco: método de regionalización

Del Ángel González Marcelino¹ y Ramón Domínguez Mora²

¹Asociación Mexicana de Hidráulica del Sur de Tamaulipas y Norte de Veracruz
(mdag53@yahoo.com.mx, bihingenieria@gmail.com)

²Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
(rdm@pumas.iingen.unam.mx, rdominguezm@iingen.unam.mx)

Resumen

Se presenta un método propuesto por el Instituto de Ingeniería, sección Hidráulica, de la Universidad Nacional Autónoma de México para el cálculo de avenidas. En este método se aplican las técnicas de regionalización en las que se consideran los volúmenes de escurrimiento de las estaciones hidrométricas con características similares para generar muestras regionales de gran tamaño y obtener registros confiables de gastos para el diseño de obras hidráulicas para control de inundaciones. Se analizaron 13 estaciones hidrométricas pertenecientes a la cuenca baja del río Pánuco, ríos Moctezuma, Pánuco y Guayalejo. Se establecieron tres regiones con estaciones hidrométricas con características similares de gastos y se determinaron las avenidas de diseño mediante la aplicación de las técnicas estadísticas propuestas por el método para el análisis de valores extremos, Gumbel y doble Gumbel. Mediante las técnicas regionales se obtuvieron en general, valores de gastos menores que lo obtenidos con el registro original, además de hidrogramas menos inestables que permiten resultados más confiables para el análisis de avenidas en ríos.

Palabras clave: técnicas de regionalización, volúmenes de escurrimiento, estaciones hidrométricas.

Introducción

La cuenca del río Pánuco es una de las regiones hidrológicas más importantes de México, tanto por su superficie, 84,956 km², que la sitúa en el cuarto lugar del país, como por el volumen de sus escurrimientos de 20,329 millones de m³ anuales.

Pertenece a la vertiente del Golfo de México y se localiza entre los paralelos 19° 00' y 24° 00' de latitud norte y los meridianos 97° 45' y 101° 20' de longitud oeste (Figura 1).

Debido a lo extenso de su superficie, se ha dividido en dos subregiones: Alto y Bajo Pánuco. El Alto Pánuco lo conforman las cuencas de los ríos Tula y San Juan del Río en cuya confluencia se forma el vaso de la Presa Hidroeléctrica Zimapán y da inicio su recorrido el río Moctezuma por el

Cañón del Infiernillo y por las cuencas de los ríos Metztlán y Amajac, que originan el río Amajac. El Bajo Pánuco se forma por las cuencas de los ríos Extórax, Bajo Amajac, Tempoal, Moctezuma, Tampaón, Guayalejo-Tamesí y Pánuco.

El colector general de la cuenca del Bajo Pánuco, a lo largo de su recorrido, recibe varias denominaciones según los tramos en que se divide, para finalmente recibir el nombre de Pánuco a partir de la estación Hidrométrica Las Adjuntas, situada 500 m aguas abajo de la confluencia del río Tampaón con el Moctezuma, en el municipio de Tamuín, San Luis Potosí y 170 km aguas arriba de la desembocadura en el mar, la cual cuenta con un área drenada de 61,063 km². Sigue un curso sinuoso a través de terrenos planos, atravesando una zona lacustre en las que

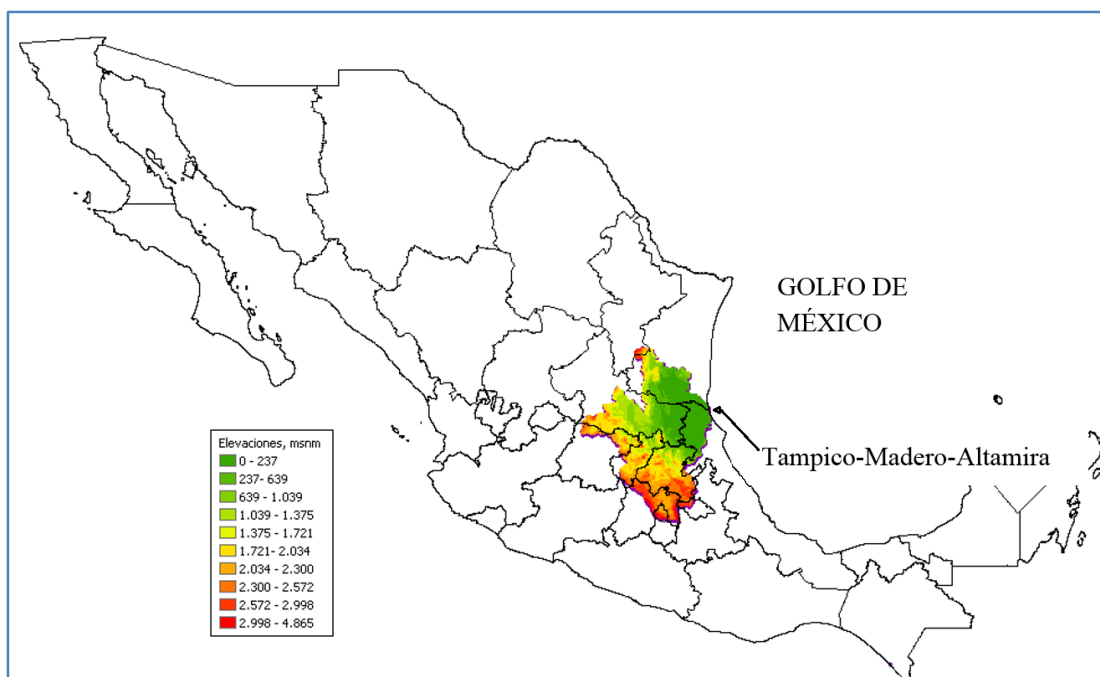


Figura 1. Extensión territorial de la Cuenca baja del río Pánuco en México.

se encuentran las lagunas Tamós, Chairel y Pueblo Viejo. Dicho tramo recibe la aportación de las aguas de los ríos Chicayán por su margen derecha y, aguas abajo, la del Guayalejo-Tamesí por su margen izquierda, a la altura del Puerto de Tampico y Cd. Madero, Tamaulipas, para desembocar finalmente en el Golfo de México, 12 km aguas abajo.

Clima

El clima tropical de la cuenca es variado. Por ser Pánuco el municipio más importante dentro del curso del río, del que toma su nombre, se describe el clima en su territorio. Aguas abajo, en la planicie costera en la desembocadura al mar, se encuentran los municipios de Tampico y Madero.

El clima del municipio de Pánuco, a 40 km, de la costa en línea recta, es cálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual

de todo el territorio oscila entre los 24° y 26 °C, la precipitación promedio anual del sector noroeste del municipio varía entre 800 a 1,000 mm. En el resto del territorio fluctúa entre 1,000 y 1,200 mm (INEGI, 2005a-c).

La mayor parte del municipio de Pánuco se encuentra cubierto por pastizal, con presencia de pequeñas zonas de selva en el norte, así como zonas dedicadas a la agricultura a lo largo del cauce del río Pánuco. Las principales especies vegetales son las que corresponden a la selva baja caducifolia y al tular manglar (INEGI, 2005d).

La zona conurbada del sur de Tamaulipas se forma por los municipios de Tampico, Madero y Altamira, ubicándose sobre la margen izquierda de la desembocadura del río Pánuco en el Golfo de México y las lagunas del Chairel y de Champayán que deben su origen al río Tamesí (Guayalejo), afluente del río Pánuco en su desembocadura (Figura 2).

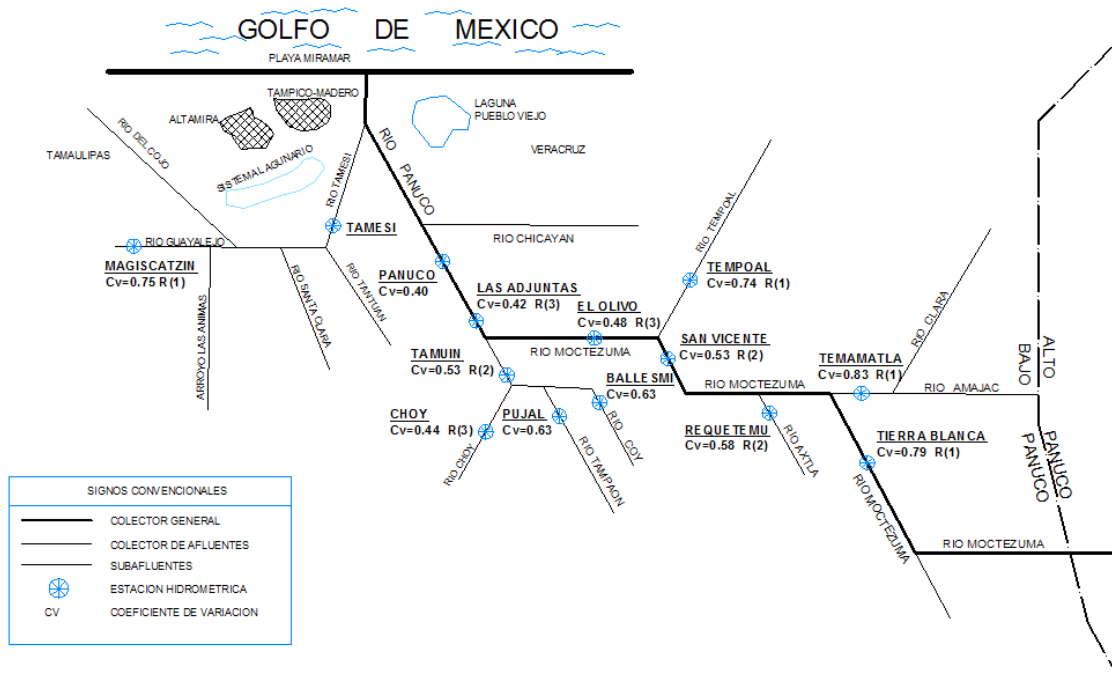


Figura 2. Cuenca baja del río Pánuco.

El clima A(w) predominante en la región es tropical subhúmedo, cálido y extremo, con temperaturas promedio anuales de 24°C, alcanzando las más altas un promedio de 36.8° C, y las mínimas un promedio de 9.7° C. Los vientos predominantes en otoño e invierno son los denominados “nortes”, mientras que en las otras estaciones del año varían de sur a norte. Por estar la región expuesta a los fenómenos de tipo hidrometeorológico son comunes los ciclones y vientos huracanados, que en más de una ocasión han afectado seriamente a los habitantes del municipio. La precipitación anual varía de 788.6 a 1,044.10 mm y el mes más lluvioso es julio arriba de los 1000 mm (Gobierno del Estado de Tamaulipas. Administración 2011-2016).

Inundaciones

La cuenca del bajo Pánuco es una zona sensible a la incidencia de eventos meteorológicos como los ciclones o huracanes que a través de los años han provocado inundaciones de gran importancia.

Las inundaciones se pueden considerar como uno de los fenómenos naturales más catastróficos

en nuestro planeta; causan severos daños a la infraestructura construida por el hombre, a sus bienes materiales, así como a la agricultura y a la ganadería. En los casos más severos son fuente de pérdida de vidas humanas. En 1995 se presentaron los ciclones Hilda, Janet y Gladis (CENAPRED, 2001 y 2007) que provocaron inundaciones que causaron fuertes daños en la cuenca del bajo Pánuco, principalmente en el sur de Tamaulipas y norte de Veracruz (Figura 3).

En el mes de septiembre de 2013, los huracanes Ingrid y Manuel (Figura 4), provocaron severos daños en todo el país. Estos meteoros incidieron, uno por el Océano Pacífico y el otro por el Golfo de México de manera simultánea, causando desastres prácticamente en la mayoría de los estados de la República Mexicana. A pesar de que sus vientos no tenían características de destructivos (140 km/hr, de Ingrid y 85 km/hr de Manuel), al estar los suelos saturados por las lluvias anteriores, el escurrimiento fue mayor teniendo las consecuentes inundaciones.



Figura 3. Inundación en Tampico-Madero por el ciclón Hilda de 1955.

Las inundaciones se producen por las avenidas que se presentan después de las lluvias, y su magnitud depende de factores tales como la periodicidad con que ocurren las avenidas, la intensidad de las precipitaciones, la capacidad de infiltración y de saturación del suelo, el desbordamiento de cauces, etc. Si se analiza la periodicidad con que se presentan las avenidas con los efectos directos de las inundaciones que provocan, es importante contar con medidas adecuadas para prevenir y mitigar daños. Esto lleva al estudio del comportamiento histórico de los caudales, mismo que puede lograrse mediante el tratamiento estadístico de las muestras históricas para determinar los gastos de diseño para diferentes períodos de retorno (Campos, 2014).

Para llevar a cabo un estudio hidrológico, conforme a sus variables estadísticas, se requiere de registros de gastos de forma ininterrumpida durante el mayor número de años posible. Esto quiere decir que mientras mayor sea el registro, más confiabilidad se tendrá en sus resultados.

Diversos autores (Ramachandra, 2000; Viessman 2003) estudiosos en la materia, han encontrado que si el registro es pequeño, con pocos años de información, los resultados del análisis varían mucho con relación a un registro amplio, teniéndose sobreestimaciones hasta del 120%, y subestimaciones del orden del 2%.



Figura 4. Ciclones Manuel e Ingrid en el 2013.

Contar con información amplia y suficiente no siempre es fácil ya que en México, en muchos de los casos, los registros no siempre son continuos y muchas veces son inexistentes. Esto conlleva a la búsqueda de metodologías que permitan ampliar el tamaño de los registros o bien, generarlos totalmente. Una técnica que permite lograr este objetivo es la regionalización, ya que de manera sencilla, se pueden generar muestras regionales de gran tamaño a partir de la información de sitios con características similares.

El sur de Tamaulipas y norte de Veracruz, ubicados en la cuenca baja del río Panuco el diseño de las obras hidráulicas para protección y mitigación de daños es importante, debido a la incidencia de fenómenos meteorológicos como ciclones y huracanes, el diseño de avenidas con base en registros de las estaciones hidrométricas ubicadas en los ríos Moctezuma, Pánuco y sus afluentes.

En este trabajo, se presenta un método propuesto por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México para el diseño de las avenidas conforme a los registros históricos.

Se analizaron 13 estaciones hidrométricas de la cuenca baja del río Pánuco (Tabla 1) en las que están incluidos los ríos Guayalejo, Moctezuma, Pánuco y sus afluentes. El estudio consistió en determinar primero las avenidas a partir

de la muestra original (registros históricos) y posteriormente mediante su regionalización. La conveniencia de utilizar este método se puede comprobar mediante su aplicación al comparar los eventos regionales contra los eventos resultantes del modelo de una muestra original.

Estimación de avenidas de diseño a partir del registro original

Para llevar a cabo la estimación de las avenidas a partir de la muestra original, se trabajó con 13 estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca baja del río Pánuco. Esta información fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (Bandas, 2013) y su proceso permitió determinar los gastos máximos para diferentes períodos de retorno conforme al método estipulado por la UNAM (Del Ángel y Domínguez, 2014).

Las estaciones hidrométricas que se incluyeron en este estudio y sus características principales conforme a la cuenca y su escurrimiento, se presentan en la Tabla 1.

Para el análisis de la información, se llevó a cabo la verificación de su calidad efectuando una comprobación aritmética con registros comunes, considerando que la suma de los gastos de entrada debería corresponder a la magnitud de los gastos de salida.

Se realizó la suma de los gastos de entrada $Q_{entrada}$ y se comparó con los gastos de salida Q_{salida} por medio de un factor: $\text{Factor} = Q_{salida} / Q_{entrada} < 1.20$

Dicha comprobación se realizó en el siguiente orden:

$Q_{entrada} = \text{Temamatla} + \text{Tierra Blanca} + \text{Requetemu}$
 $Q_{salida} = \text{San Vicente}$

$Q_{entrada} = \text{San Vicente} + \text{Tempoal}$ $Q_{salida} = \text{Olivo}$

$Q_{entrada} = \text{Choy} + \text{Pujal} + \text{Ballesmi}$ $Q_{salida} = \text{Tamuín}$

$Q_{entrada} = \text{Olivo} + \text{Tamuín}$ $Q_{salida} = \text{Adjuntas}$

$Q_{entrada} = \text{Adjuntas}$ $Q_{salida} = \text{Pánuco}$

Tabla 1. Estaciones hidrométricas y escurrimientos de la cuenca del bajo Pánuco.

No.	Estación	Corriente	Cuenca	Área (km ²)	No. Años	Periodo	Gasto (m ³ /s)			Volumen Anual
							Mín	Med.	Máx.	(m ³ x10 ⁶)
1	Tierra Blanca	Moctezuma	B. Pánuco	18,169	50	1960-2009	0.377	52.566	2578.732	1671.398
2	Temamatla	Amajac	B. Pánuco	6,884	46	1961-2006	0.011	49.333	3966.667	1573.353
3	Requetemu	Axtla	B. Pánuco	661	56	1954-2009	0.120	42.579	2643.70	999.054
4	San Vicente	Moctezuma	B. Pánuco	26,768	35	1972-2007	0.282	172.485	7279.701	5,456.115
5	Tempoal	Tempoal	B. Pánuco	5275	52	1974-2006	0.00	83.149	6120.00	2,646.763
6	Ballesmi	Coy	B. Pánuco	194	56	1954-2009	0.00	29.523	733.456	0.916
7	Pujal	Tampaón	B. Pánuco	23,373	56	1954-2009	0.00	164.823	6052	5218.461
8	Choy	Choy	B. Pánuco	12	33	1959-1992	1.193	5.546	171.40	0.178
9	Tamuín	Tampaón	B. Pánuco	29,630	36	1974-2009	27.604	180.97	3748.61	5,726.84
10	EL Olivo	Moctezuma	B. Pánuco	33,483	33	1968-2006	0.00	231.946	6200.00	7,347.90
11	Las Adjuntas	Pánuco	B. Pánuco	61,063	44	1956-2009	2.085	397.43	6692.00	12,579.84
12	Pánuco	Pánuco	B. Pánuco	65,577	28	1973-2006	0.00	405.442	7,300.00	13,702.24
13	Magiscatzin	Guayalejo	B. Pánuco	10,968	46	1955-2006	0.00	66.26	5,510.00	2,136.53

Análisis de frecuencias

Para llevar a cabo el análisis de frecuencias de los datos, se obtuvieron los eventos máximos anuales para duraciones de 1 a 15 días.

En la Tabla 2, se presentan los gastos máximos para la estación Las Adjuntas.

Tabla 2. Gastos máximos de la estación Las Adjuntas. Registro original.

Año	1 día	2 días	3 días	4 días	5 días	6 días	7 días	8 días	9 días	10 días	11 días	12 días	13 días	14 días	15 días
1956	6182.76	6081.21	5989.6	5637.3	5377.99	5005.26	4688.62	4435.6	4224.92	4017.39	3819.47	3635.2	3477.13	3331.46	3204.97
1957	1276.43	1241.04	1162.1	1119.39	1041.21	964.61	920.47	898.25	872.59	850.93	826.14	800.51	774.6	747.81	721.99
1958	6640.92	6582.43	6452.96	6280.51	6033	5824.72	5586.11	5342.5	5125.09	4926.9	4723.25	4523.17	4331.96	4150.67	3979.94
1959	2188.04	2028.37	1838.52	1707.12	1555.99	1430.86	1328.99	1260.63	1217.87	1178.18	1141.35	1116.24	1094.4	1072.42	1049.21
1960	2013.79	1837.63	1730.42	1591.83	1460.36	1343.9	1243.06	1194.04	1173.56	1155.88	1136.6	1118.49	1089.64	1056.91	1027.02
1961	3179.17	3041.04	2956.68	2926.97	2856.41	2785.98	2650.06	2540.61	2408.37	2272.64	2143.13	2025.19	1923.15	1828.13	1741.14
1962	1682.98	1608.64	1560.11	1511.42	1427.36	1358.6	1278.08	1209.09	1141.62	1087.53	1039.67	998.17	958.71	924.6	891.51
1963	3882.94	3600.01	3140.15	2894.15	2616.89	2364.44	2150.72	1979.21	1838.41	1713.27	1606.26	1516.84	1442.94	1380.45	1321.74
1964	1902.38	1769.64	1640.6	1479.62	1334.23	1217.36	1118.93	1033.71	959.93	896.27	841.02	793.12	751.82	715.83	686.99
1965	2575	2476.88	2345.68	2244.02	2214.18	2192.37	2159.94	2084.05	2007.53	1940.17	1874.15	1812.91	1761.23	1726.76	1692.5
1966	5399.6	5345.79	5017.43	4654.78	4376.39	4136.1	3879.77	3631.91	3434.2	3267.33	3116.55	2982.94	2878.73	2780.31	2689.7
1967	5191.52	5130.69	4999.91	4904.9	4842.74	4789.45	4738.92	4636.97	4476.17	4313.46	4283.58	4289.9	4255.16	4191.61	4111.15
1968	2651.53	2521.78	2420.74	2280.12	2122.94	2082.66	2063.02	2037.42	1977.06	1909.33	1850.31	1847.43	1854.95	1831.31	1788.89
1969	4719.16	4697.33	4683.51	4670.16	4649.54	4625.95	4577.05	4527.52	4439.68	4321.8	4218.43	4152.07	4140.34	4111.53	4075.92
1970	4082	3875.95	3790.31	3648.72	3513.97	3386.14	3283.84	3157.49	3022.13	2889.28	2762.03	2651.74	2549.38	2451.58	2358.77
1971	3349.79	3214.55	3225.05	3200.03	3175.88	3066.31	2948.63	2828.44	2701.6	2596.08	2517.65	2487.99	2462.69	2428.72	2391
1972	3118.43	3054.86	3016.34	2978.36	2940.11	2875.6	2821.64	2725.13	2627.26	2532.14	2430.78	2338.92	2269.11	2215.94	2168.72
1973	3198.05	3195.25	3090.56	2966.9	2893.27	2869.9	2816.58	2726.68	2655.8	2566.57	2487.79	2466.76	2470.55	2472.42	2457.47
1974	5712.16	5701.38	5617.1	5437.36	5266.77	5101.37	4959.17	4826.85	4719.49	4622.89	4517.06	4399.23	4272.46	4140	4007.58
1975	6156.81	6111.41	6004.81	5912.29	5733.31	5612.91	5475.2	5359.16	5220.47	5067.66	4927.47	4788.14	4620.69	4468.6	4322.38
1976	5097.04	4985.21	4869.91	4809.62	4728.44	4622.44	4542.79	4459.33	4389.62	4321.72	4270.59	4214.86	4166.59	4109.69	4057.63
1977	1899.96	1776.08	1690.56	1601.78	1507.91	1412.63	1321.25	1250.26	1182.14	1118.45	1060.58	1008.89	966.26	935.51	908.85
1978	5162.51	5156.29	4972.68	4870.95	4665.78	4393.31	4141.43	3930.74	3726.54	3535.44	3357.86	3195.06	3051.54	2953.72	2918.06
1979	3534.92	3513.6	3294.75	3037.34	2861.26	2663.71	2480.03	2320.44	2185.34	2068.47	1979.28	1937.98	1914.5	1877	1828.29
1980	3213.92	3067.14	2861.3	2729.77	2547.92	2377.26	2223.1	2085.48	1964.01	1863.56	1768.73	1679.36	1596.27	1519.4	1448.59
1981	3517.93	3464.21	3413.02	3314.05	3186.34	3074.45	2937.36	2807.61	2817.64	2862.32	2879.55	2866.24	2851.57	2827.16	2791.25
1982	839.66	770.82	715.2	637.23	570.44	521.39	488.89	466.64	445.21	425.91	408.05	391.86	377.47	366.5	361.27
1983	2711.6	2707.51	2668.96	2604.54	2549.01	2491.31	2408.2	2344.92	2257.38	2166.35	2087.17	2007.7	1931.3	1857.68	1786.2
1984	4671	4613.5	4573.33	4494.17	4415.91	4360.73	4290.67	4216.15	4188	4190.51	4182.55	4165.06	4124.94	4084.36	4040.39
1985	2883.18	2859.97	2748.07	2679.63	2567.34	2430.17	2286.36	2151.61	2027.83	1928.94	1846.9	1779.23	1724.41	1669.48	1621.6
1986	1574.65	1502.12	1464.35	1370.69	1310.8	1237.88	1174.76	1128.67	1095.33	1061.43	1033.04	1000.96	972.88	944.6	915.16
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
2001	2678.75	2567.4	2524.78	2385.18	2199.37	2064.14	1923.24	1786.72	1671.26	1573.76	1493.9	1435.61	1397.92	1411.11	1434.85
2002	2321.2	2274.65	2211.3	2195.91	2164.27	2100.25	2039.08	1981.95	1930.36	1863.24	1784.59	1713.16	1644.49	1577.97	1515.06
2003	3111.81	3102.07	3028.47	2932.35	2811.98	2658.68	2524.43	2374.42	2255.27	2196.64	2153.21	2126.84	2103.84	2064.67	2026.94
2004	1604.07	1511.53	1471.92	1391.77	1357.08	1305.76	1267.65	1206.53	1141.18	1087.39	1037.55	992.9	953.51	922.94	913.32
2005	3372.48	3341.55	3320.39	3251.43	3204.73	3120.27	3073.42	3066.26	3047.35	3004.17	2934.96	2859.7	2784.51	2699.53	2607.53
2006	1308.92	1258.27	1145.79	1076.5	1000.3	931.5	874.11	824.01	782.68	758.72	742.39	724.67	705.34	713.26	713.8
2007	3618.97	3612.39	3579.45	3562.42	3534.76	3499.7	3463.49	3423.99	3384.58	3345.26	3301.24	3253.47	3205.11	3160.71	3112.8
2008	3524.17	3509.35	3471.54	3433.03	3389.12	3358.03	3314.35	3275.74	3224.35	3171.89	3119.47	3052.86	2981.85	2913.4	2846.42
2009	2668.48	2604.89	2515.57	2459.11	2363.78	2221.73	2087.3	1972.87	1857.85	1750	1651.86	1563.93	1488.39	1420.68	1384.18

El objetivo principal del análisis de frecuencias es correlacionar la magnitud de eventos extremos con la frecuencia con la que ocurren, mediante el uso de funciones de probabilidad, de forma que se pueda estimar la frecuencia con que una variable supera una determinada magnitud (Domínguez et al., 2014).

Los datos se trazaron en papel de probabilidad para verificar su comportamiento dentro de una función de distribución en particular. El análisis de frecuencias establece una relación entre probabilidad de ocurrencia de un evento (período de retorno) y su magnitud de manera que los gastos grandes tendrán un período de retorno grande, o sea una probabilidad de ocurrencia pequeña.

Por ser una distribución de probabilidad desarrollada para el análisis de valores extremos, como gastos máximos y mínimos, se utilizó la función de distribución Gumbel para dibujar las gráficas. En el eje de las ordenadas se encuentran los gastos máximos anuales y en el eje de las abscisas, la variable reducida Z (Tabla 3) misma que depende del período de retorno. Su estimación se llevó a cabo por medio de la distribución de Weibull:

$$Z = -\ln [\ln(T/T-1)]$$

Tabla 3. Variable reducida “Z” para una duración de un día (gastos de mayor a menor) de la estación Las Adjuntas.

No.	Q(m³/s)	T=(N+1)/m	Z=-ln(T/T-1)
1	6640.92	54.00	3.9797
2	6182.76	27.00	3.2770
3	6156.81	18.00	2.8619
4	5712.16	13.50	2.5645
5	5399.6	10.80	2.3314
6	5377.49	9.00	2.1389
7	5191.52	7.71	1.9745
8	5162.51	6.75	1.8304
9	5097.04	6.00	1.7020
.	.	.	.
.	.	.	.
45	1899.96	1.20	-0.5832
46	1822.15	1.17	-0.6469
47	1682.98	1.15	-0.7145
48	1604.07	1.13	-0.7872
49	1574.65	1.10	-0.8669
50	1458.86	1.08	-0.9565
51	1308.92	1.06	-1.0614
52	1276.43	1.04	-1.1927
53	839.66	1.02	-1.3835

Donde

Z es la variable reducida

$T=N+1/m$, Período de retorno

m , posición de los datos en orden descendente,

N , número de elementos.

En la Figura 5 se muestra la gráfica correspondiente a un día para la estación las Adjuntas.

De este análisis se pudo determinar que las estaciones en estudio de la Tabla 1 siguen las funciones de distribución de la Tabla 4.

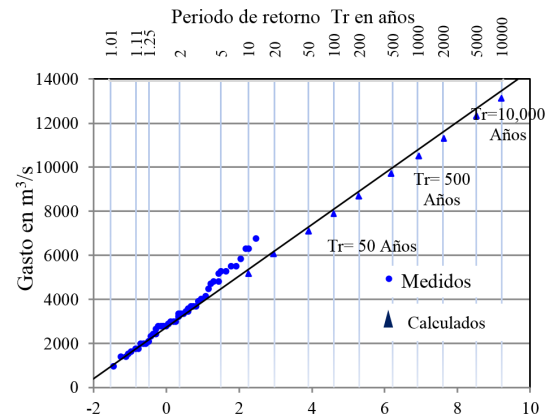


Figura 5. Gráfica en papel Gumbel de la estación Las Adjuntas para una duración de un día.

Tabla 4. Funciones de distribución de las estaciones hidrométricas en estudio.

Estación	Función de Distribución
Tierra Blanca	Doble Gumbel
Temamatla	Doble Gumbel
Requetemu	Gumbel
San Vicente	Gumbel
Tempoal	Doble Gumbel
Ballesmi	Doble Gumbel
Pujal	Doble Gumbel
Choy	Gumbel
Tamuín	Gumbel
El Olivo	Gumbel
Adjuntas	Gumbel
Pánuco	Doble Gumbel
Magiscatzin	Doble Gumbel

Tabla 5. Estación hidrométrica Las Adjuntas. Ajuste a una función de distribución Gumbel para diferentes períodos de retorno.

Duración	Gasto en m³/s para diferentes periodos de retorno en años											
días	Periodo de retorno, T = 2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
1	3048.53	4346.57	5205.99	6030.36	7097.43	7897.04	8693.74	9744.83	10539.22	11333.33	12382.87	13176.74
2	2973.69	4269.03	5126.65	5949.31	7014.15	7812.1	8607.14	9656.04	10448.77	11241.22	12288.57	13080.79
3	2866.27	4149.83	4999.66	5814.83	6870.00	7660.69	8448.51	9487.87	10273.4	11058.65	12096.48	12881.50
4	2773.23	4040.65	4879.8	5684.73	6726.62	7507.38	8285.28	9311.58	10087.24	10862.61	11887.39	12662.54
5	2669.10	3913.47	4737.36	5527.65	6550.60	7317.15	8080.91	9088.55	9850.10	10611.37	11617.52	12378.57
6	2569.88	3790.28	4598.29	5373.35	6376.59	7128.38	7877.42	8865.64	9612.52	10359.12	11345.88	12092.27
7	2459.88	3650.68	4439.09	5195.35	6174.26	6907.81	7638.68	8602.93	9331.69	10060.19	11023.02	11751.3
8	2372.79	3529.37	4295.13	5029.66	5980.44	6692.92	7402.8	8339.34	9047.16	9754.73	10689.89	11397.25
9	2279.22	3405.19	4150.68	4865.77	5791.39	6485	7176.09	8087.85	8776.93	9465.77	10376.18	11064.82
10	2209.1	3305.29	4031.07	4727.25	5628.38	6303.66	6976.47	7864.11	8534.97	9205.59	10091.92	10762.35
11	2134.43	3204.16	3912.42	4591.79	5471.17	6130.15	6786.71	7652.93	8307.6	8962.03	9826.97	10481.21
12	2082.31	3128.76	3821.6	4486.19	5346.44	5991.07	6633.35	7480.71	8121.13	8761.32	9607.44	10247.44
13	2026.86	3052.73	3731.94	4383.45	5226.77	5858.72	6488.36	7319.06	7946.88	8574.47	9403.94	10031.35
14	1954.78	2942.83	3597.01	4231.76	5036.74	5645.4	6251.84	7051.91	7656.59	8261.05	9059.95	9664.23
15	1924.54	2904.68	3553.62	4176.1	4981.84	5585.62	6187.2	6980.88	7580.72	8180.34	8972.84	9572.29

A partir de los ajustes a funciones de distribución obtenidos en la Tabla 5, se dibujaron las curvas Q-d-T, las cuales son de gran utilidad para fines de diseño (Figura 6).

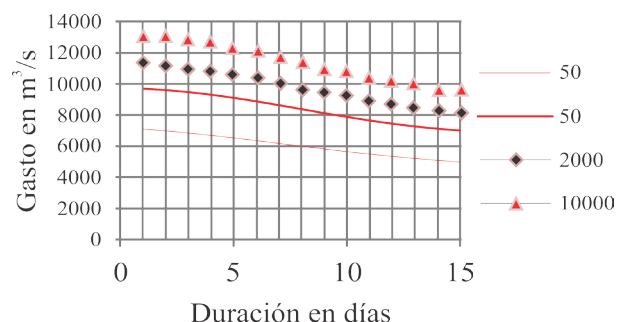


Figura 6. Curvas Q-d-T de la estación Las Adjuntas

Avenida de diseño

Las avenidas de diseño se estiman conforme al procedimiento siguiente:

- 1) Se seleccionan los gastos correspondientes al periodo de retorno de interés y se aísla la columna correspondiente.
- 2) Cada uno de los valores se consideran como gasto promedio (Q_{medio}) de cada duración. A partir de los gastos promedio se obtienen los gastos diarios ($Q_{individual}$), los cuales se obtienen conforme a la siguiente expresión:

$$Q_{ind} = nQ_{medio} - \left(\sum_{i=1}^{n-1} Q_{individual\ i} \right)$$

Siendo n el número del gasto individual a obtener e i el contador de los gastos individuales. Cada uno de los gastos individuales corresponde al gasto medio de un día cualquiera, por lo que la duración del hidrograma será de 15 días.

A partir de los gastos individuales se obtiene el hidrograma de la avenida de diseño, colocando al centro el gasto de mayor magnitud (pico del hidrograma) y a los lados los gastos individuales alternados y ordenados (Tabla 6).

Tabla 6. Avenida de diseño para un T de 50 años de la estación Las Adjuntas.

Días	Q_{medio} m³/s	nQ_{medio}	$SQ_{individual\ i}$	$Q_{individual}$	Ave. de diseño
1	7097.43	7097.43	0	7097.43	3637.00
2	7014.15	14028.3	7097.43	6930.87	3790.73
3	6870.00	20610.0	14028.30	6581.70	3899.07
4	6726.62	26906.4	20610.00	6296.48	4278.99
5	6550.6	32753.0	26906.48	5846.52	4960.28
6	6376.59	38259.5	32753.00	5506.54	5846.52
7	6174.26	43219.8	38259.54	4960.28	6581.70
8	5980.44	47843.5	43219.82	4623.70	7097.43
9	5791.39	52122.5	47843.52	4278.99	6930.87

Continuación Tabla 6.

10	5628.38	56283.8	52122.51	4161.29	6296.48
11	5471.17	60182.8	56283.80	3899.07	5506.54
12	5346.44	64157.2	60182.87	3974.41	4623.70
13	5226.77	67948.0	64157.28	3790.73	4161.29
14	5077.90	71090.6	67948.01	3142.59	3974.41
15	4981.84	74727.6	71090.60	3637.00	3142.59

A partir de los gastos alternados se dibuja el hidrograma de diseño de la Figura 7.

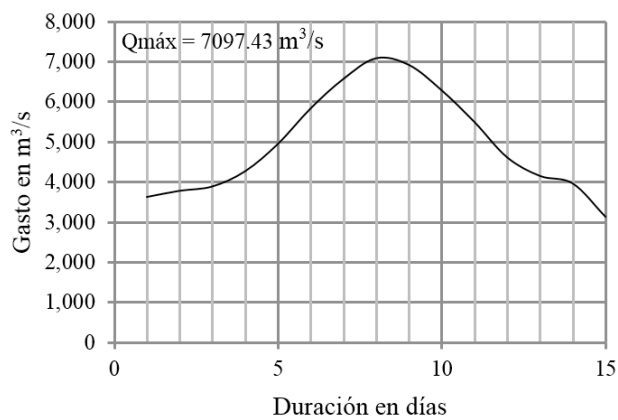


Figura 7. Avenida de diseño para un T de 50 años de la estación Las Adjuntas, del registro histórico de gastos medidos (original).

Estimación de avenidas de diseño a partir de la muestra regional

Como se mencionó inicialmente, en el análisis de registros históricos de gastos de una corriente, es importante contar con una base de datos de escurrimientos amplia, esto es, que se tengan los suficientes registros de gastos para tener la certeza de que el análisis será confiable. Desafortunadamente, en México no siempre se cuenta con la información suficiente para llevar a cabo este análisis, por lo que es necesaria la búsqueda de metodologías que permitan ampliar el tamaño de los registros o bien, generarlos. Esto se puede lograr mediante el método de la Regionalización (Campos, 2014), para generar muestras de mayor tamaño a partir de la información de estaciones hidrométricas con registros de gastos similares.

Identificación de regiones

El análisis regional, se basa en considerar como homogéneos a varios sitios de la región con características similares, esto es, que no dependen del área de captación.

Para identificar el grupo de estaciones hidrométricas con características similares en el análisis de gastos, se utilizó el concepto de Regionalización.

Un método para identificar regiones es la prueba F de Fisher con la cual se define si dos conjuntos forman parte de la misma población por medio de sus varianzas. Para realizar la comparación se utiliza su cociente, siendo el numerador el mayor. Si el cociente se encuentra dentro del valor límite de la función F de Fisher, se acepta (Domínguez et al, 2014).

Para el caso de las estaciones del río Pánuco se consideró que si los máximos anuales de cada estación se dividen entre su promedio, la variancia de la nueva muestra es igual al cuadrado del coeficiente de variación, por lo que se elaboró una tabla en la que se determinaron los coeficientes de variación de todas las estaciones, así como los cocientes de variación $(Cv1/Cv2)^2$, siendo $Cv1$ el mayor.

De la tabulación se determinaron los escenarios de regionalización por lo que se propusieron los de las tablas 7, 8 y 9 (Del Ángel y Domínguez, 2014).

Tabla 7. Región 1. Valores de los cocientes $(Cv1/Cv2)^2$ que forman las regiones de las estaciones hidrométricas.

Coeficiente de variación	Temamatla	Tierra Blanca	Tempoal	Magiscatzin
Cv	0.83	0.79	0.74	0.75
Temamatla	1	1.097	1.257	1.211
Tierra Blanca		1	1.146	1.104
Tempoal			1	1.037
Magiscatzin				1

Tabla 8. Región 2. Valores de los cocientes $(Cv1/Cv2)^2$ que forman las regiones de las estaciones hidrométricas.

Coefficiente de variación	Requetemu	San Vicente	Tamuin
Cv	0.58	0.53	0.53
Requetemu	1	1.163	1.168
San Vicente		1	1.004
Tamuin			1

Tabla 9. Región 3. Valores de los cocientes $(Cv1/Cv2)^2$ que forman las regiones de las estaciones hidrométricas.

Coefficiente de variación	Olivo	Choy	Adjuntas
Cv	0.48	0.44	0.42
Olivo	1	1.199	1.348
Choy		1	1.124
Adjuntas			1

Muestra regional

Mediante el método de estación-año (datos existentes integrados en una muestra grande o única), se lleva a cabo el proceso de regionalización, dividiendo los datos de cada estación por su media para formar la muestra grande o única para cada región y se unen todos los datos en un solo registro. En la Tabla 10 se presentan los gastos para dos días, y en la Tabla 11, los gastos divididos por su media para la estación Las Adjuntas.

Divididos los datos por su media, para todas las estaciones de cada región, se genera la muestra grande uniendo todos los datos en un mismo registro.

En la Tabla 12 se presentan los datos de la muestra grande regional para la estación Las Adjuntas. La muestra grande regional se ordena de mayor a menor (al igual que en la Tabla 3) y se dibuja en papel Gumbel para identificar su comportamiento como en la Figura 5.

Tabla 10. Registro de gastos máximos para dos días de la Región 3 en m^3/s , estación Las Adjuntas (Tabla 2)

Estación:	Olivo	Choy	Las Adjuntas (Tabla 2)
1956			6081.21
1957			1241.04
1958			6582.43
1959			2028.37
-	-	-	-
1968	1816.27	41.76	2521.78
1969	3367.57	94.93	4697.33
1970	2922.41	115.88	3875.95
1971	2395.83	53.92	3214.55
-	-	-	-
2002	1656.78		2274.65
2003	2384.79		3102.07
2004	1137.23		1511.53
2005	3015.52		3341.55
2006	1005.25		1258.27
2007			3612.39
2008			3509.35
2009			2604.89

Tabla 11. Registro de gastos divididos por su media de la Región 3, estación Las Adjuntas.

No.	Región: 3	Las Adjuntas
	Q_{max}	Q_{max}/Q_{med}
1	6081.21	1.894
2	1241.04	0.386
3	6582.43	2.050
4	2028.37	0.632
5	1837.63	0.572
6	3041.04	0.947
7	1608.64	0.501
8	3600.01	1.121
-	-	-
49	3341.55	1.041
50	1258.27	0.392
51	3612.39	1.125
52	3509.35	1.093
53	2604.89	0.811
Suma:	170,188.47	
Media:	3211.103	

Tabla 12. Muestra grande regional para la estación Las Adjuntas

				1 Día	
Dato	Xmuestra regional	Dato	Xmuestra regional	Dato	Xmuestra regional
1	0.723	43	1.123	83	1.580
2	1.243	44	0.135	84	0.807
3	1.081	45	0.642	85	1.437
4	0.919	46	1.244	86	1.243
5	0.725	47	1.675	87	1.020
6	0.884	48	0.521	88	0.949
7	1.851	49	1.258	89	0.974
8	2.005	50	1.415	90	1.739
9	0.921	51	0.867	91	1.874
10	0.233	52	0.740	92	1.552
11	1.566	53	1.103	93	0.578
12	1.195	54	1.920	94	1.572
13	1.055	55	1.204	95	1.076
14	1.356	56	1.877	96	0.978
15	0.266	57	1.821	97	1.071
16	0.843	58	1.184	98	0.256
-	-	-	-	-	-
26	2.091	67	0.672	108	0.859
27	0.787	68	0.906	109	1.637
28	0.568	69	0.983	110	0.705
29	0.645	70	1.614	111	0.609
30	0.473	71	1.514	112	0.842
31	0.934	67	0.672	113	0.798
32	1.232	72	1.882	114	0.886
33	0.405	73	0.389	115	0.555
34	0.813	74	2.022	116	0.815
35	0.620	75	0.666	117	0.707
36	0.880	76	0.613	118	0.947
37	0.420	77	0.968	119	0.488
38	1.103	78	0.512	120	1.027
39	0.390	79	1.182	121	0.398
40	0.346	80	0.579	122	1.102
41	0.904	81	0.784	123	1.073
42	0.347	82	1.644	124	0.812

Mediante el software AX (CENAPRED, 1997), se realizaron corridas para una distribución Gumbel y se obtuvieron los eventos para diferentes períodos de retorno. Este procedimiento se repitió de 1 a 15 días para todas las duraciones. En la Tabla 13 se muestran los resultados del ajuste para la Región 3.

Tabla 13. Resultados del ajuste a una función de distribución Gumbel en la Región 3.

Días	Periodo de retorno en años					
	50	500	1000	2000	5000	10000
1	2.19	3.01	3.26	3.50	3.83	4.08
2	2.31	3.21	3.49	3.76	4.12	4.39
3	2.33	3.25	3.53	3.8	4.17	4.45
4	2.34	3.28	3.56	3.84	4.21	4.49
5	2.36	3.31	3.60	3.88	4.26	4.54
6	2.38	3.34	3.62	3.91	4.29	4.58
7	2.36	3.31	3.60	3.88	4.26	4.55
8	2.390	3.360	3.65	3.940	4.330	4.620
9	2.390	3.360	3.65	3.950	4.330	4.620
10	2.41	3.39	3.68	3.97	4.36	4.65
11	2.42	3.41	3.71	4.00	4.39	4.69
12	2.43	3.42	3.72	4.01	4.41	4.70
13	2.44	3.43	3.73	4.03	4.43	4.73
14	2.44	3.44	3.74	4.04	4.43	4.73
15	2.44	3.44	3.74	4.04	4.4	4.74

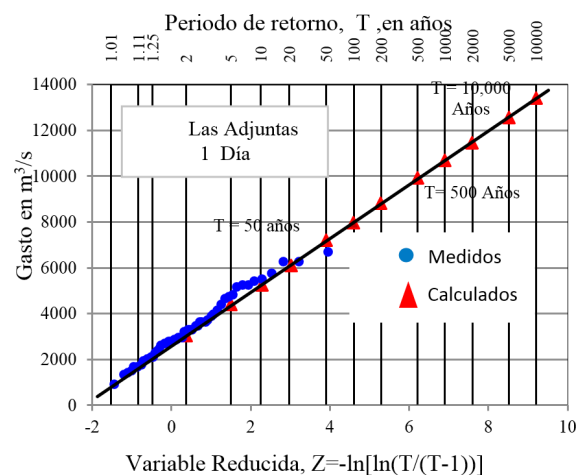


Figura 8. Ajuste a una función de distribución Gumbel de los datos medidos y regionales calculados para 1 día de duración.

Al multiplicar los eventos regionales por la media de los datos de cada estación, se obtienen los eventos para cada una de ellas. En la Figura 8, y en la Tabla 14 se muestran los resultados de la regionalización para la estación Las Adjuntas.

Tabla 14. Región 3. Resultados de la regionalización en la Estación las Adjuntas.

Días	Gasto medio en m^3/s	Gasto en m^3/s para diferentes períodos de retorno			
		50	500	2000	10000
1	3285.06	7194.2	9888.04	11497.7	13403.06
2	3211.103	7417.6	10307.6	12073.7	14096.7
3	3117.35	7263.4	10131.4	11845.9	13872.1
4	3012.85	7050.1	9882.1	11569.3	13527.6
5	2903.56	6852.4	9610.7	11265.8	13182.1
6	2794.26	6650.3	9332.8	10925.5	12797.7
7	2690.23	6348.9	8904.6	10438.1	12240.5
8	2590.67	6191.7	8704.6	10207.2	11968.9
9	2501.91	5979.5	8406.4	9882.5	11558.8
10	2421.7	5836.3	8209.6	9614.2	11260.9
11	2349.9	5686.9	8013.3	9399.8	11021.3
12	2285.8	5554.5	7817.4	9166.1	10743.3
13	2227.3	5434.6	7639.6	8976.0	10535.1
14	2171.5	5298.6	7470.2	8773.2	10271.6
15	2119.2	5170.9	7290.1	8561.7	10045.1

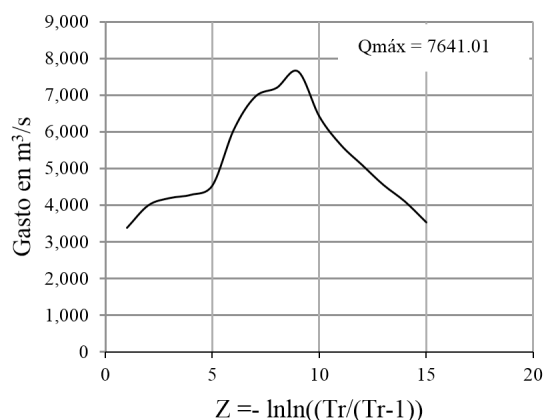


Figura 7. Avenida de diseño de la estación las Adjuntas para un T de 50 años.

Avenida de diseño en m^3/s

Conforme al método de bloques alternos descrito anteriormente, se pueden generar las avenidas de diseño. En la Tabla 15, se presenta el cálculo de la avenida de diseño para un T de 50 años de la estación Las Adjuntas y, en la Figura 9, el hidrograma correspondiente.

Tabla 15. Región 3. Cálculo de la avenida de diseño para un T de 50 años.

Las Ad- jun- tas	Gasto en m³/s				
No.	Q Medio	nQ medio n	SQ individual	Q individual	Avenida diseño
1	7194.29	7194.29	0	7194.29	3382.57
2	7417.65	14835.3	7194.29	7641.01	3995.71
3	7263.42	21790.2	14835.30	6954.95	4192.82
4	7050.07	28200.2	21790.25	6410.01	4282.53
5	6852.39	34261.9	28200.26	6061.70	4540.52
6	6650.34	39902.0	34261.96	5640.08	6061.70
7	6348.94	44442.5	39902.04	4540.52	6954.95
8	6191.70	49533.6	44442.56	5091.07	7194.29
9	5979.57	53816.1	49533.63	4282.53	7641.01
10	5836.33	58363.2	53816.16	4547.10	6410.01
11	5686.92	62556.0	58363.26	4192.8	5640.08
12	5554.53	66654.4	62556.09	4098.33	5091.07
13	5434.62	70650.1	66654.41	3995.71	4547.10
14	5298.67	74181.4	70650.12	3531.31	4098.33
15	5170.93	77564.0	74181.43	3382.57	3531.31

Análisis comparativo

Con base en el análisis anterior, se hicieron las comparaciones de las avenidas original y regional, las cuales se presentan en la Tabla 16 para la estación Las Adjuntas y en la Figura 10, el comparativo para un T de 50 años.

Tabla 16. Región 3. Comparación de avenidas original y regional para la estación Las Adjuntas para un T de 50 años.

Días	Avenida de diseño original	Avenida de diseño regional
1	3637.00	3382.57
2	3790.73	3995.71
3	3899.07	4192.82
4	4278.99	4282.53
5	4960.28	4540.52
6	5846.52	6061.70
7	6581.70	6954.95
8	7097.43	7194.29
9	6930.87	7641.01
10	6296.48	6410.01
11	5506.54	5640.08
12	4623.70	5091.07
13	4161.29	4547.10
14	3974.41	4098.33
15	3142.59	3531.31

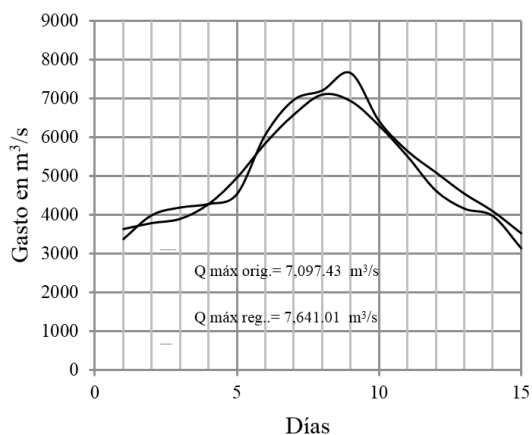


Figura 10. Región 3. Comparación de resultados para un T de 50 años para la estación Las Adjuntas.

Una vez obtenidos los hidrogramas para ambos casos (registros original y regional), se calculó la diferencia entre las áreas bajo las curvas. Dicha área representa la diferencia entre los volúmenes escurridos. En la figuras 11, 12, 13, 14

y 15, se muestran las diferencias de volúmenes para la estación Las Adjuntas para períodos de retorno de 50, 100, 1,000, 5,000 y 10,000 años. Las comparaciones para el resto de las estaciones y períodos de retorno se muestran en las figuras 19 a 63.

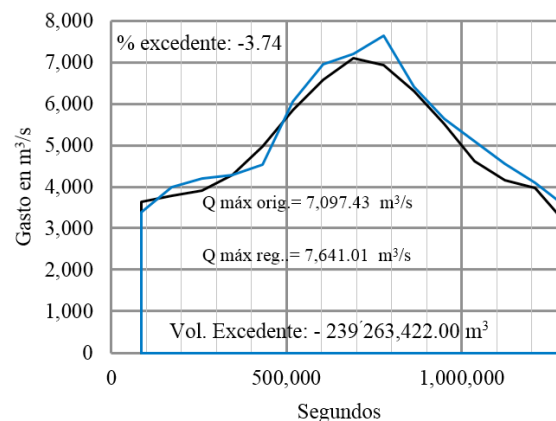


Figura 11. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años para la estación Las Adjuntas.

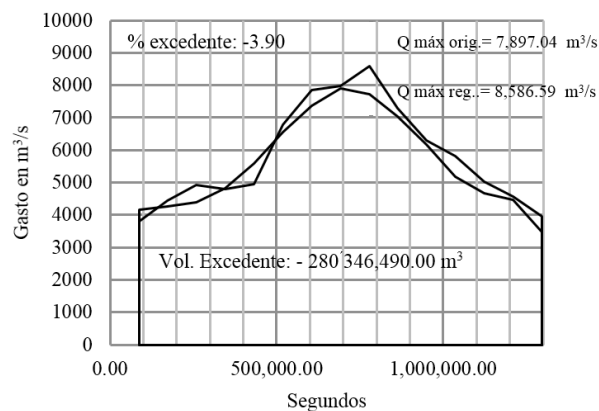


Figura 12. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años para la estación Las Adjuntas.

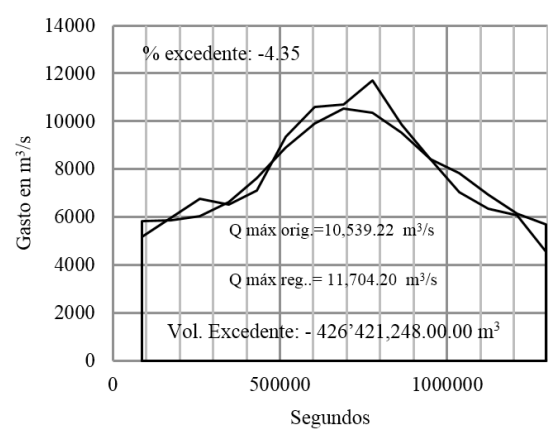


Figura 13. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un Tr = 1000 años para la Estación Las Adjuntas.

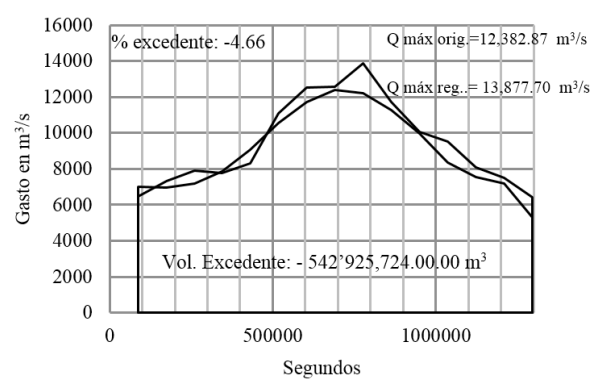


Figura 14. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años para la Estación Las Adjuntas.

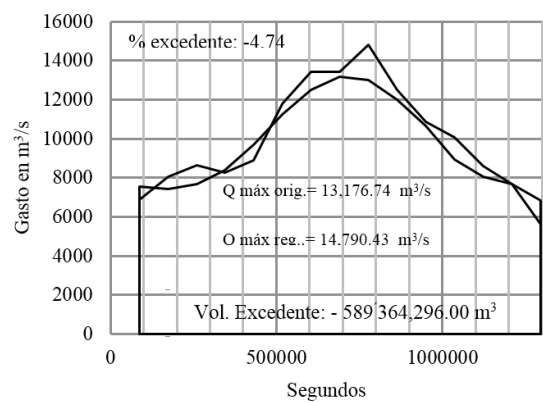


Figura 15. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T =10,000 años para la Estación Las Adjuntas.

Con la finalidad de hacer una comparación entre el porcentaje que representan dichas diferencias, se divide la diferencia entre los volúmenes, esto es, entre el volumen excedente y el volumen obtenido del registro regional:

$$\% \text{ excedente} = (\text{Vol}_{\text{excedente}} / \text{Vol}_{\text{regional}}) \times 100.$$

Para el caso de la estación Las Adjuntas se obtiene:

$$\% \text{ excedente} = (-239,263,422 / 6402,849,774) \times 100 = -3.74\%$$

La Tabla 17 muestra los volúmenes excedentes correspondientes a la estación Las Adjuntas para diferentes periodos de retorno.

Tabla 17.Volúmenes excedentes en la estación Las Adjuntas.

Las Adjuntas T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	6163'586,352.00	6402'849,774.00	-239,263,422.00	-3.74
100	6909'738,912.00	7190'085,402.00	-280,346,490.00	-3.90
1000	9375'274,368.00	9801'695,616.00	-426,421,248.00	-4.35
5000	11,095'653,024.0	116,438'578,748.0	-542,925,724.00	-4.66
10,000	11,136'450,080.0	12,425'814,376.0	-589,364,296.00	-4.74

Los resultados que se presentan en la Tabla 17 se cotejan al comparar los ajustes de las muestras original y regional. Estas diferencias se ilustran en las figuras 16, 17 y 18 en donde se muestran los comportamientos de los ajustes para las duraciones de escurrimientos de 1, 8 y 15 días respectivamente, de la estación Las Adjuntas. En las gráficas se presentan, además, los valores de los gastos máximos anuales.

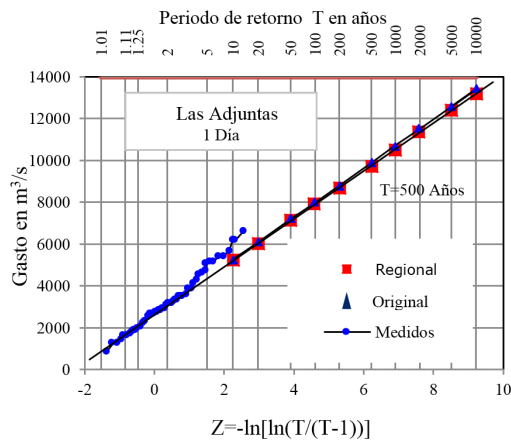


Figura 16. . Comparativo entre ajustes.

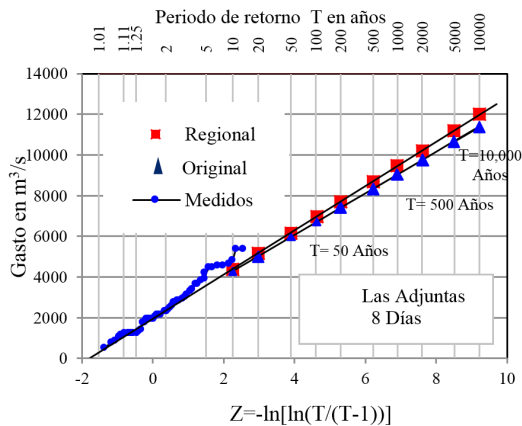


Figura 17. Comparativo entre ajustes para 8 días en la estación Las Adjuntas.

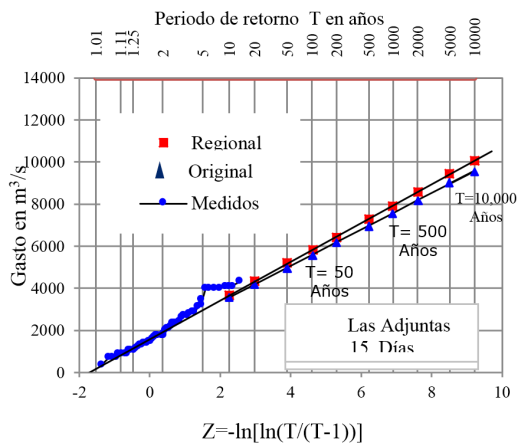
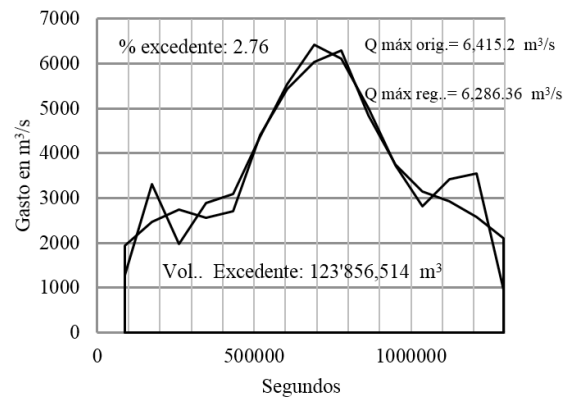
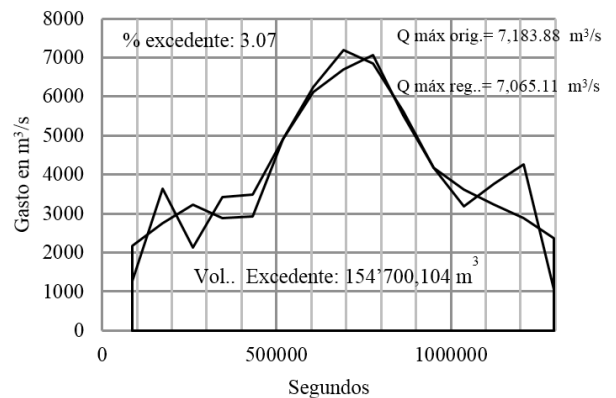


Figura 18. Comparativo entre ajustes para 15 días en la estación Las Adjuntas.

Siguiendo el mismo procedimiento se determinaron los volúmenes y sus gráficos para las estaciones en estudio. En las figuras 17, 18, 19, 20 y 21, se muestran las comparaciones de volúmenes de escurrimiento para la estación El Olivo y en las 22, 23, 24, 25 y 26 las de la estación Choy para diferentes períodos de retorno para la Región 3 y en las tablas 18 y 19, se presentan los volúmenes excedentes.


 Figura 19. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 50$ años de la estación El Olivo.

 Figura 20. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 100$ años de la estación El Olivo.

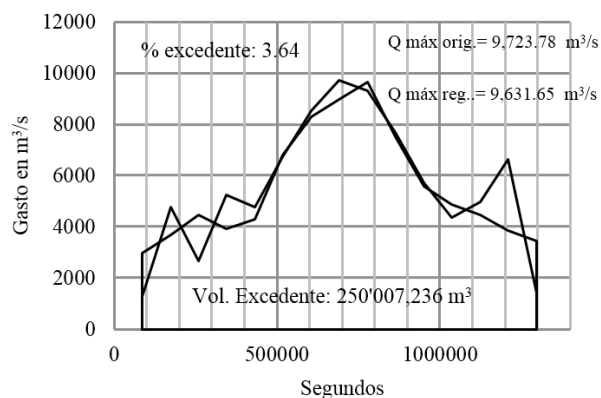


Figura 21. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación El Olivo.

Tabla 18. Volúmenes excedentes en la estación El Olivo

El Olivo T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	4,609'433,520.00	4,485'577,006.00	123'856,514.00	2.76
100	5,191'782,480.00	5,037'082,376.00	154'700,104.00	3.07
1000	7,116'607,296.00	6,866'600,060.00	250'007,236.00	3.64
5000	8,458'748,352.00	8,153'445,923.00	305'302,429.00	3.74
10,000	9,036'919,008.00	8,704'951,292.00	331'967,716.00	3.81

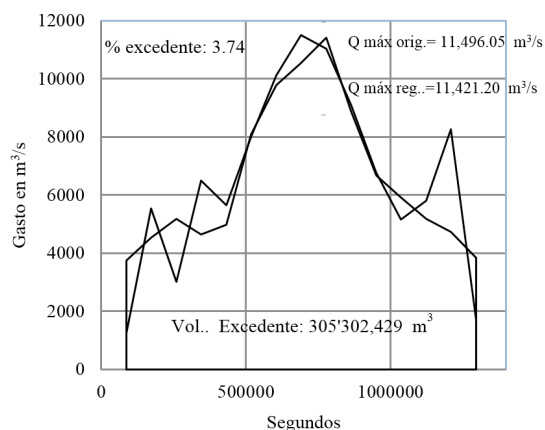


Figura 22. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación El Olivo

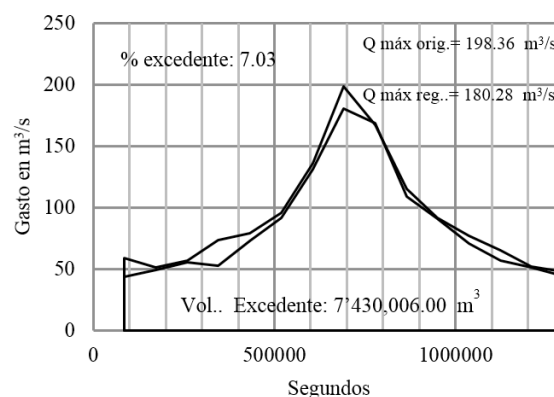


Figura 24. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Choy.

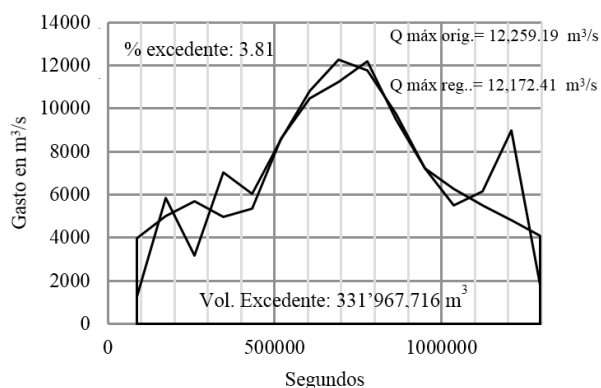


Figura 23. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación El Olivo.

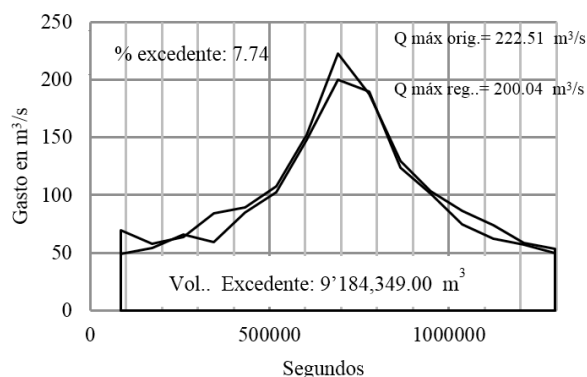


Figura 25. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Choy.

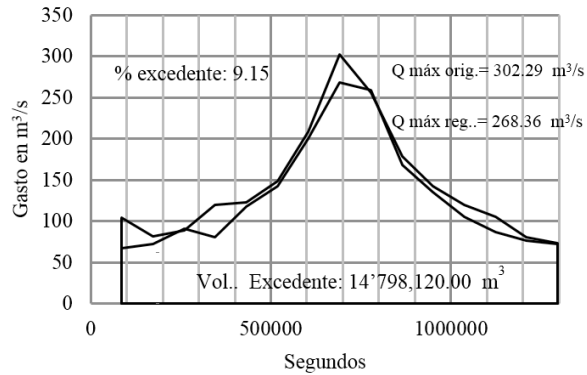


Figura 26. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Choy.

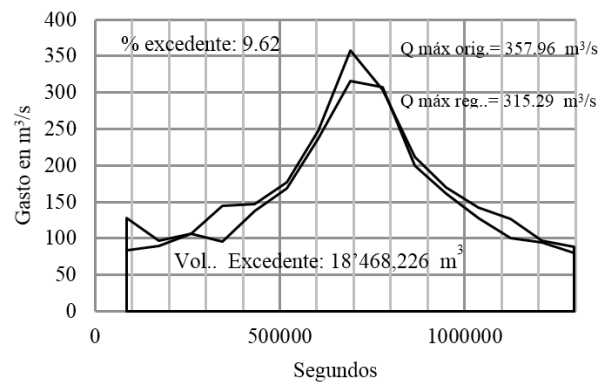


Figura 27. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Choy.

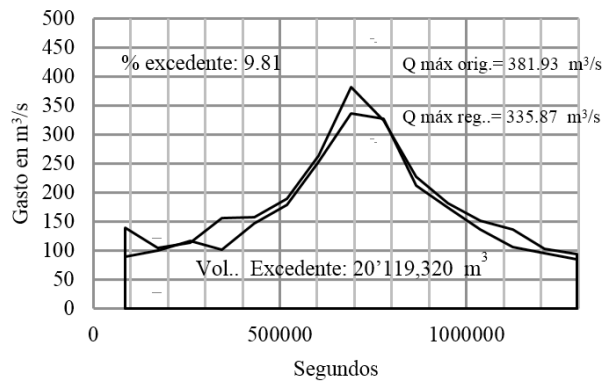


Figura 28. Región 3. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Choy.

Tabla 19. Volúmenes excedentes en la estación Choy

Choy T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	1130'94,576.00	105'664,569.70	7'430,006.00	7.03
100	127'840,464.00	118'656,115.1	9'184,349	7.74
1000	176'550,624.00	161'752,504.00	14'798,120.00	9.15
5000	210'534,336.00	192'066,110.00	18'468,226.00	9.62
10,000	225'176,976.00	205'057,655.60	20'119,320.00	9.81

Siguiendo el mismo procedimiento se determinaron los hidrogramas para las avenidas de diseño de las regiones 1 y 2 de las tablas 7 y 8, con sus volúmenes excedentes.

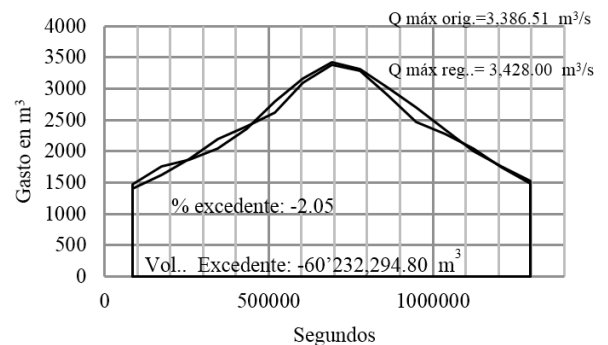


Figura 29. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Tamuín.

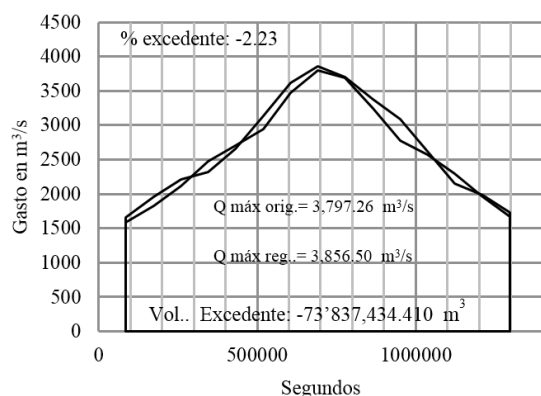


Figura 30. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Tamuín.

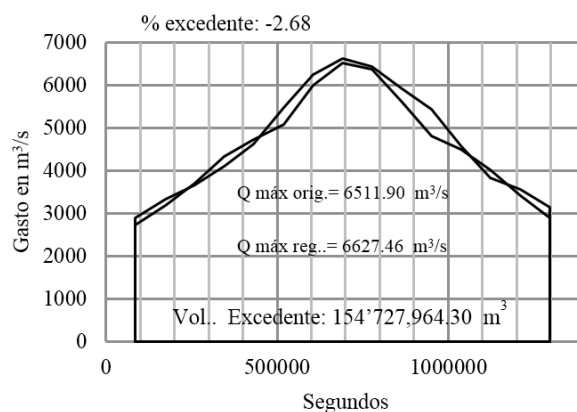


Figura 33. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Tamuín.

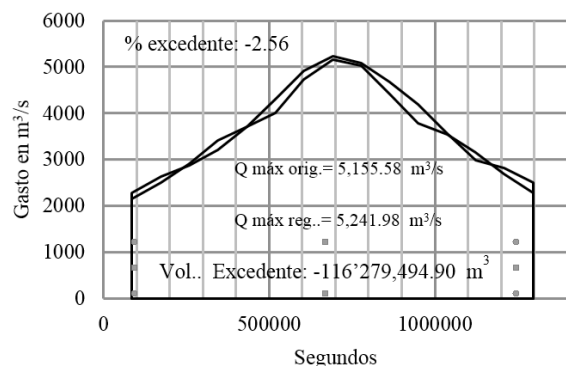


Figura 31. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Tamuín.

Tabla 20. Volúmenes excedentes en la estación Tamuín

Tamin T (años)	Volumen en m³			%
	Original	Regional	Excedente	
50	2,881'175,616.0	2,941'407,911.00	-60'232,294.80	-2.05
100	3,241'082,592.0	3,314'920,026.0	-73'837,434.41	-2.23
1000	4,430'321,136.0	4,546'600,631.0	-116'279,494.90	-2.56
5000	5,260'141,296.0	5,410'347,398.0	-150'206,102.3	-2.78
10,000	5,617'459,296.0	5772'187,260.0	-154'727,964.3	-2.68

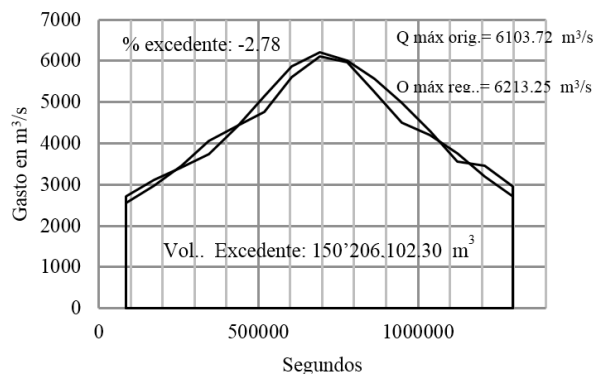


Figura 32. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Tamuín.

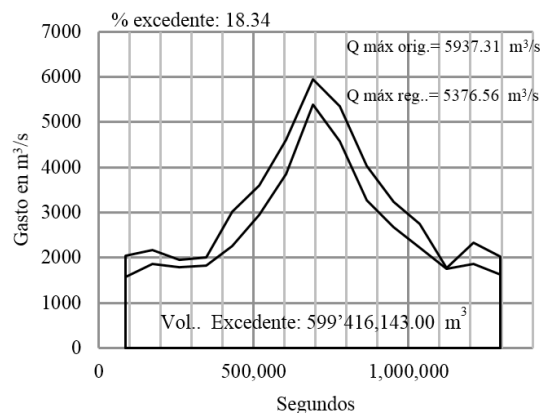


Figura 34. Región 2. San Vicente. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación San Vicente.

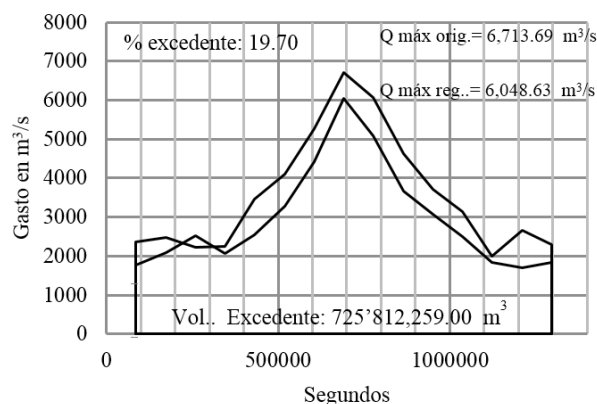


Figura 35. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación San Vicente.

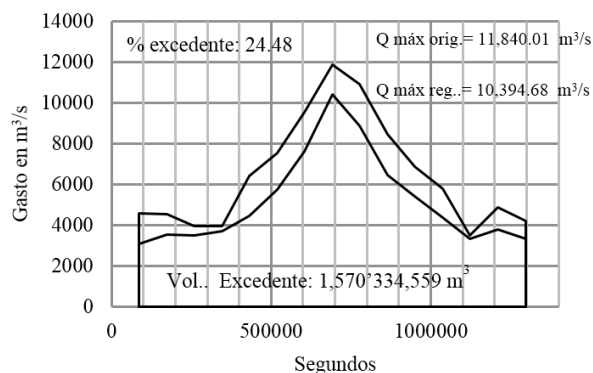


Figura 38. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación San Vicente.

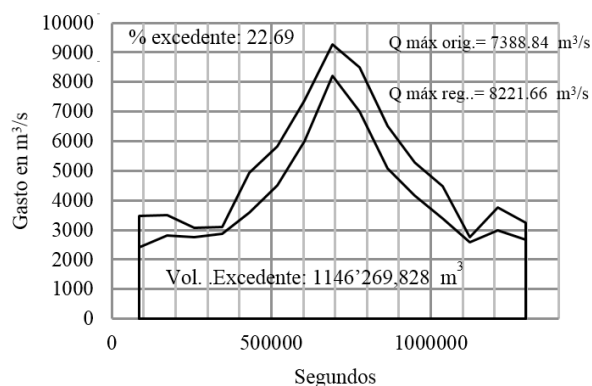


Figura 36. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación San Vicente.

Tabla 21. Volúmenes excedentes en la estación San Vicente

San Vicente T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	3,868'426,512	3,269'010,369	599'416,143	18.34
100	4,409'935,056	3,684'122,797	725'812,259	19.70
1000	6,199'240,176	5,052'970,348	1,146'269,828	22.69
5000	7,447'772,880	6,012'917,837	1,434'855,043	23.86
10,000	7,985'392,560	6,415'058,001	1,570'334,559	24.48

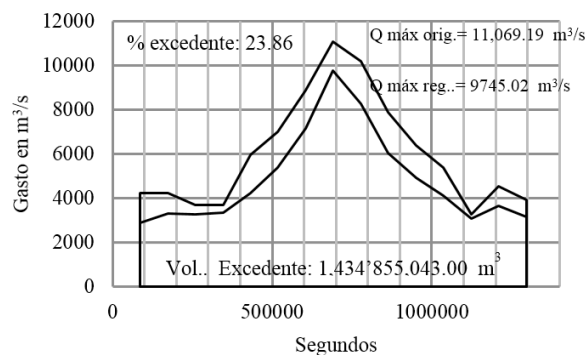


Figura 37. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación San Vicente.

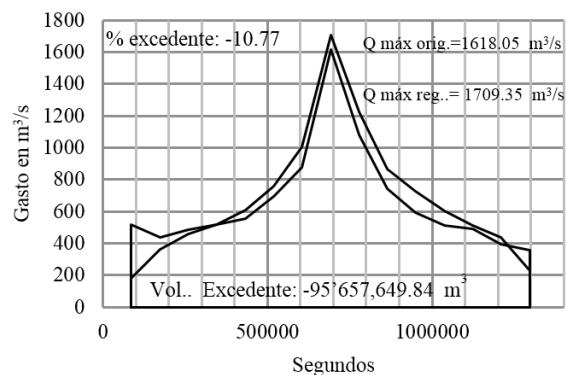


Figura 39. Región 2. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Requetemu.

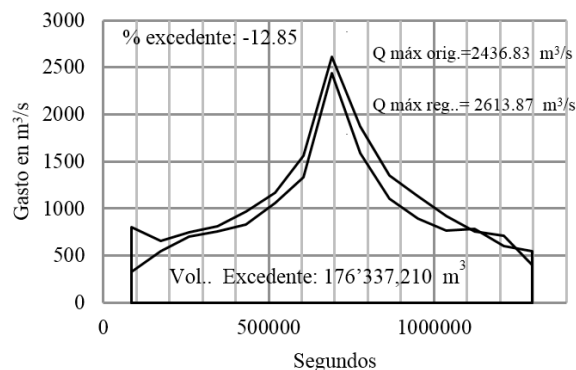
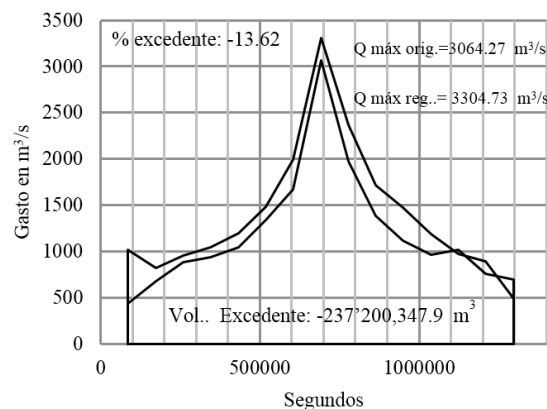
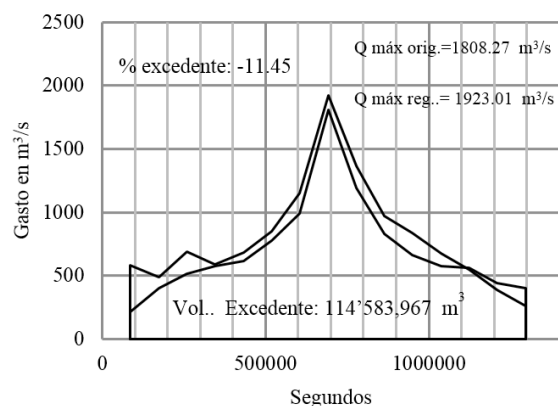
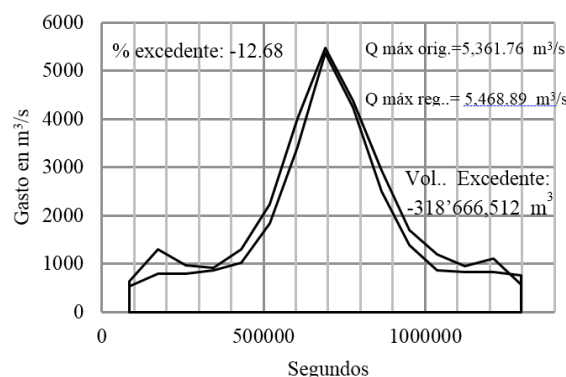
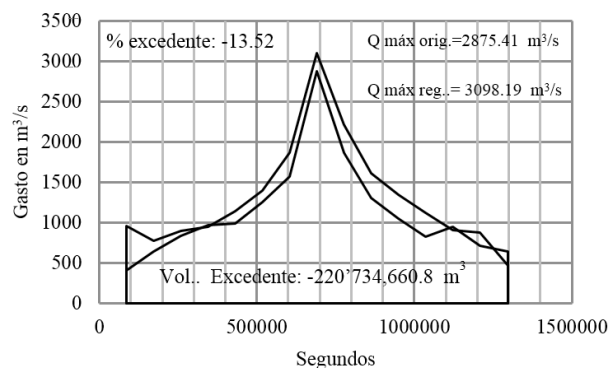


Tabla 22. Volúmenes excedentes en la estación Requetemu

Requetemu T (años)	Volumen en m³			%
	Original	Regional	Excedente	
50	792'117,792	887'775,441.8	-95'657,649.84	-10.77
100	885'924,864	1,000'508,831	-114'583,967.3	-11.45
1000	1,195'903,872	1,372'241,082	-176'337,209.8	-12.85
5000	1,412'202,384	1,632'937,045	-220'734,660.8	-13.52
10,000	1,504'947,168	1,742'147,516	-237'200,347.9	-13.62



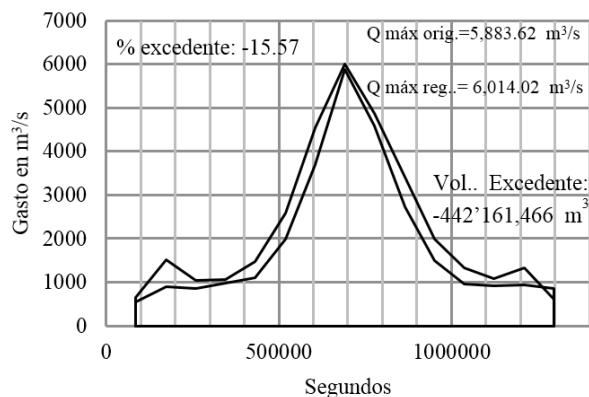


Figura 45. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Tempopal.

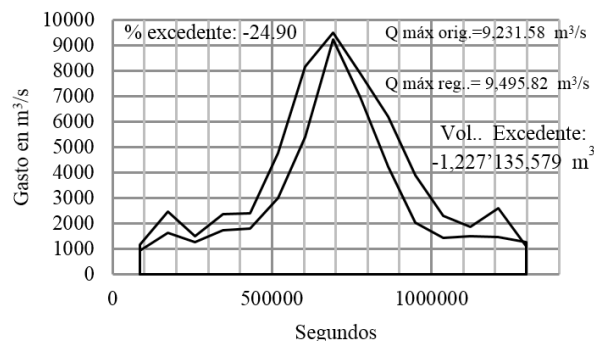


Figura 48. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Tempopal.

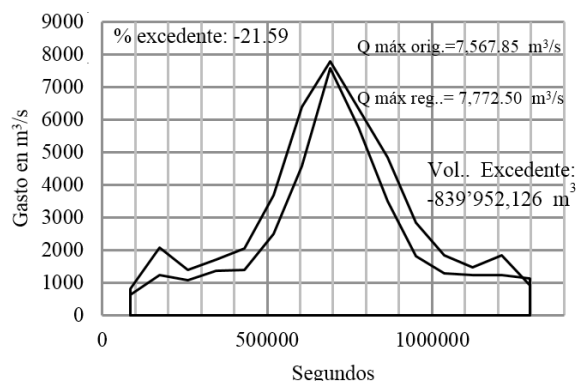


Figura 46. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Tempopal.

Tabla 23. Volúmenes excedentes en la estación Tempopal

Tempopal T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	2,195'401,968	2,514'068,480	-318,665,512	-12.68
100	2,396'923,056	2839'084,522	-442,161,466	-15.57
1000	3,049'906,176	3,889'858,302	-839,952,126	-21.59
5000	3,501'531,072	4,619'462,169	-1,117'931,097	-24.20
10,000	3,701'717,280	4,928'852,859	-1,227'135,579	-24.90

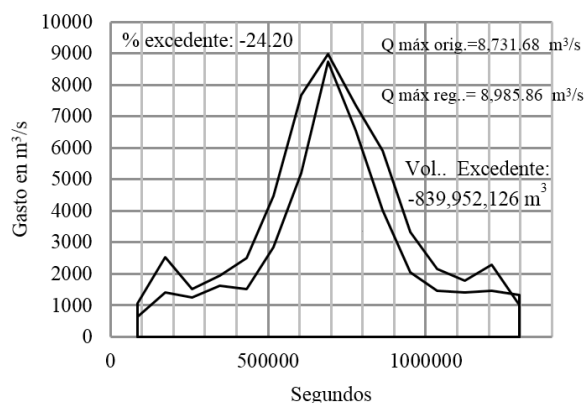


Figura 47. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Tempopal.

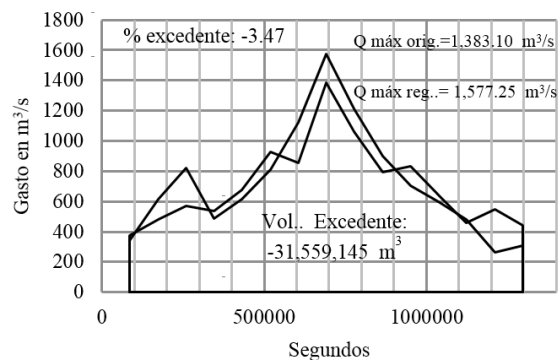


Figura 49. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Tierra Blanca.

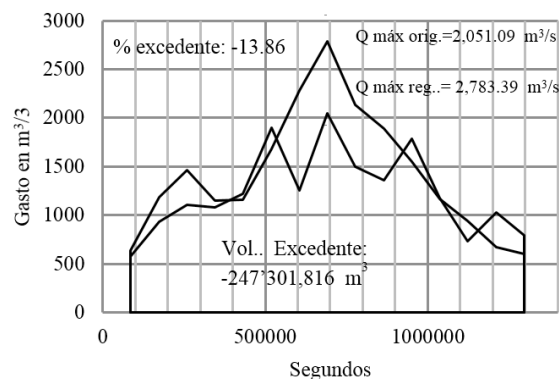
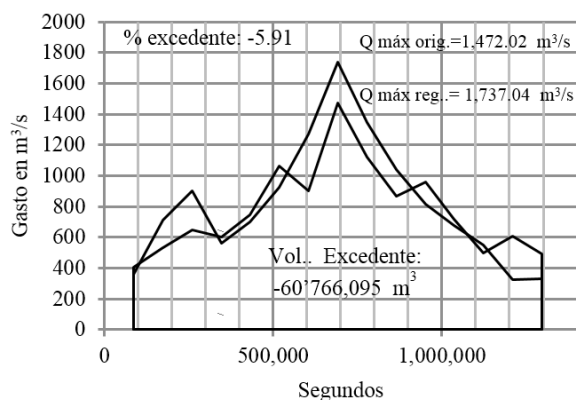


Figura 53. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $Tr = 10,000$ años en la estación Tierra Blanca.

Tabla 24. Volúmenes excedentes en la estación Tierra Blanca

Tierra Blanca T (años)	Volumen en m^3			%
	Original	Regional	Excedente	
50	2,195'401,968	2,514'068,480	-318,665,512	-12.68
100	2,396'923,056	2839'084,522	-442,161,466	-15.57
1000	3,049'906,176	3,889'858,302	-839,952,126	-21.59
5000	3,501'531,072	4,619'462,169	-1,117'931,097	-24.20
10,000	3,701'717,280	4,928'852,859	-1,227'135,579	-24.90

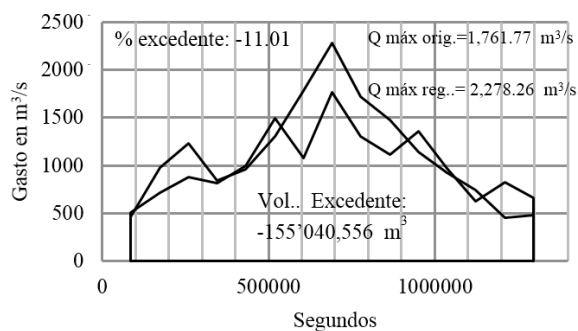


Figura 51. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 1000$ años en la estación Tierra Blanca.

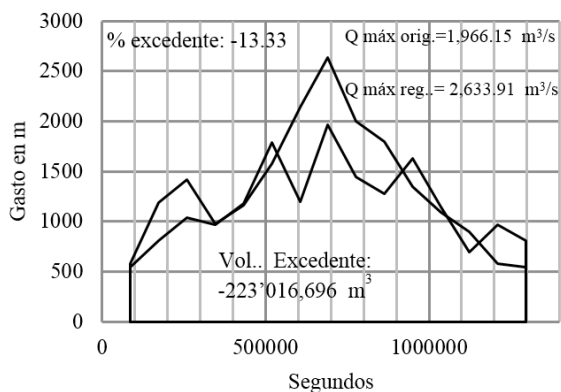


Figura 52. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 5000$ años en la estación Tierra Blanca.

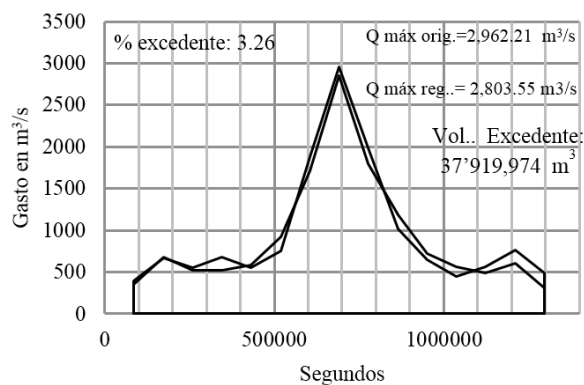


Figura 54. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un $T = 50$ años en la estación Temamatla.

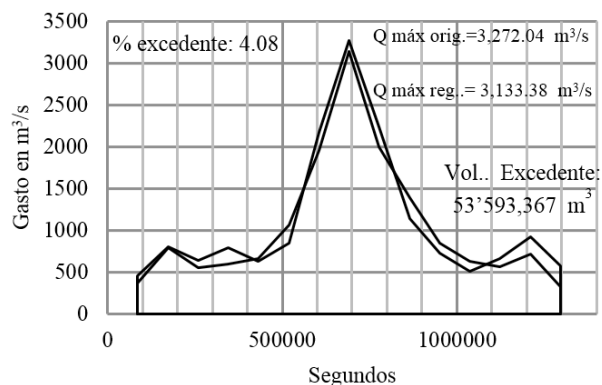


Figura 55. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Temamatla.

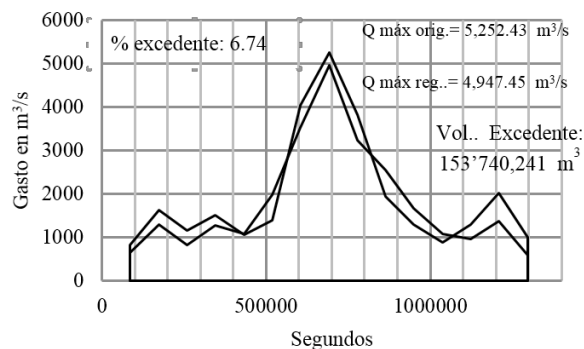


Figura 58. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Temamatla.

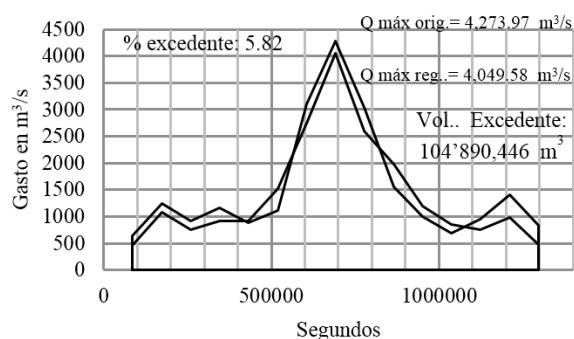


Figura 56. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Temamatla.

Tabla 25. Volúmenes excedentes en la estación Temamatla

Tema- matla T (años)	Volumen en m³			%
	Original	Regional	Excedente	
50	1,202'125,536	1,164'205,562	37'919,974	3.26
100	1,368'298,224	1,314'704,857	53'593,367	4.08
1000	1,906'180,560	1,801'290,114	104'890,446	5.82
5000	2,279'826,864	2,139'150,706	140'676,158	6.58
10,000	2,436'167,232	2,282'426,991	153'740,241	6.74

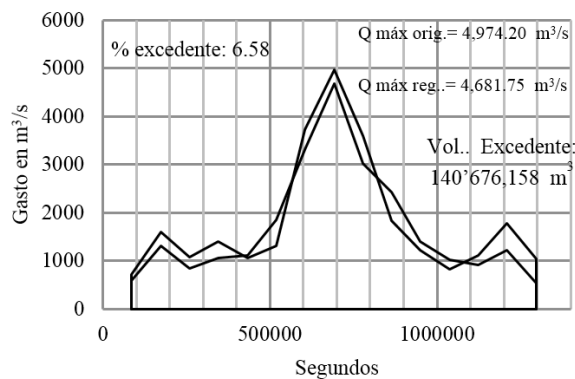


Figura 57. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Temamatla.

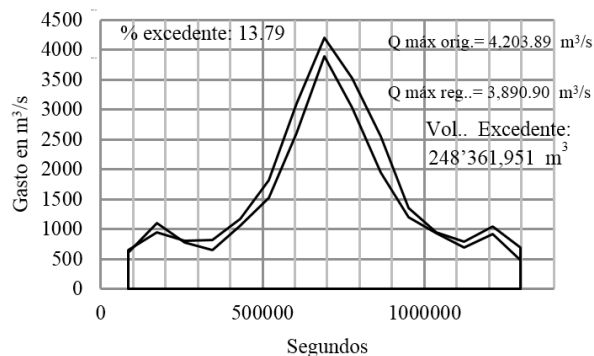


Figura 59. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 50 años en la estación Magiscatzin.

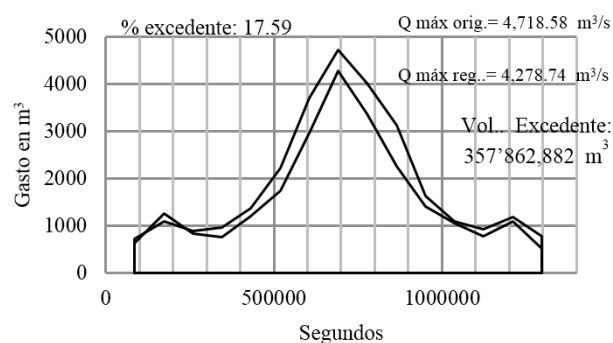


Figura 60. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 100 años en la estación Magiscatzin.

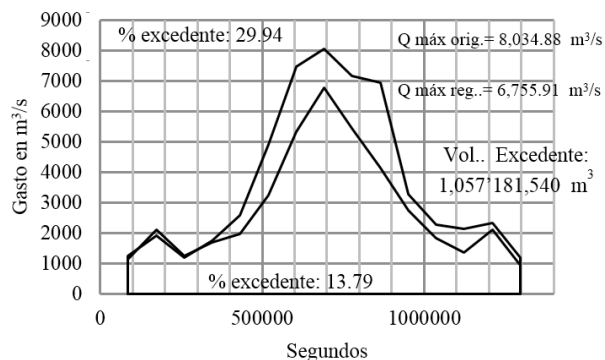


Figura 63. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 10,000 años en la estación Magiscatzin.

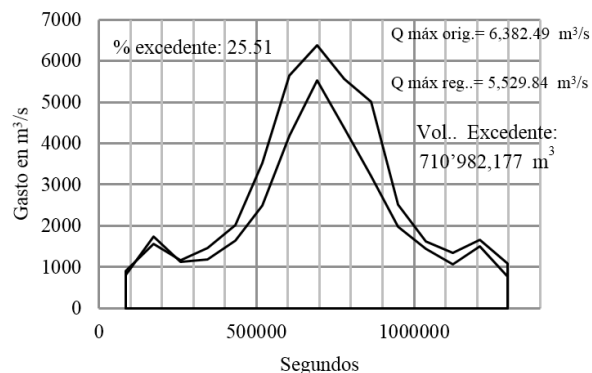


Figura 61. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 1000 años en la estación Magiscatzin.

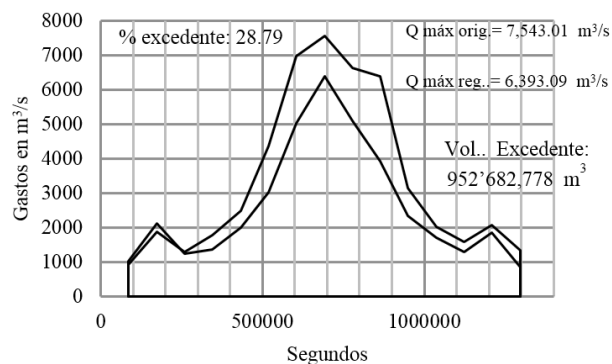


Figura 62. Región 1. Comparación de volúmenes de escurrimiento para un T = 5000 años en la estación Magiscatzin.

Tabla 25. Volúmenes excedentes en la estación Magiscatzin

Magiscatzin T (años)	Volumen en m³			% Exc
	Original	Regional	Excedente	
50	2,049'439,968	1,801'078,017	248'361,951	13.79
100	2,391'763,680	2,033'900,798	357'862,882	17.59
1000	3,497'649,552	2,786'667,375	710'982,177	25.51
5000	4,262'034,240	3,309'351,462	952'682,778	28.79
10,000	4,588'191,648	3,531'010,108	1,057'181,540	29.94

Discusión y conclusiones

De acuerdo con los anteriores resultados se puede ver que, con algunas excepciones, los valores obtenidos con las técnicas regionales son menores que los obtenidos con el registro original, además de conformarse un hidrograma menos inestable, lo que permite obtener un resultado más confiable para el análisis de avenidas en un río. En la mayoría de los casos, la falta de registros históricos de longitud más bien grande, conduce a resultados poco confiables, frecuentemente

excesivos. Por esa razón, aquí se comparan los eventos resultantes del procedimiento regional contra los obtenidos con la muestra original, es decir, analizando individualmente la muestra correspondiente a cada estación.

Una vez obtenidos los hidrogramas para ambos casos (registros original y regional), se obtiene la diferencia entre las áreas bajo las curvas. Dicha área representa la diferencia entre los volúmenes escurridos.

El análisis regional es recomendable en los casos en que no se dispone de información hidrométrica suficiente para llevar a cabo un estudio hidrológico para el diseño de avenidas, por lo que el generar más información con mayor confiabilidad, permite un diseño apropiado de los hidrogramas y de las obras hidráulicas para mitigación de daños.

Las técnicas de regionalización son herramientas útiles sobre todo en sitios en donde las mediciones son escasas, siendo posible establecer comparativos mediante herramientas estadísticas de sitios con similitud en sus características de escurrimiento, como el caso que se muestra en la Figura 2, en donde se puede determinar mediante los coeficientes de variación la similitud entre escurrimientos de cada estación hidrométrica para conformar regiones, según se muestra en las tablas 7,8 y 9.

En el caso de la cuenca del bajo Pánuco, la regionalización de avenidas ha permitido obtener avenidas de diseño más confiables, en esta cuenca en particular, cuyos registros pluviométricos cuentan con un buen número de datos en períodos de hasta 56 años de información, por lo que se tienen muestras regionales con un mayor número de información para la generación de avenidas al aplicar el procedimiento.

Es por lo anterior que estas técnicas son ampliamente recomendables en el diseño de avenidas, sobre todo porque en México frecuentemente se carece de información pluviométrica suficiente para hacer diseños apropiados y confiables.

Agradecimientos

A la Lic. Concepción E. Tamayo Rubio de la Asociación Mexicana de Hidráulica del Sur de Tamaulipas, por su colaboración y comentarios en la elaboración de este trabajo.

A la Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, por haber proporcionado la información de las Estaciones Hidrométricas motivo de este estudio.

Al Dr. Luis A. Delgado Argote, Editor principal de la revista GEOS y a todo su equipo de trabajo por el tiempo dedicado en la revisión, comentarios y edición de este trabajo.

Al Dr. Jesús Gracia Sánchez, por su interés y tiempo dedicado en la revisión crítica en el arbitraje de este trabajo.

A todos ellos nuestro más sincero respeto, agradecimiento y admiración.

Referencias

- Comisión Nacional del Agua, 2013. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Subdirección General Técnica (SGT). Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR). Base de datos hidrométricos.
- Campos, A., 2014, Análisis regional de frecuencia de crecientes en la región hidrológica no. 10 (Sinaloa), México.1: índices de estacionalidad y regiones de influencia. Agrociencia, v.48: 255-270.

- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2001, Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-1999, México (www.cenapred.unam.mx).
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2001, Inundaciones, Serie de Fascículos (www.cenapred.unam.mx).
- Del Ángel González, M. y Domínguez Mora, R., 2014, Cuenca baja del río Pánuco- Estimación de avenidas de diseño. Método de regionalización. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Puerto Vallarta, Jalisco, México, 8 p.
- Domínguez Mora, R., Arganis, M.L., Capella, A., Luna, J.A., Fuentes, O.A., Carrizosa, E., Peña, F., Carabela J.L., y Reyes, H., 2014, Manual; de obras civiles de la Comisión Federal de Electricidad, Tema 1, Hidrología, Capítulo 6, Análisis Estadístico, 175 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística, 2005a, Veracruz de Ignacio de la Llave. Mapa de climas (www.inegi.org.mx).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística, 2005b, Veracruz de Ignacio de la Llave. Mapa de temperatura media anual (www.inegi.org.mx).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística, 2005c, Veracruz de Ignacio de la Llave. Mapa de precipitación promedio anual (www.inegi.org.mx).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía y Estadística, 2005d, Veracruz de Ignacio de la Llave. Mapa de agricultura y vegetación (www.inegi.org.mx).
- Mandujano, G.K.P., 2011, Bajo Pánuco, Avenidas de diseño. Tesis de Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Aprovechamientos Hidráulicos. Instituto de Ingeniería, UNAM, 279 p.
- Ramachandra, R. and Hamed, K.H., 2000, Flood frequency analysis. Boca Raton, FL, USA, CRC Press, 350 p.
- Viessman, W. Jr. and Lewis, G.L., 2003, Introduction to Hydrology, 5th Edition, Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall, 612 p.

Recibido: 11 de junio de 2015

Corregido por el autor: 9 de octubre de 2015

Aceptación: 22 octubre de 2015

Análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia

Cristóbal Condori Quispe^{1,2}, Jhon Leandro Pérez^{3,4}

¹Instituto Geofísico del Perú-Ciencias de la Tierra Sólida, IGP

²Posgrado, Instituto de Geociencias, Universidad de Brasília, UnB

³Grupo Georriesgos, Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano, OSSO

⁴Posgrado, División de Ciencias de la Tierra, Departamento de Sismología, CICESE

cristobal.condori@igp.gob.pe; jhonper@cicese.edu.mx

Resumen

Colombia es uno de los países de Suramérica con alta actividad sísmica, debida a la complejidad tectónica que se presenta por la interacción de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe y Suramérica. La principal actividad sísmica en el país está asociada al proceso de subducción de las placas Nazca y Suramérica, dando origen a sismos con focos superficiales, intermedios y profundos. Particularmente, cerca de la zona de subducción en el suroccidente de Colombia, se han presentado sismos destructivos de profundidad intermedia.

En el presente trabajo se realiza el análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en función de la profundidad para sismos de foco intermedio, con el objetivo de contribuir al estudio de la sismicidad de la región del Valle del Cauca, suroccidente de Colombia. Para este fin, se emplearon eventos que fueron extraídos del catálogo de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), con magnitud de completitud mayor a $2.3M_l$ para el periodo comprendido entre 1993 y 2013. Los resultados muestran que el valor de b oscila entre 0.6 y 1.3 con clara disminución en función de la profundidad. Esta variación se relaciona con los cambios de las propiedades físicas (por ejemplo, heterogeneidad y deformación interna) de la placa Nazca dentro de la región de estudio, a causa del incremento de los esfuerzos a medida que ésta subduce. Este proceso genera un aumento en la ocurrencia de sismos con magnitudes $M \geq 6.5M_l$, para los cuales se estimaron periodos de retorno local de 20 a 40 años.

Palabras clave: valor de b , placa Nazca, valle del Cauca.

Introducción

En Sismología, el valor de b es importante en el estudio de las regiones sísmicamente activas y puede reflejar las propiedades físicas de la tectónica en una región determinada (Warren y Latham, 1970; Wyss, 1973; Kossobokov y Keilis-Borok, 2000). El valor de b comúnmente se relaciona con el cambio de los niveles de esfuerzo, la heterogeneidad del material (Mogi, 1962; Scholz, 1968), la deformación, presión de poros, la temperatura, la edad de la placa y acoplamiento de la misma (Wiemer y Beniot, 1996; Gerstenberg

et al., 2001, Ávila-Barrientos, et al., 2015). Además, puede servir en el análisis de sismos precursores a partir de la identificación de asperezas en zonas de subducción y fallas geológicas (Wiemer y Wyss, 1997; Condori y Tavera, 2010).

Wiemer y Beniot (1996), Monterroso y Kulháněk (2003), Lin et al., (2008) y Enescu et al., (2009) a partir del análisis de la variación del valor de b en función de la profundidad en zonas de subducción, sugieren que el incremento de este valor se asocia

con la deshidratación de la placa y aumento sucesivo de la presión de poro en la parte superior de la litósfera descendente. Los valores bajos de b (anomalías) en la parte inferior de la placa estarán asociados con el alto gradiente térmico existente entre la litosfera y el manto. En general, la dependencia del valor de b con la profundidad puede reflejar el grado de heterogeneidad de los materiales y las condiciones de esfuerzos de la corteza (Mogi, 1962; Scholz, 1968).

En el presente trabajo se realiza el análisis de la variación espacio-temporal del valor de b en función de la profundidad para sismos de foco intermedio, con el objetivo de contribuir al estudio de la sismicidad de la región del Valle del Cauca, suroccidente de Colombia.

Zona de estudio y características sismotectónicas

Colombia forma parte de las regiones sísmicas más activas del mundo debido a que se encuentra ubicado dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, en donde se libera más del 80% de la energía sísmica a nivel mundial. El complejo esquema tectónico que se presenta en el país es consecuencia de la interacción de tres placas litosféricas: Nazca, Caribe, y Suramérica. La placa Nazca se desplaza con un movimiento relativo de entre 50 mm/año y 78 mm/año, la placa Caribe entre 10 y 22 mm/año y la placa Suramérica entre los 6 y 16 mm/año (Pennington, 1981; Kellogg *et al.*, 1989; Freymueller *et al.*, 1993; Kellogg y Vega, 1995; Gutscher *et al.*, 1999; Taboada *et al.*, 2000; Trenkamp *et al.*, 2002; Trenkamp *et al.*, 2004; Suter *et al.*, 2008) (Figura 1).

Los movimientos relativos de estas placas durante la era Cenozoica dieron origen al sistema orogénico de los Andes del Norte, que comprende una extensa zona de deformación continental limitada por el cratón sudamericano al oriente y por la convergencia de las placas de Nazca y Caribe, al occidente y al norte respectivamente (Figura 1). Los Andes del Norte se divide en el territorio colombiano en tres cordilleras: Cordillera Occidental, Cordillera Central y Cordillera Oriental; en todas estas formaciones existen distintas cadenas montañosas, separadas por valles y depresiones intramontañosas (Figura 1). Estas condiciones tectónicas han generado

diversos procesos de deformación en la corteza continental, actividad volcánica y sísmica en el país (Taboada *et al.*, 2000).

Varios autores (Pennington, 1981; Monsalve, 1998; Corredor, 2003; Collot *et al.*, 2004; Arcila y Dimaté, 2005; Pedraza, 2006), a partir del análisis integrado de la sismicidad, los mecanismos focales de los terremotos y la morfología de la fosa Colombiana, argumentan la existencia de al menos tres segmentos activos de la zona de subducción con características diferentes (Figura 2). Los datos más recientes los reportan Arcila y Dimaté (2005), quienes los describen como: a) Segmento Norte, que representa la subducción

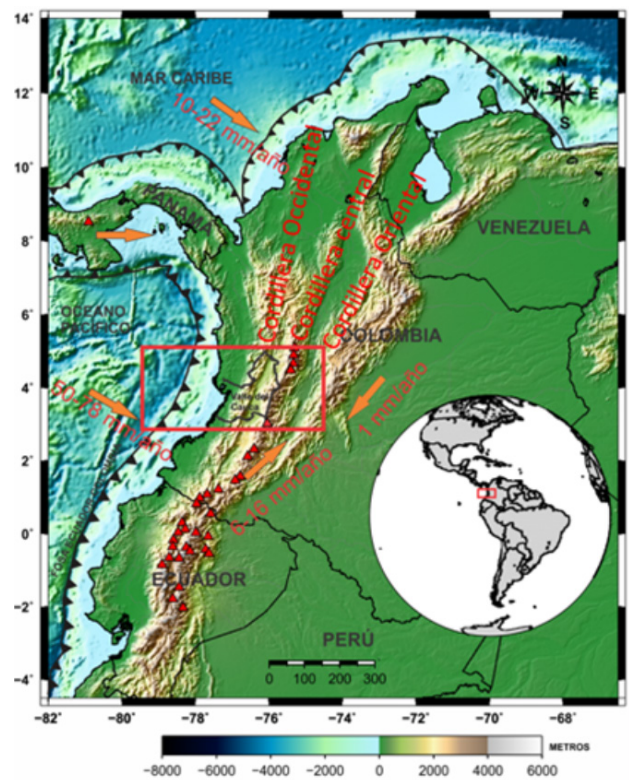


Figura 1. Movimiento relativo entre las placas tectónicas de Nazca, Suramérica y Caribe en la esquina noroccidental de América del Sur (los valores de movimiento relativo fueron tomados de Pennington, 1981; Kellogg *et al.*, 1989; Freymueller *et al.*, 1993; Kellogg y Vega, 1995; Gutscher *et al.*, 1999; Taboada *et al.*, 2000; Trenkamp *et al.*, 2002; Trenkamp *et al.*, 2004; Suter *et al.*, 2008). El polígono rojo corresponde al área de estudio y los triángulos rojos a los volcanes activos.

del bloque Coiba bajo el extremo noroeste de Colombia. Aquí la fosa tiene una longitud de 170 km. Este segmento está orientado a 130° de azimut. Su plano de Benioff buza a 25° hacia los 40° . La magnitud máxima calculada es de $7.8M_w$; b) Segmento Centro, con una longitud en la fosa de 160 km; se orienta hacia los 20° de azimut y su plano de Benioff definido bajo el Viejo Caldas buza a 40° hacia los 110° ; la magnitud máxima estimada también es de $7.8M_w$; y c) Segmento Sur, cuyo tramo de fosa está orientado a 40° de azimut y tiene una longitud de 550 km. El plano de Benioff buza 30° hacia los 130° y la magnitud máxima calculada es $8.8M_w$.

El Segmento Central y Sur, son los que afectan

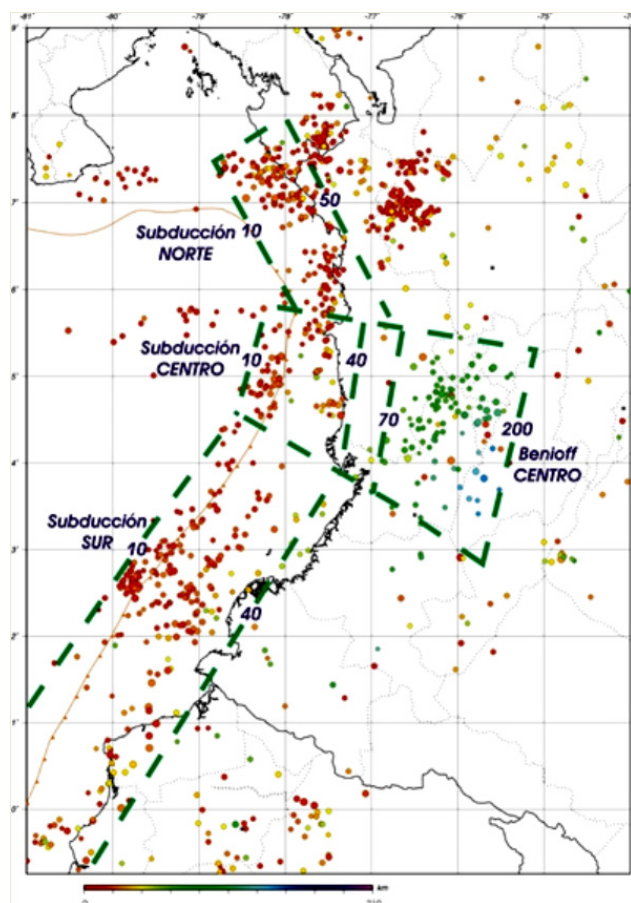


Figura 2. Segmentación de la zona de subducción de Colombia (Tomado de Arcila y Dimaté, 2005).

en gran medida el departamento del valle del Cauca y zonas aledañas. En esta región hay tres tipos de fuentes sismogénicas (INGEOMINAS, 2005): 1) la trinchera, 2) la zona de Benioff, y 3) las fallas intracontinentales; más específicamente se encuentran, por ejemplo, el sistema de fallas Romeral y el sistema de fallas Cauca (Figura 3). De los terremotos que se tiene conocimiento por causar importantes impactos en el occidente y centro del país (Figura 4), pueden destacarse los sismos corticales (fuente 1) tales como los siguientes: el sismo de junio 7 de 1925 de magnitud $6.8M_s$ con intensidad de VII-VIII en la Escala Macrosísmica Europea de 1998 (EMS-98, por sus siglas en inglés), en el valle del Cauca, donde la ciudad de Cali presentó severos daños; el sismo de noviembre 23 de 1979 en Risaralda con magnitud $7.2M_w$ e intensidad VII EMS-98, cuyos efectos fueron en la región del Chocó y valle del Cauca; el evento de febrero 8 de 1995 con magnitud $6.4M_w$ entre el valle del Cauca y Risaralda, presentándose daños en las edificaciones de ambas regiones; el sismo de enero 25 de 1999 con magnitud $6.2M_w$ en el Quindío, cuyos efectos fueron devastadores en la ciudad de Armenia (Salcedo y Pérez, 2016).

De los eventos relacionados con el proceso de

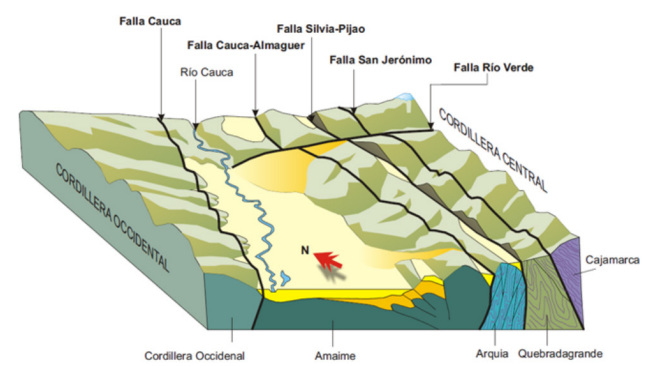


Figura 3. Esquema del sistema de fallas presentes en el área de estudio. Al occidente la falla Cauca, también conocida como el sistema de fallas Cauca-Patía. Al oriente del río Cauca, las fallas Cauca-Almaguer, Silvia-Pijao y San Jerónimo, que hacen parte del sistema de fallas Romeral (Tomado de López, 2006).

subducción (fuentes 1 y 2) se destacan, el sismo del 9 de julio de 1766 cuyos daños más importantes se observaron en las ciudades de Buga y Cali; el sismo de enero 31 de 1906 con magnitud $8.9M_w$ entre Colombia y Ecuador, que generó un tsunami cuyos efectos más graves fueron sobre la costa de los departamentos de Cauca y Nariño, dejando aproximadamente 1500 víctimas (Espinoza, 1992). A la ruptura generada por este evento se le asocian tres importantes sismos posteriores como el de mayo 22 de 1942 de magnitud $5.8M_s$, el de enero 19 de 1958 de $7.8M_w$ y el de diciembre 12 de 1979 de $8.1M_w$. También se destacan el terremoto de Julio 30 de 1962 con magnitud $6.9M_s$ en Caldas; el de diciembre 19 de 1991 de $7.2M_w$ relativamente cercano al de noviembre 15 de 2004, localizado en las costas de Bajo Baudó en el Chocó con una magnitud de $7.1M_w$. Ambos eventos generaron daños considerables en la infraestructura de la ciudad de Cali (capital del valle del Cauca). Otros eventos importantes recientemente

ocurridos son el de septiembre 30 de 2012 con magnitud $7.1M_w$ y epicentro cerca al municipio La Vega en el departamento del Cauca, el de febrero 9 de 2013 con magnitud $6.9M_w$ localizado cerca al municipio de Ospina (Cauca), y 13 de agosto del mismo año con magnitud $6.5M_w$, ubicado en Nuquí departamento del Chocó, sentido en todo el occidente del país y en la provincia del Darién cerca a Panamá (Salcedo y Pérez, 2016).

Datos

Los datos del catálogo sísmico de localizaciones y magnitudes, provienen de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), en el periodo comprendido entre los años 1993-2013. Se dispone de información de más de 1800 sismos con epicentros distribuidos a lo largo del valle del Cauca y zonas aledañas (Figura 5). Las profundidades de los eventos están entre 10 y 200 km, sin embargo, los datos fueron analizados y evaluados para el intervalo de profundidad de 50-150 km, es decir, la sismicidad de foco intermedio originados por el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, ya que, históricamente en este rango, se presentan los sismos de mayor impacto en la región

Metodología

Para el análisis, se aplicó a una base de datos sísmicos la relación frecuencia-magnitud (Gutenberg y Richter, 1944), que describe la distribución entre la frecuencia de ocurrencia y la magnitud de los mismos, de la siguiente manera:

$$\text{Log}N = a - bM \quad 1)$$

Donde N es el número acumulado de sismos con magnitud mayor o igual a M , a y b son parámetros constantes reales positivos, que caracterizan la actividad sísmica de una región en un periodo de observación determinado. El parámetro crítico de esta relación viene a ser el valor de b que define la pendiente de la recta de la distribución frecuencia-magnitud y físicamente se relaciona con los niveles de esfuerzos acumulados y liberados en una zona; este valor puede ser calculado con el ajuste lineal de mínimos cuadrados (Press et al., 1986) o a partir del método de máxima verosimilitud (Aki, 1965; Utsu, 1965).

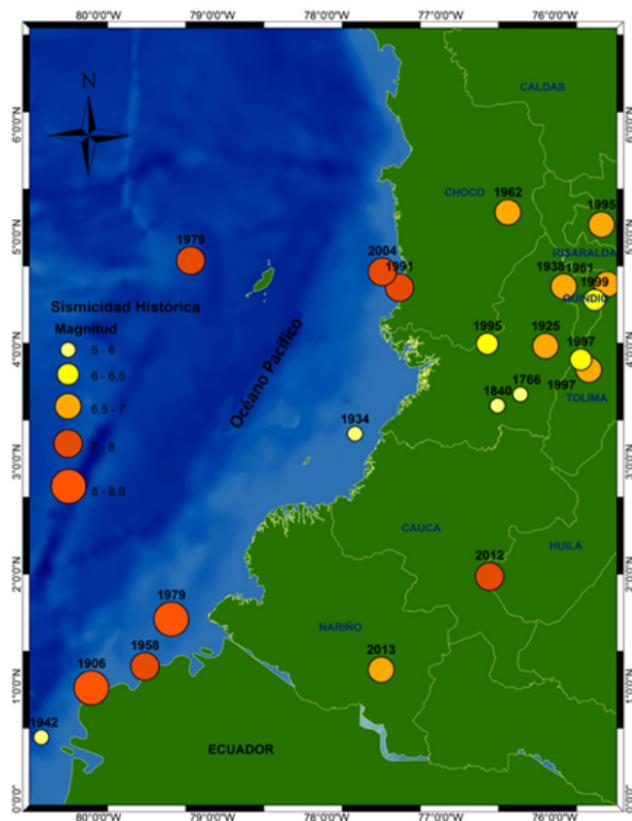


Figura 4. Localización de sismos históricos importantes con efectos en la región del valle del Cauca (Tomado de Salcedo y Pérez, 2016).

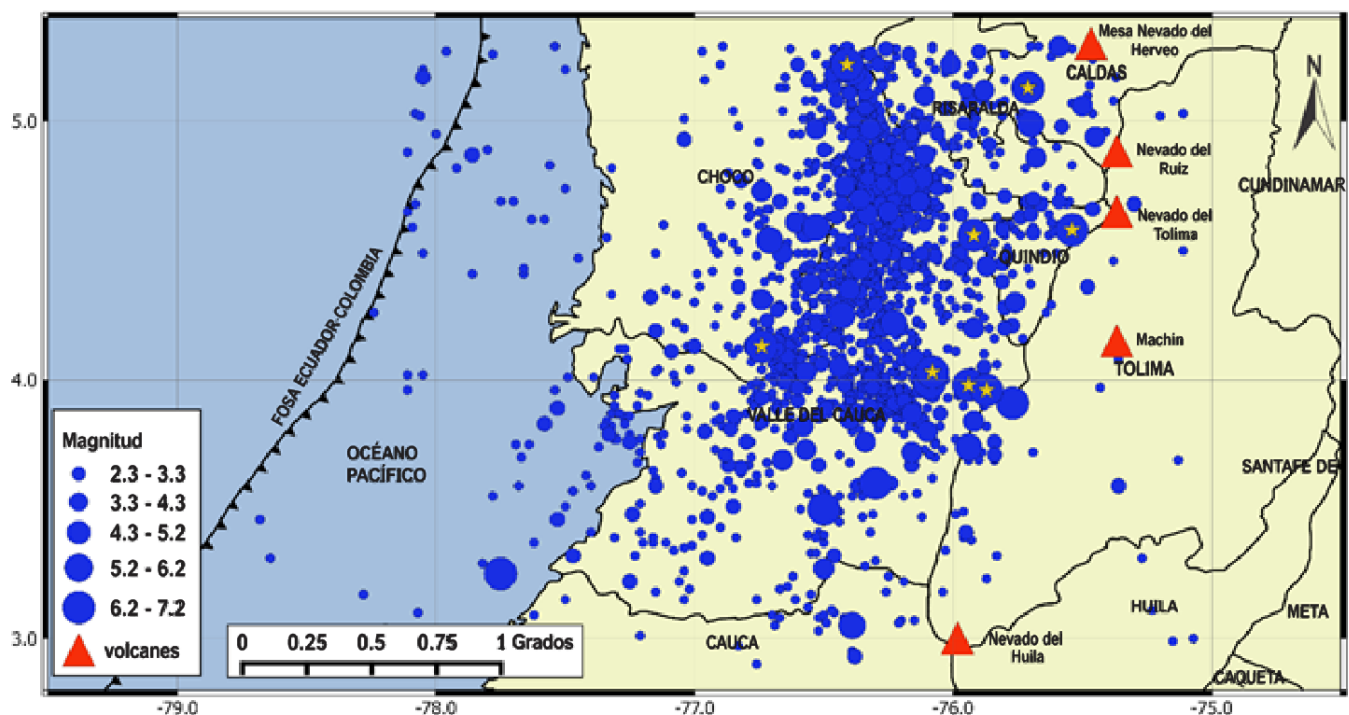


Figura 5. Distribución de la sismicidad con foco intermedio para el periodo 1993-2013. Las estrellas de color amarillo indican los principales sismos mayores a 6.5ML y los triángulos de color rojo corresponden a los volcanes activos.

En este trabajo se emplea el software ZMAP (Wiemer y Zuñiga, 1994; Malone y Wiemer, 2001) para el cálculo de los valores de a y b , y periodos de recurrencia. El método de máxima verosimilitud es el usado para estimar los valores de a y b , en tanto para el periodo de retorno local de sismos, se utiliza la siguiente relación (Wiemer y Wyss, 2002):

$$P_r(M) = T_L(M) = \frac{\Delta T}{10^{a-bM}} \quad 2)$$

donde ΔT es el periodo de datos considerado y la magnitud máxima del sismo es M , cuyo periodo de recurrencia se desea conocer. Tanto el método máxima verosimilitud como la relación de P_r , vienen incluidos como algoritmos en ZMAP.

La resolución de los valores de b depende de la homogeneidad del catálogo sísmico y de la magnitud de completitud (Wiemer y Wyss, 2000). En este sentido, siguiendo el procedimiento de Wiemer y Wyss (1997), para realizar un buen

análisis de los datos es importante tener en cuenta tres aspectos: 1) homogeneizar el catálogo, 2) fijar magnitud de completitud (M_c) y 3) eliminar réplicas. En este caso, los eventos considerados como réplicas fueron eliminados del catálogo utilizando el algoritmo de Reasenber (1985) que viene incluido también en ZMAP.

Para calcular los valores de a y b en el programa ZMAP se requiere de una serie de parámetros, tales como las dimensiones de una grilla (x , y) del área de estudio, la magnitud mínima de completitud del catálogo, la dimensión del radio para el trazado de círculos, etc. Estos parámetros básicamente dependerán de la densidad de datos con que se cuente y de las características sísmicas de la región de estudio, tales como longitudes de ruptura y áreas de ruptura de los eventos principales, fuentes sismogénicas y distribución espacial de la sismicidad.

El procedimiento a seguir se muestra en la Figura 6. Primero se cuenta con un mapa sísmico homogéneo y con una magnitud de completitud definida (Figura 6a). Seguidamente, se procede a crear un reticulado de celdas (6b), o mallas, bordeando toda la región de estudio (Figura 6c). A partir de cada nodo de las celdas se generan áreas de circunferencias con un radio de muestreo constante, el cual considera como origen el nodo de cada celda (Figura 6d). El espaciamiento de la malla, y el volumen circular dependerán principalmente del número de sismos contenidos en el área de estudio. Es por eso que los parámetros de entrada deben ser bien definidos, para reducir los errores en el cálculo del valor de b . Para este estudio se fijó espaciamientos de 0.02° de latitud y longitud, equivalente a 2 km de largo y ancho, y se consideraron volúmenes esféricos de 150 km de radio. La curva de distribución de la relación Gutenberg-Richter es calculada para cada volumen circular y a partir de esta curva, los valores a y b son estimados con el método de máxima verosimilitud. Finalmente, se genera un mapa o tomografía del valor de b en escala de colores a partir de una interpolación con el método kriging (Figura 6e).

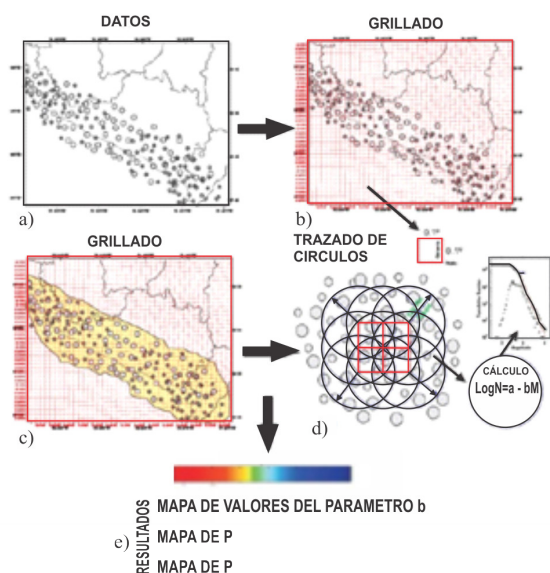


Figura 6. Esquema de la secuencia para el cálculo del valor de b . a) Mapa sísmico homogéneo; b) creación de la grilla; c) delimitación del área de estudio; d) radio de muestreo, e) resultados cuyos valores se muestran en escala de colores (Tomado de Condori, 2011).

Análisis y Resultados

Las profundidades de los eventos están entre 10 y 200 km, donde la sismicidad superficial se encuentra entre 10 y 50 km y es la de mayor frecuencia. Sin embargo, a profundidades mayores de 50 km, hay mayor distribución y concentración de la sismicidad (Figuras 7a y 7b).

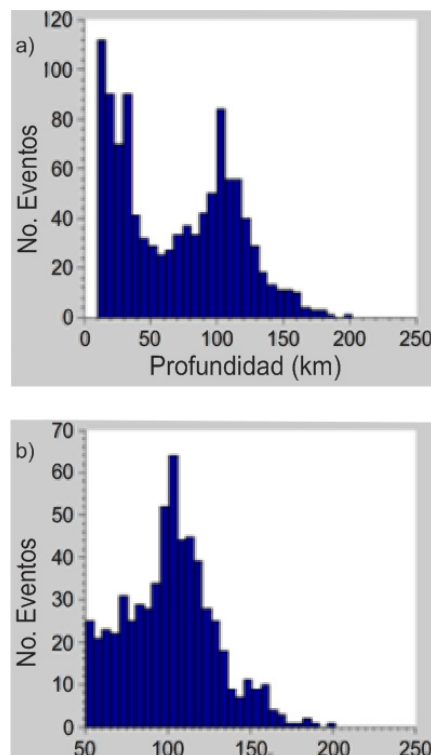


Figura 7. Histograma de frecuencia de sismos en función de la profundidad. a) Catálogo completo; b) sismicidad intermedia a profunda.

El número de eventos independientes acumulados para la región de estudio se muestra en la Figura 8. La pendiente es relativamente constante y la frecuencia es relativamente homogénea en el tiempo. Esto indica una buena calidad de los datos contenidos en el catálogo sísmico utilizado. La Figura 9 muestra el gráfico de número acumulativo de sismos contra. magnitud de la relación Gutenberg-Richter, determinándose el valor de b $b=0.763\pm0.02$ con una magnitud mínima de completitud (M_c) de $2.3M_l$ y una magnitud máxima probable mayor de $6.5M_l$, para toda la base de datos

utilizada en este estudio. Los valores de b varían espacialmente entre 0.6 a 1.3 para la región (ver Figura 10 y Anexo 1).

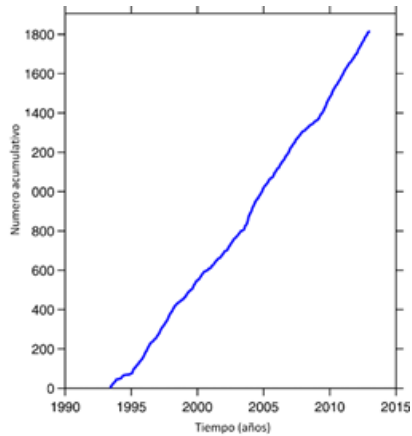


Figura 8. Distribución acumulativa de eventos sísmicos contenidos en el catálogo.

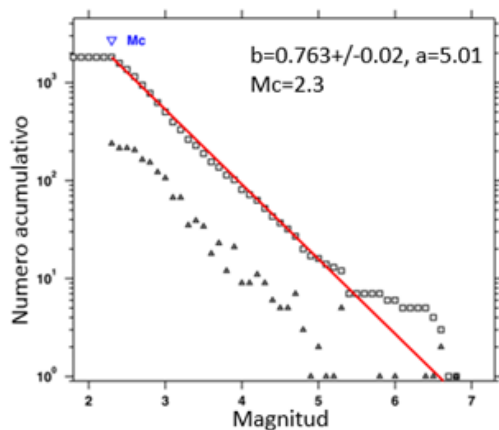


Figura 9. Distribución de la relación frecuencia-magnitud.

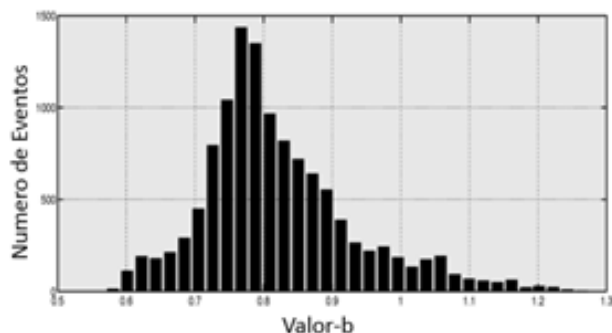


Figura 10. Histograma de los valores del valor de b observados en cada nodo de la malla para toda el área de estudio.

Esta variación es similar a otras zonas de subducción en el mundo, como la encontrada en México, donde los valores de b están en el rango de 0.5-1.5 (Zuñiga y Wiss, 2001); la encontrada en Centroamérica con valores correspondientes de 0.6-1.6 (Monterroso y Kulhánek, 2003); y similarmente en Perú con valores correspondientes de 0.5-1.2 (Heras y Tavera, 2002; Condori y Tavera, 2010). La distribución espacial de b ha permitido caracterizar y localizar geográficamente la presencia de áreas con alta concentración de energía elástica que podría estar asociada a la deformación interna de la placa de Nazca dentro del proceso de subducción (áreas de color rojo, Figura 11a). Estas áreas representarían posibles fuentes de futuros sismos a ocurrir con magnitudes superiores a 6.5MI.

De acuerdo con la Figura 11a las áreas significativamente anómalas con valores bajos del parámetro b se ubican en el borde o margen oriental de la región del valle del Cauca, cubriendo los departamentos de Tolima, Quindío y Risaralda. Hacia el lado oeste del valle del Cauca se observan pequeños segmentos con valores bajos de b en el departamento de Chocó. Asimismo, se observa que los epicentros de los principales sismos de magnitud $M \geq 6.5$ MI se encuentran ubicados dentro de las regiones denominadas anómalas o áreas con valores bajos de b , donde hay mayor nivel de acumulación de esfuerzos y deformación, y la probabilidad de ocurrencia de sismos de gran magnitud. La Figura 11b muestra el mapa de periodos de retorno local para sismos con magnitud $M \geq 6.5$ MI, que presentan periodos de retorno de 20 a 40 años para la región del valle de Cauca.

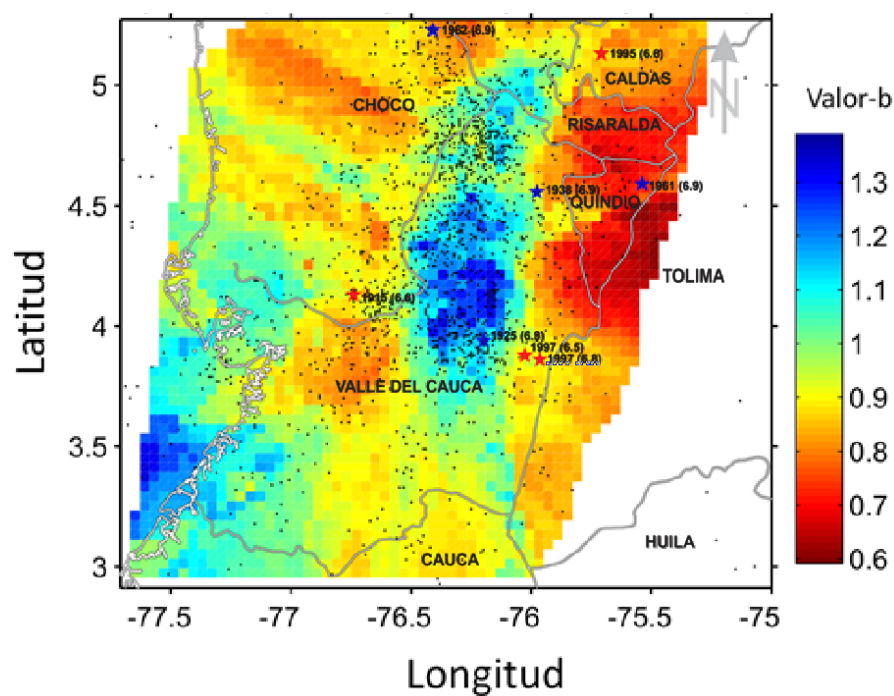


Figura 11a. Mapa de distribución espacial de los valores del valor de b para sismos con foco intermedio en la región del valle del Cauca. Los puntos negros corresponden a eventos sísmicos.

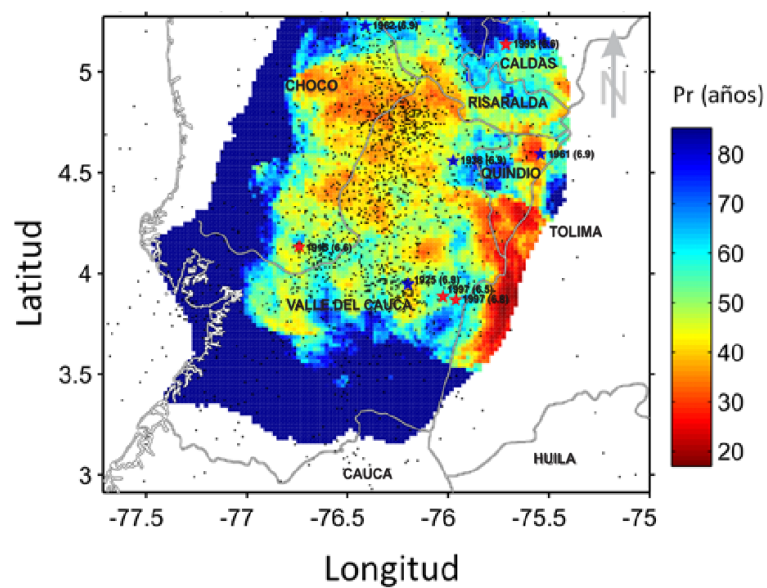


Figura 11b. Mapa de periodos de retorno local para sismos con $M \geq 6.5$ MI.

Para analizar la distribución del valor de b en función de la profundidad (enfoque unidimensional), se realizaron dos perfiles

sísmicos AA' y BB' orientados en dirección NO-SE como se muestra en la Figura 12 (ver Anexo 2).

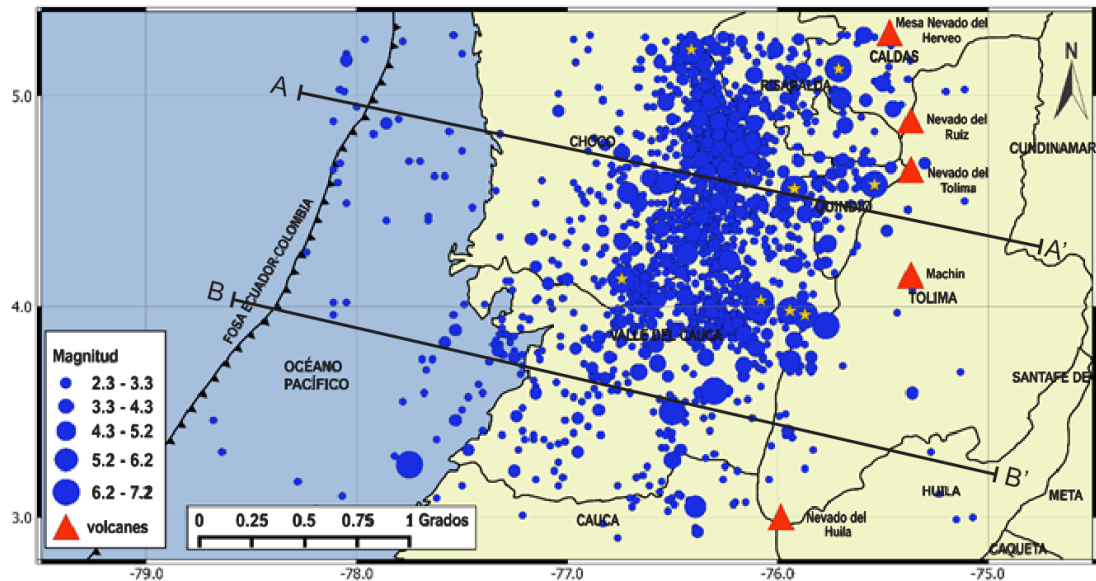


Figura 12. Distribución de la sismicidad con foco intermedio para el periodo 1993-2013. Las estrellas de color amarillo indican los principales sismos mayores a 6.5Ml y los triángulos de color rojo los volcanes activos. Las líneas de color negro corresponden a los perfiles AA' y BB'.

Perfil AA'. En el intervalo de 60 a 120 km de profundidad, el valor de b oscila entre 0.7 y 0.9, con un valor pico de 1.2 a los 80 km. Posteriormente, disminuye entre 120 a 170 km de profundidad (Figura 13a) donde el valor de b está entre 0.5 y 0.8. En la Figura 13b, se observa que los valores altos de b (1.1-1.3) están presentes en la parte superior derecha de la litosfera subducida a una profundidad de 70 a 90 km (entre 300 y 350 km de longitud desde la trinchera). En la parte inferior de la placa se presentan valores bajos de b (0.6-0.8), distribuidos en dos partes, primero entre 90 y 150 km de profundidad, a una distancia desde la trinchera de 230 a 290 km, luego desde los 160 a 180 km, a una distancia de 300 km a más de 350 km desde la trinchera.

Perfil BB'. Los valores de b oscilan entre 0.7 y 0.9 de 60 a 120 km de profundidad. Luego, a 130 km se incrementa a 1.2 (valor pico), y posteriormente comienza a disminuir con algunas fluctuaciones hasta los 170 km de profundidad (Figura 14a). En la Figura 14b se observa que los valores altos de b (1.1-1.3) se distribuyen en dos partes. La primera a una profundidad de 60 a 120 km (entre 150 a 240 km desde la trinchera), luego entre 70 y 140 km de profundidad, a una distancia entre 310 y un poco más allá de 400 km desde la trinchera. En tanto, los valores bajos de b (0.6-0.8), se presentan desde la parte central de la placa (entre 60 y 140 km de profundidad) hasta su parte inferior (de 140 a 180 km de profundidad).

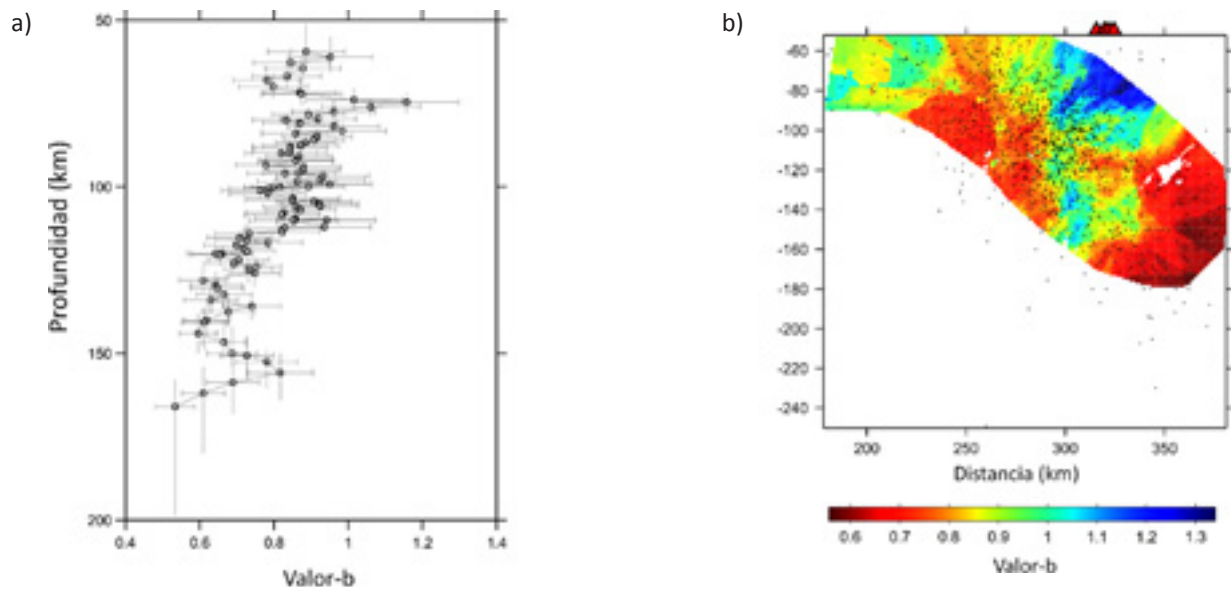


Figura 13. Perfil AA'. a) Variación del valor de b en función de la profundidad; b) tomografía del valor de b a lo largo del perfil. Los triángulos de color rojo representan a los volcanes activos (Machín, Nevado del Tolima, Nevado del Ruiz y Santa Isabel).

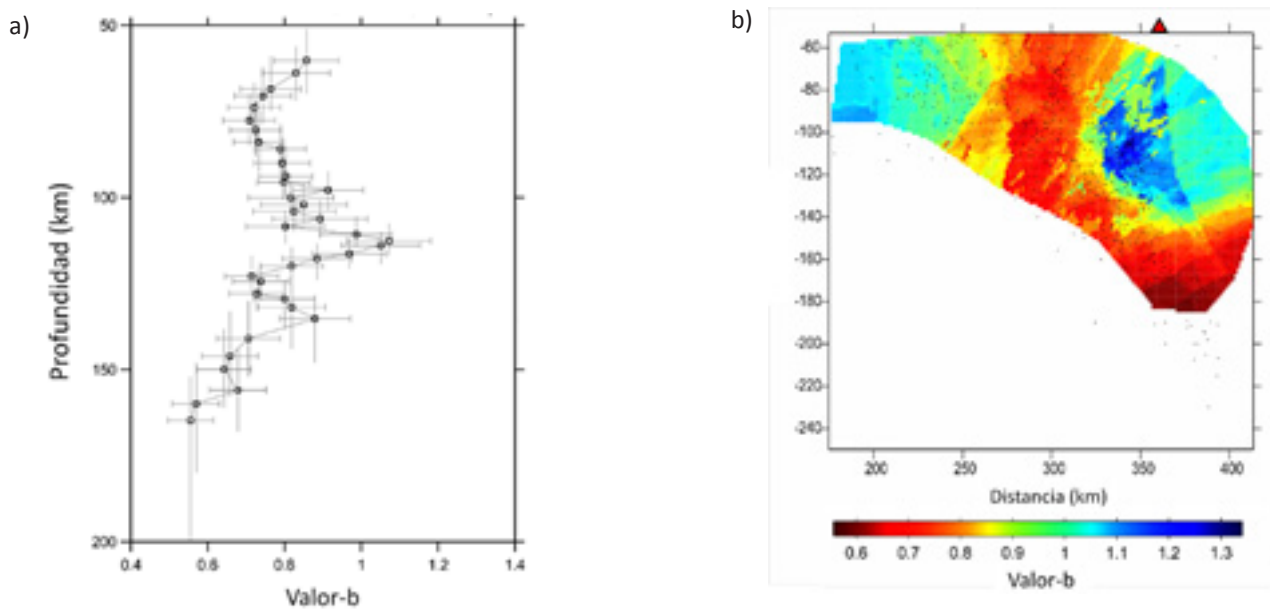


Figura 14. Perfil BB'. a) Variación del valor de b en función de la profundidad; b) tomografía del valor de b a lo largo del perfil. El triángulo de color rojo representa el volcán Nevado del Huila.

Discusión

En las zonas de subducción de Alaska, Nueva Zelanda, Centroamérica y norte de Japón (Wiemer y Beniot, 1996; Wyss et al., 2001) se observó que el incremento de los valores del parámetro b (anomalías) para la sismicidad ocurrida, a una profundidad entre 90 y 100 km, podría deberse al incremento de la deshidratación de la placa que subduce, provocando una disminución de la presión de poro y un aumento de los esfuerzos efectivos. También se ha observado que el valor de b disminuye con el incremento de la profundidad, posiblemente debido al aumento de los esfuerzos diferenciales (Wiemer y Wyss, 1997; Mori y Abercrombie, 1997; Bhattachary y Kayal, 2003; Scholz, 2015).

En la Figura 15 se muestra la comparación entre los perfiles de variación espacial de valores de b en función de la profundidad para sismos intermedios ocurridos en dos diferentes zonas de subducción. La Figura 15a muestra los resultados de la región sísmica de Vrancea situada al este

de los montes Cárpatos, en Rumania (Enescu et al., 2009), que se caracteriza por la alta actividad sísmica a profundidad intermedia (60-170 km) y cuyos valores altos de b se presentan a profundidades que van desde los 90 hasta 125 km. Monterroso y Kulháněk (2003), sugieren que los valores altos de b que varían (anomalías) en el rango de 80 a 100 km de profundidad (Figura 15b) a lo largo de la trinchera mesoamericana, dentro de la zona de subducción de América Central (Guatemala), están relacionados con el proceso de génesis del magma debajo de la cadena volcánica. Este sería un caso similar al encontrado en las zonas aledañas al valle del Cauca, donde hay presencia de actividad volcánica (Nevado del Tolima, Nevado del Ruiz y Santa Isabel) aproximadamente a 300 km desde la trinchera (Figura 6 y 13) y donde se presentan valores altos de b entre 1.1 y 1.3, a una profundidad de 70 a 90 km (Figura 13a, 13b y 15c). De acuerdo con Maden y Ozturk (2015), los valores altos b están asociados a un alto gradiente térmico, cámaras magmáticas o zonas de baja velocidad en la corteza terrestre.

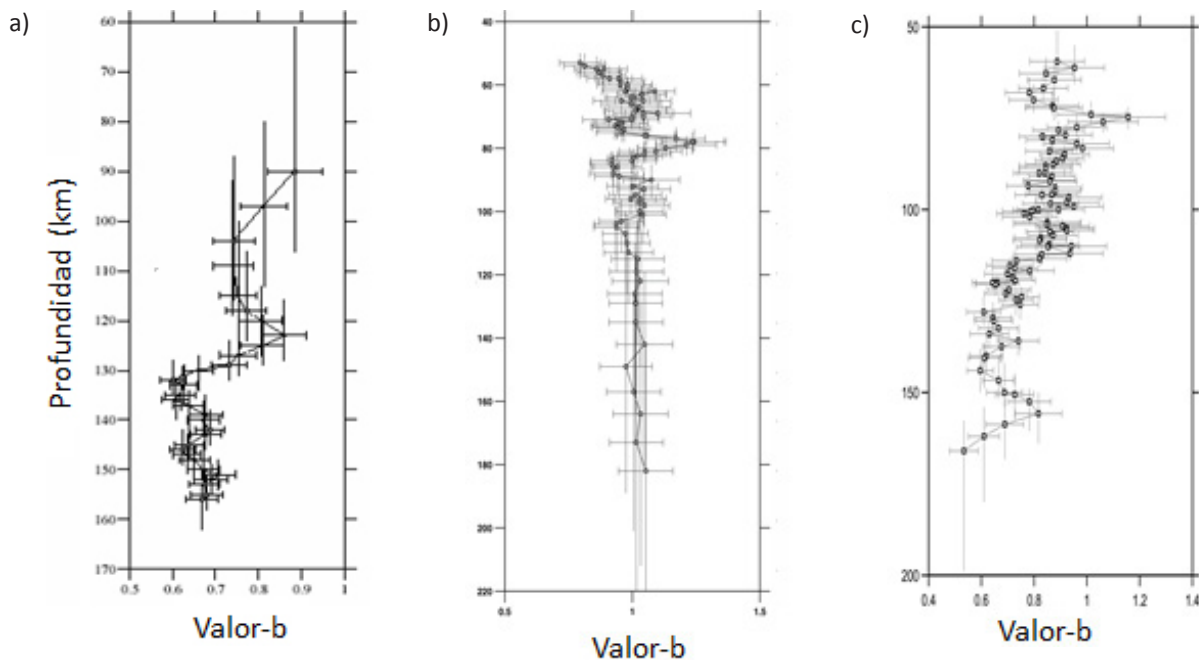


Figura 15. Comparación de la variación espacial de valores de b en función de la profundidad, para sismos intermedios en las regiones de, a) Vrancea (Rumania; Enescu et al., 2009); b) América Central (Guatemala; Monterroso y Kulháněk, 2003); y c) Colombia (valle del Cauca).

Conclusiones

Los valores de variación de b para la región del Valle del Cauca, oscilan entre 0.6 y 1.3. Los periodos de retorno para sismos locales con $M \geq 6.5$ ML, se encuentran entre 20 y 40 años. En este caso es importante hacer la salvedad de que los periodos de recurrencia tienden a ser mayores que el tiempo del catálogo sísmico usado. Por ello se recomienda hacer un próximo trabajo usando un catálogo más robusto para mejorar este tipo de análisis.

Hacia el norte y sur (de acuerdo a los perfiles AA' y BB'), los valores bajos de b (0.6-0.8) distribuidos en la parte inferior de la placa Nazca (~80 km), podrían estar relacionados con la presencia de asperezas o zonas probables de ocurrencia de sismos grandes. Dichos valores comienzan a presentarse desde los 90 km de profundidad en el norte, y a partir de los 60 km de profundidad en el sur, salvo los valores picos de 1.2, a 80 y 130 km de profundidad, que se presentan en el norte y sur, respectivamente. Esta variación en ambos lugares puede relacionarse con los cambios en las propiedades físicas dentro de la placa Nazca.

Por ejemplo, en el norte esta variación de b con la profundidad, puede estar asociada con una alta heterogeneidad y baja resistencia de la corteza. Ello haría posible un fracturamiento alto de la placa, mayor ocurrencia de sismos y la generación de volcanismo debido a posibilidad de que el magma ascienda fácilmente desde el manto hacia la superficie por el medio fracturado. Por el contrario, la variación de b con la profundidad en el sur, posiblemente se relacione con menor deformación y menor fracturamiento, por lo tanto, habría menor ocurrencia de sismos y menor vulcanismo.

Otro aspecto que podría pensarse de acuerdo a la variación del valor b con la profundidad para la parte norte y sur, es el nivel de acoplamiento de la placa Nazca con respecto a la placa

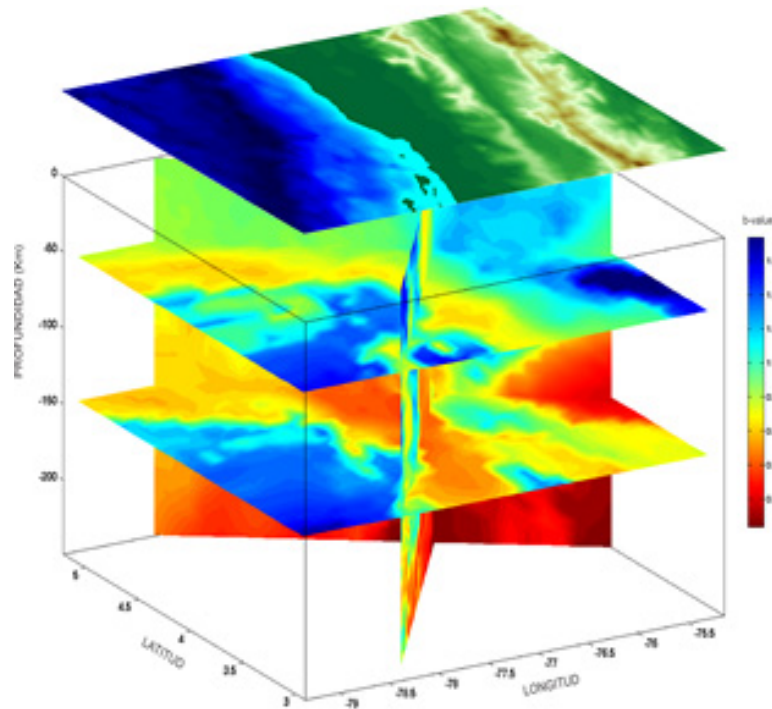
Suramérica en estas zonas. Esta idea se apoya en la hipótesis formulada en recientes trabajos (Nishikawa y Ide, 2014; Ávila-Barrientos, et al., 2015) donde se relacionan los valores bajos de b con el alto acoplamiento de las placas en zonas de subducción, así como a las condiciones térmicas y de edad de la placa. En este sentido, posiblemente en el norte el acoplamiento de la placa Nazca sea menor que en el sur, lo cual estaría relacionado con la actividad sísmica de la región. Por ejemplo, en la zona sur, la poca ocurrencia de sismicidad puede ser debido a la intensa resistencia (fricción) entre las placas, lo que conlleva a la acumulación lenta de esfuerzos y que, una vez se supere dicho nivel de resistencia, se generen sismos de gran magnitud como los ocurridos en septiembre 30 de 2012 con magnitud 7.1 Mw y febrero 9 de 2013 con magnitud 6.9 Mw, ambos localizados al sur de la región del valle del Cauca a profundidades intermedias.

Como se puede apreciar, el estudio de la variación del valor de b con la profundidad en zonas de subducción, muestra que las causas principales de su perturbación pueden ser: el grado de heterogeneidad de los materiales, la deshidratación de la placa, cambios en los niveles de esfuerzos, la alta resistencia reológica, la edad y la temperatura de las placas. Por tanto, el análisis del valor de b ha permitido caracterizar fuentes sismogénicas en varias partes del mundo, y su utilidad en esta investigación ha contribuido al entendimiento de la actividad sísmica en el valle del Cauca, suroccidente de Colombia.

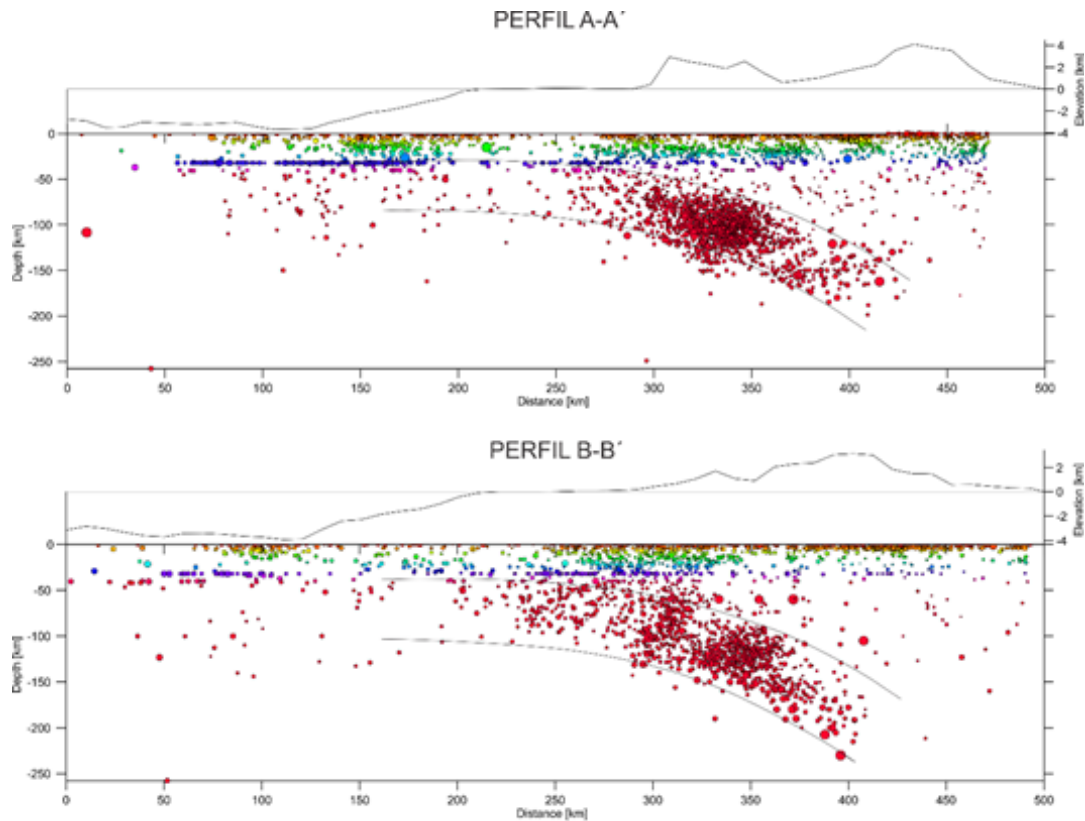
Agradecimientos

A la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), Dr. Hernando Tavera director de la División de Sismología del Instituto Geofísico de Perú (IGP) y Dr. Elkin de Jesús Salcedo director del Observatorio Sismológico del Suroccidente Colombiano (OSSO) de la Universidad del Valle. Igualmente nuestros sinceros agradecimientos a

ANEXOS



A1. Esquema tridimensional de la distribución de valores de b en la región del Valle del Cauca.



A2. Perfiles de sismicidad estudiados en el la región del Valle del Cauca. Los puntos en color rojo corresponden a los eventos usados para el análisis.

un evaluador anónimo, a la Dra. Gina Villalobos por contribuir en la considerable mejora de este trabajo y al Dr. Luis Delgado Argote por el seguimiento a la evolución del mismo.

Referencias

- Ávila-Barrientos, L., Zúñiga, F.R., Rodríguez-Pérez, Q., Guzmán-Speziale (2015). Variation of b and p values from aftershocks sequences along the Mexican subduction zone and their relation to plate characteristics. *Journal of South American Earth Science*, Vol. 63, 162-171.
- Arcila M., Dimaté, C. (2005). Caracterización de fuentes sísmicas. En: Estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali. Informe No. 1-6. INGEOMINAS-DAGMA. M. Bogotá. 38p.
- Aki, K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, 43, 237-239.
- Bhattachary, P., Kayal, J. (2003). Mapping the b values and its correlation with the fractal dimension in the northeast region of India. *Journal of the Geological Society of India*, vol. 62, p.680.
- Condori, C., Tavera, H. (2010). Áreas probables de ruptura sísmica en el borde occidental del Perú, a partir de la variación del parámetro " b ". Tesis para optar por el título de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas. 130p.
- Condori, C. (2011). Análisis y localización de probables áreas de ruptura por sismos, en el borde occidental del Perú: distribución de valores de " b ". Congreso Peruano de Geología, No. 9, pp 1193-1195.
- Corredor, F. (2003). Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America. *Tectonophysics* 372, p.147– 166.
- Collot, J. Y., Marcaillou, B., Sage, F., Michaud, F., Agudelo, W., Charvis, P., Graindorge, D., Gutscher, M., Spence, G. (2004). Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador-southwest Colombia margin. *J. Geophys. Res.*, 109, B11103, doi:10.1029/2004JB003060.
- Enescu, B., Enescu, D., Ito, K. (2009). Values of b and p : Their variations and relation to physical processes for earthquakes in Japan and Romania. *Rom. Journ. Phys.*, Vol. 56, Nos. 3-4, P. 590-608.
- Freymueller J. T., Kellogg J. N., Vega V. (1993). Plate motions in the North Andean region. *Journal of Geophysical Research*. Published in *Journal of Geophysical Research*, Volume 98, No. B12, p. 21.853-21.863.
- Gerstenberger, M.C., Wiemer, S., Giardini, D. (2001). A systematic test of the hypothesis that the b -value varies with depth in California. *Geophys. Res. Lett.*, 28(1), 57-60.
- Gutenberg, R. and Richter, C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.* 34, 185-188.
- Gutscher M. A., Malavieille J., Lallemand S. Collot J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 168, p.255–270.
- Heras, H., Tavera, H. (2002). Localización de áreas probables a ser afectadas por grandes sismos en el borde oeste de Perú: Estimación a partir de periodos de retorno local basado en distribución de valores de " b ". Centro Nacional de Datos Geofísicos, boletín de la S.G.P. p. 7-16.

- INGEOMINAS (2005). Estudio de Microzonificación Sísmica de Cali. Investigaciones Neotectónicas en el Centro Occidente Colombiano. Informe No. 1-3. Bogotá D.C.171p.
- Kellogg J. N., Dixon T., Neiland, R. (1989). Central and South American GPS Geodesy. EOS Trans., 70, p.649-656.
- Kellogg, J., Vega, V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: Constraints from Global Positioning System geodetic studies and gravity, Geol. Soc. Amer. Special Paper 295, 75-90.
- Kossobokov, V. G., Keilis-Borok, V. I. (2000). Implications of a Statistical Physics Approach for Earthquake Hazard Assessment and Forecasting. Pure Appl. Geo-phys., 157, 11, 2323-2349.
- Lin, Y., Claude, J., Hsu, S. (2008). Variations b-values at the western edge of the Ryukyu Subduction Zone, north-east Taiwan. V. 20 issue 2: pages 150-153.
- López M. C. (2006). Análisis de deformación tectónica en los piedemontes de las Cordilleras Central y Occidental Valle del Cauca, Colombia. Contribuciones Paleosísmicas. Tesis Universidad EAFIT. 102p.
- Malone, S., Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismological Research Letters, Vol. 72, No. 2, pp. 374-383.
- Mogi, K. (1962). Magnitude frequency relationship for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes. Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo, vol. 40, p. 831.
- Monsalve, H. (1998). Geometría de la subducción de la Placa Nazca en el noroeste de Colombia. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. 107p.
- Monterroso, D.A., Kulhánek, O. (2003). Spatial variations of b-values in the subduction zone of Central America, Geofísica Int., 42(4), 1-13.
- Mori, J., Abercrombie, R. (1997). Depth dependence of earthquake frequency-magnitude distributions in California: Implications for rupture initiation, J. Geophys. Res., 102, B7, pp. 15081–15090.
- Maden, N; Ozturk, S. (2015). Seismic b-Values, bouguer gravity and heat flow data beneath eastern Anatolia, Turkey: tectonic implications. Springer, 22p. DOI 10.1007/s10712-015-9327-1.
- Nishikawa, T., Ide, S. (2014). Earthquake size distribution in subduction zones linked to slab buoyancy. Nature Geosci. 7, 904-908. <http://dx.doi.org/10.1038/NGEO2279>.
- Pennington, W. D. (1981). Subduction of the eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America, J. Geophys. Res. 86; p.10753–10770.
- Pedraza, P. (2006). Geometría de la subducción de la placa Nazca en el suroeste de Colombia, Implicaciones tectónicas y sísmicas. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 118p.
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. (1986). The standard error of the magnitude-frequency b value. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 72, p. 1677-1687.
- Reasenber, P. (1985). "Second-Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982". Journal Geophysical Research, vol. 90, .o. B7, Pages 5479-5495.
- Salcedo, E. J., Pérez, J.L. (2016). Caracterización sismotectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos. Boletín de geología, Vol. 39, 27p.

- Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., Gorin, G. (2008). Structural imprints at the front of the Chocó-Panamá indenter: Field data from the North Cauca Valley Basin, Central Colombia. *Tectonophysics*, Vol. 460, pp. 134-157. doi:10.1016/j.tecto.2008.07.015.
- Scholz, C.H. (1968). The frequency-magnitude relation of micro-fracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 58, 399-415.
- Scholz, C. H. (2015), On the stress dependence of the earthquake b value, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/ 2014GL062863
- Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, Olaya, J. and Rivera, C. (2000), Geodynamics of the northern Andes; subductions and intracontinental deformation (Colombia), *Tectonics*, 19 (5), 787-813.
- Trenkamp, R., Kellogg, J.N., Freymueller, J.T., Mora-Páez, H. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *J. South Am. Earth Sci.* No. 15, p.157-171.
- Trenkamp R., Mora-Páez H., Salcedo E. and Kellogg J. N. (2004). Possible rapid strain accumulation rates near Cali, Colombia, determined from GPS measurements (1996-2003). *Earth Sci. Res. J.* Vol. 8, No. 1. p. 25-33.
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in a formula $\log N=a-bM$ showing the magnitude frequency for earthquakes. *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 99-103.
- Warren N.W., Latham G.V. (1970). An experimental study of thermally induced microfracturing and its relation to volcanic seismicity, *J. Geophys. Res.*, 75, pp. 4455-4464.
- Wiemer, S., Zuñiga, R. (1994). ZMAP-a software package to analysis seismicity (abstract) *E, OS, Trans.*, AGU, 75, 456.
- Wiemer, S., Benoit, J. (1996). Mapping the b -value anomaly at 100 km depth in the Alaska and New Zealand subduction zones, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1557-1560.
- Wiemer, S., Wyss, M. (1997). Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times?. *Jour. Geophys. Res.* 102, 15115-15128.
- Wiemer, S., Wyss, M., (2000). Minimum Magnitude of Completeness in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 4, 859-869.
- Wiemer, S., Wyss, M. (2002). Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes. *Journal Article*, p.40.
- Wyss, M. (1973). Towards a physical understanding of the earthquake frequency distribution, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 31, pp. 341-359.
- Wyss, M., Nagamine, K., Klein, F.W., Wiemer, S. (2001). Evidence for magma at intermediate crustal depth below Kilauea's East Rift, Hawaii, based on anomalously high b -values. *J. Volc. Geoth. Res.* Vol. 106, 23-37.
- Zuñiga, R., Wyss, M. (2001). Most and least likely locations of large to great earthquakes along the pacific coast of Mexico, estimate from local recurrence times based on b -values. *Geophys. Jour. Intern.* 90.

Recepción del manuscrito: 26 enero de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 30 marzo de 2016

Aceptación: 15 abril de 2016

La XX Olimpiada de Ciencias de la Tierra: Geotermia y la Teoría de la Tierra Bola de Nieve

Gómez Treviño, Enrique

egomez@cicese.mx

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

Presentación

Neutrinos en la geotermia, producción de energía eléctrica en yacimientos geotérmicos de la península de Baja California, fumarolas submarinas, máquinas que mueven calor de un lugar a otro y que pueden extraer calor hasta del hielo, tuberías enterradas para hacer más eficientes los aires acondicionados y la calefacción, y para terminar, los millones de años que la Tierra estuvo completamente cubierta de hielo, incluyendo los océanos. Nada de esto se cubre en los programas de bachillerato por lo que consideramos que serían buenos temas para complementar la educación en ese nivel.

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

El primer lugar lo obtuvo José Dionicio Espinoza Ureta y el segundo David Alberto Pérez Fletes, ambos del COBACH plantel La Mesa; mientras que el tercer lugar fue para Brenda Castro Alameda del COBACH plantel Tijuana Siglo XXI. José Dionicio y David Alberto fueron asesorados por el Quím. Manuel Armando Gómez Piñón y Brenda por la Ocean. Gabriela de la Selva Rubio, ambos profesores en sus respectivos planteles.

Geotermia y la Teoría de la Tierra Bola de Nieve: Guía para la XX Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California. Viernes 5 de junio de 2015. Auditorio de Ciencias de la Tierra. CICESE. Ensenada, Baja California.

Nota. El tema de este año fue motivado por la reciente creación en el CICESE del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica o CeMIE-Geo

Introducción

La guía está organizada de la siguiente manera. Primero se considera que el planeta Tierra produce calor, no tanto calor como el Sol, pero sí suficiente para que su interior fluya como un líquido y mueva las placas tectónicas causando volcanes y terremotos. Enseguida se verá cómo ese calor se utiliza en algunos lugares para producir energía eléctrica. Aunque la producción de energía eléctrica es la aplicación más llamativa de la geotermia,

no es la única ni la que más se aprovecha. De hecho, la aplicación más común es enterrar tuberías para que los sistemas de aire acondicionado y calefacción se hagan más eficientes y ahorren energía. Cerramos con un tema aparentemente opuesto a la geotermia: La Teoría de la Tierra Bola de Nieve.

El ardiente interior de la Tierra

Como entrada a los temas de este año se recomienda ver con mucha atención los videos cuyas ligas se dan en cada caso. El primero ilustra la deriva continental y la tectónica de placas: <https://www.youtube.com/watch?v=mztXG56fftU>. En el video se ilustra cómo las placas tectónicas se han movido en el pasado para llegar a la posición actual. También se habla sobre volcanes y sobre las llamadas dorsales oceánicas donde roca fundida sale del manto formando corteza nueva. Para el tema de este año el enfoque es una pregunta que debería hacerse cualquiera que vea el video. ¿Por qué el interior de la Tierra está tan caliente que fluye como un líquido? Esto es todavía un tema de investigación sobre el cual no se tiene una respuesta completa. En el año 2005 se pudo medir con mucha precisión la proporción de energía que producen los elementos radiactivos en el interior de la Tierra. Ustedes investiguen la proporción y la forma en que lo midieron en búsquedas en Internet.

También busquen cómo aumenta en promedio la temperatura con respecto a la profundidad, lo que se conoce como gradiente térmico. Este gradiente ya se conocía desde el siglo XIX y fue utilizado por Lord Kelvin para calcular la edad de la Tierra, la cual según sus cálculos no podía tener más de 100 millones de años desde que empezó a enfriarse. Si tuviera más años ese gradiente debería ser mucho menor de lo que es. Sus cálculos estaban bien, pero en su tiempo no se había descubierto la radiactividad. Esto

es, no tomó en cuenta que en el interior de la Tierra existen fuentes de calor como los isótopos radiactivos que no la deja enfriarse tan rápido. Ahora ya se sabe que la Tierra tiene muchos más millones de años. También busquen el promedio sobre toda la Tierra del flujo de calor que sale del planeta. Encontrarán que esto lo expresan en W/m^2 , por lo que puede compararse con lo que recibe del Sol la superficie de la Tierra. Tal vez no encuentren este promedio en internet pero se puede calcular conociendo lo que se recibe en el ecuador y considerando que la Tierra es una esfera. Este cálculo es un buen ejercicio de física y geometría, muy simple, pero con dos consideraciones especiales que a veces se nos escapan. Como video complementario vean este sobre fumarolas negras descubiertas hace algunas décadas: <https://www.youtube.com/watch?v=grdK1A2Jrjl>. De hecho, aquí muy cerca en el Mar de Cortés hay muchas de estas fumarolas con ecosistemas que no necesitan del Sol.

Producción de electricidad

Pasamos ahora a la producción de electricidad mediante la energía geotérmica. El video recomendado es sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto localizado en Mexicali. La liga es: <https://www.youtube.com/watch?v=TU6luP2Redw>. En algunos lugares de la Tierra se da en forma natural algo similar a una olla de presión como las que se utilizan para cocinar. Una fuente de calor por abajo, rocas con mucha agua en el medio, y una tapa por arriba para que no escape el vapor. Perforando la tapa sale vapor de agua a muy alta presión y temperatura. El vapor se envía a un cuarto de máquinas donde hace girar turbinas que producen energía eléctrica. Las plantas convencionales necesitan quemar carbón o gas natural para producir el vapor. En una planta geotérmica el vapor sale de los pozos y se ahorra la quema de combustible. En el video se menciona que en México hay cuatro lugares con plantas geotérmicas. Investiguen

estos lugares y busquen cual es la capacidad instalada en cada caso, así como la proporción que representa la geotermia con respecto al total de energía eléctrica que se produce en el país, y el lugar que ocupa México en el mundo.

Bombas de calor

Muy relacionado con la geotermia está lo que se conoce como climatización geotérmica mediante bombas de calor. No se trata simplemente de llevar agua caliente a una casa y hacerla circular por tuberías como sistema de calefacción. Esto de hecho se hace en lugares donde hay disponibilidad de aguas termales. Por su parte, las bombas de calor geotérmicas se pueden utilizar casi en cualquier parte. Además, pueden funcionar como calefacción y también como refrigeración. De hecho, un refrigerador de casa es una bomba de calor que funciona también al revés, como calefacción. Imaginen un refrigerador colocado entre dos cuartos contiguos, el frente da a uno de los cuartos y la parte de atrás hacia el otro cuarto. Ahora pongan a funcionar el refrigerador y ábranle las puertas. ¿Qué va a pasar? No es difícil imaginarlo. El cuarto que tiene el refrigerador abierto tenderá a enfriarse y el que le tocó la parte de atrás tenderá a calentarse. Lo del enfriamiento lo comprobamos todos los días al abrir el refrigerador. Para comprobar el calentamiento acerquen su mano a la parte de atrás del refrigerador. Un refrigerador es una bomba de calor que mueve calor de un lugar a otro. En este caso lo toma de la parte de adentro y lo mueve hacia afuera. El calificativo de bomba es por el parecido a cómo se mueve el agua bajo el efecto de la gravedad. El agua fluye naturalmente de arriba hacia abajo y para que fluya de abajo hacia arriba se necesita forzarla o bombearla. Lo mismo con el calor, que fluye naturalmente de lo caliente a lo frío y para que fluya de lo frío a lo caliente hay que forzarlo o bombearlo. El refrigerador necesita estar trabajando para conservarse frío en su interior. En un corte prolongado de energía eléctrica se

comprueba que el calor fluye de lo caliente a lo frío: todo en el refrigerador se echa a perder. Por cierto, el frío no existe. Lo que está frío es simplemente que tiene menos calor.

Bases científicas de las bombas de calor

Las bombas de calor se inventaron basándose en las leyes de los gases. Una de estas leyes establece que un gas se calienta cuando se comprime rápidamente. El siguiente video los va a impresionar: <https://www.youtube.com/watch?v=4qe1Ueifekg>. Aquí encienden fibras de algodón comprimiendo el aire, y lo hacen sin aparatos complicados. Igualmente impresionante es este otro video donde se muestra que el vapor de agua al expandirse se enfría y se convierte en gotitas de agua: <https://www.youtube.com/watch?v=6S88XeA6fbM>. El vapor sale muy caliente de una olla de presión pero al expandirse se enfría y se convierte en gotitas de agua no tan calientes. Volviendo al refrigerador, la expansión se realiza en el interior (la tubería no se ve) y la compresión en el exterior (la tubería sí se ve). Repitiendo el ciclo expansión-compresión muchas veces la parte de adentro se pone cada vez más fría (puerta del refrigerador cerrada). La tubería exterior, donde se realiza la compresión, se calienta poco porque el calor se dispersa en el aire (el aire de la cocina se calienta un poco). En su modo de calefacción una bomba de calor extrae calor del aire exterior y lo mueve hacia el interior de la casa. Aunque el aire esté frío se le puede extraer calor y hacer que fluya hacia la casa; recuerden que se trata de una bomba de calor. De hecho, al aire o a cualquier sustancia se le puede extraer calor sin importar su temperatura, al menos que ya le hayan extraído todo el calor que tenía. Una sustancia cualquiera ya no tiene calor cuando su temperatura es 0°K, o cero absoluto, lo que equivale a -273°C. Si el aire exterior está a cero grados centígrados, aún así se le puede extraer calor para calentar una casa.

Eficiencia de las bombas de calor

La diferencia de temperatura entre el exterior y el interior es muy importante en relación a la eficiencia. En Mexicali saben muy bien que en el mes de más calor los sistemas de refrigeración consumen más energía. La razón es que el calor que se extrae de la casa se debe disipar en el aire exterior, y si este aire está muy caliente la disipación no es muy buena. Si el aire exterior está más frío la disipación se da mejor y la casa se enfría más rápido. Según encontrarán en sus búsquedas la eficiencia de una bomba de calor depende inversamente de la diferencia de temperatura entre exterior e interior. Si la diferencia es grande la eficiencia es pequeña y al revés, si la diferencia es pequeña la eficiencia es grande. Las fórmulas para la eficiencia son muy simples, fueron descubiertas en el siglo XIX en relación con la máquinas de vapor y se aplican también a las bombas de calor. Y aquí es donde entra lo de geotermia en las bombas de calor geotérmicas. Estas son bombas de calor como las que depositan o extraen calor del aire, pero en lugar del aire utilizan la tierra. Vean el siguiente video: <https://www.youtube.com/watch?v=uF72uLc4ea4>. La temperatura a pocos metros de profundidad prácticamente no cambia a lo largo de todo el año, siendo más baja que la del aire en verano y más alta que la del aire en invierno. La situación es ideal para mejorar la eficiencia tanto del aire acondicionado como de la calefacción. Las fórmulas y más información la pueden encontrar en Internet, así como unidades, conversiones, capacidad instalada en el mundo, etc.

La Teoría de la Bola de Nieve

El video <https://www.youtube.com/watch?v=H2t2eUGpDR0> resume en pocos minutos las deducciones que han hecho los científicos buscando y encontrando evidencias en rocas muy antiguas. El video empieza con la formación de la Tierra y termina en una época

en que toda la Tierra estaba congelada, incluidos los océanos. Céntrense en la última parte. Relacionen las fechas (millones de años) con la desaparición de los dinosaurios, la separación de América del Sur de África y la apertura del Mar de Cortés. También busquen la fecha cuando la Placa de la India chocó con la placa Euroasiática formando las montañas del Himalaya. El sismo reciente de magnitud 7.8 en Nepal ocurrió en esta área, lo que indica que el calor interno de la Tierra sigue tan activo como siempre.

El examen

Como siempre, en total serán 100 preguntas. Sobre el presente tema de Geotermia y la Teoría de la Tierra bola de Nieve serán 30 preguntas. Estas 30 preguntas tendrán un valor de 2.5 puntos cada una para un valor total de 75 puntos. Sobre Trilateración: Sismos, GPS, rayos y teléfonos celulares (XIX Olimpiada) serán 25 preguntas. Sobre La Fórmula del calentamiento Global (XVIII olimpiada) serán 25 preguntas. Sobre Gaia serán 20 (XVII olimpiada). Aristarco de Samos (XVI olimpiada) queda fuera y no habrá preguntas al respecto. Estas 70 preguntas las pueden consultar en los informes correspondientes a las olimpiadas mencionadas, que están disponibles en esta misma página (<http://olimpiadas.ugm.org.mx>). Estas 70 preguntas tendrán un valor de 5/14 de punto cada una para un valor total de 25 puntos. Para los que no han asistido a 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 por correo electrónico, 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, el número de mesas y sillas que necesitaremos, así como la cantidad de comida que debemos ordenar. Por lo general recibimos a alrededor de 90 participantes. Aunque nunca hemos puesto límites, si es necesario limitaremos a 100 el número de participantes por cuestiones de cupo en el auditorio.

Pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado. De 8:00 a 10: AM se entregarán los gafetes con sus nombres. A las 10:00 AM inicia el examen y se termina a las 12:01 PM. Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios incluyendo la red sismológica donde se reciben las señales de los sismos que ocurren en Baja California. Entre las 2:00 y 3:00 PM se harán las premiaciones.

Saludos cordiales y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño.
Coordinador de las Olimpiadas

Examen

Las 30 preguntas nuevas del examen

1. Se estima mediante mediciones de flujo de calor alrededor de la Tierra que ésta emite al espacio 47 TW (terawatts). Considerando que la Tierra tiene un radio de 6,370 km, calcular el flujo de calor por metro cuadrado. La pregunta es el tamaño que deberá tener un terreno cuadrado para que el flujo de calor equivalga a la energía por segundo que consume un foco de 100 W. El lado del cuadrado en metros es

- a) 4 b) 8 c) 16 d) 32

2. La Tierra recibe del Sol 174,000 TW en las capas altas de la atmósfera. Se refleja una parte

y otra se absorbe en partículas de polvo, etc., de tal forma que a la superficie llega una fracción de dicha cantidad. Suponiendo que lo que llega a la superficie sea sólo de 100,000 TW, la pregunta es: ¿A cuántos focos de 100 W equivale lo que llega al terreno de la pregunta anterior?

- a) 250 b) 500 c) 1,000 d) 2,000

3. La autoridad de Lord Kelvin y su argumento basado en el enfriamiento de la Tierra desde un estado incandescente mantuvo a la geología y a la biología en suspenso por mucho tiempo. La edad de 100 millones de años que calculaba Lord Kelvin era insuficiente para explicar la formación de montañas y su erosión. La teoría de la evolución de Darwin también necesitaba más tiempo para explicar la formación y transformación de las diferentes formas de vida. Ahora todo es compatible gracias al descubrimiento de la radiactividad. Se ha logrado determinar con bastante exactitud y precisión que la Tierra tiene una edad muchas veces mayor a la determinada por Lord Kelvin. ¿Cuántas veces?

- a) 15 b) 25 c) 35 d) 45

4. En las rocas, los átomos de los elementos radiactivos al descomponerse en otros más pequeñas lo hace violentamente, golpeando a otros y haciendo que aumente la temperatura de la roca. Cuando se descubrió la radiactividad y sus efectos en las rocas el argumento de Lord Kelvin se invalidó. La Tierra podría seguir caliente en su interior porque contaba con una fuente que proporcionaba calor continuamente. Sin embargo, faltaba la parte cuantitativa. En otras palabras: ¿Cuánto de ese calor se debe a la radiactividad? Hace apenas 10 años que se sabe con certeza cuánto del flujo de calor que sale de la Tierra se debe a la radiactividad. Expresado en porcentaje la cantidad de calor debido a la radiactividad es

- a) 20 b) 30 c) 40 d) 50

5. Geoneutrino es el término acuñado para describir la partícula elemental que se detecta y cuyo número indica la cantidad de átomos radiactivos que se dividen en el interior de la Tierra. Lo anterior en referencia a que cuando un átomo se divide, además de los átomos más pequeños también salen disparadas partículas elementales que prácticamente no chocan con nada y que pueden atravesar la Tierra entera sin ser detenidos. Sin embargo, en realidad sí pueden ser detenidos o detectados mediante aparatos diseñados para ello, aunque se detecte uno cada mes de los muchísimos que se producen en el interior de la Tierra. En sus búsquedas seguramente encontraron que el detector se encuentra en Japón, y que en realidad no detecta neutrinos sino

- a) Positrones b) Neutrones
- c) Antineutrinos d) Rayos Beta

6. Uno de los siguientes elementos no tiene isótopos radiactivos que contribuyan a la producción de calor en el interior de la Tierra:

- a) Torio b) Sodio c) Uranio d) Potasio

7. La fusión de una roca depende de tres factores: temperatura, presión y composición. Las rocas están formadas por diferentes minerales cada uno de los cuales se funde a diferente temperatura y presión. El concepto de fusión parcial que seguro encontraron en sus búsquedas se refiere a eso, a que a una profundidad dada unos minerales pueden estar fundidos y otros no. Ignorando el efecto de la presión podemos estimar la profundidad a que se fundiría un mineral cualquiera. Suponiendo un gradiente geotérmico de $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$: ¿A qué profundidad se funde un mineral cuya temperatura de fusión es de $1,200^{\circ}\text{C}$?

- a) 48 b) 58 c) 68 d) 78

8. La comparación que se hace en una de las preguntas anteriores entre el flujo de calor terrestre y un foco de 100 W es sólo con fines ilustrativos. No significa que se pueda utilizar todo ese calor en encender el foco. Para que resulte práctico convertir el calor de la Tierra en electricidad se requieren condiciones especiales según se explicó en la guía. Entre otras cosas, la fuente de calor debe estar muy cerca de la superficie y el flujo debe ser mucho mayor al promedio de toda la Tierra. Por lo general esto ocurre en regiones volcánicas. Actualmente hay 24 países que explotan la geotermia para producir energía eléctrica. La pregunta es: ¿Qué país de los cuatro siguientes produce más energía eléctrica con geotermia?

- a) México b) Islandia
- c) Filipinas d) Estados Unidos

9. La capacidad instalada en el campo geotérmico de Cerro Prieto es de 720 MW (megawatts). ¿Cuántos watts per cápita representa esto para el estado de Baja California?

- a) .22 b) 2.2 c) 22 d) 220

10. La capacidad instalada en el campo geotérmico del volcán Las Tres Vírgenes en Baja California Sur es de sólo 10 MW. Expresando esta cantidad en W per cápita para el municipio de Santa Rosalía, el cual es el más cercano al volcán y tiene 12,000 habitantes da como resultado

- a) 8.3 b) 83 c) 830 d) 8,300

11. Per cápita, los habitantes de Santa Rosalía utilizan más la energía geotérmica que lo habitantes de Baja California. ¿Cuántas veces?

- a) 4 B) 40 c) 400 d) 4,000

12. El agua fluye naturalmente de arriba hacia abajo. Si queremos que fluya de abajo hacia arriba hay que emplear una bomba para que haga el trabajo. Este trabajo es igual a la masa multiplicada por la gravedad y por la diferencia de alturas. Si se dobla la diferencia de alturas se dobla también el trabajo. Algo parecido pasa con las bombas de calor. El calor fluye naturalmente de lo caliente a lo frío. Si queremos que fluya de lo frío a lo caliente hay que emplear una bomba de calor. Siguiendo la analogía con las bombas de agua, a mayor diferencia de temperatura se requerirá hacer más trabajo. La altura juega el papel de la temperatura. Sin embargo, los conceptos y las fórmulas son diferentes. En el caso del calor se utiliza el concepto de coeficiente de rendimiento (COP por sus siglas en inglés: coefficient of performance). Cuando la bomba de calor se utiliza como calentador se mueve una cantidad de calor Q_c de la parte fría hacia la que se desea calentar, y para ello se invierte un trabajo W . La fórmula para el COP_c , donde el subíndice c se refiere a calor, es

$$a) COP_c = (Q_c + W) / W \quad b) COP_c = (Q_c + W) / Q_c$$

$$c) COP_c = Q_c / W \quad d) COP_c = (Q_c * W) / W$$

13. Cuando la bomba de calor se utiliza para refrigeración se mueve una cantidad de calor Q_f . La fórmula para el COP_f , donde el subíndice f se refiere a frío, es

$$a) COP_f = Q_f / W \quad b) COP_f = (Q_f + W) / Q_f$$

$$c) COP_f = (Q_f + W) / W \quad d) COP_f = (Q_f * W) / W$$

14. Las formulas anteriores se refieren al rendimiento en la práctica de equipos funcionando. Las variables Q_c , Q_f y W , las primeras dos se calculan en base a la temperatura del cuarto que se está calentando o enfriando, y la tercera representa la energía que se invierte para que funcione la bomba. Estos rendimientos se van mejorando con los avances en tecnología

(los muy conocidos mini-splits son bombas de calor). Sin embargo, hay límites que no pueden sobrepasarse porque violarían las leyes físicas. Hay fórmulas que expresan el rendimiento máximo posible o ideal en términos de la diferencia de temperaturas entre las partes caliente y fría, sin importar los avances en la tecnología. El máximo posible en la modalidad de calor es

$$a) COP_c = T_c / (T_c - T_f) \quad b) COP_c = T_f / (T_c - T_f)$$

$$c) COP_c = T_c / (T_f - T_c) \quad d) COP_c = (-T_c) / (T_c - T_f)$$

15. El máximo posible en la modalidad de refrigeración es

$$a) COP_c = T_f / (T_c - T_f) \quad b) COP_c = T_f / (T_f - T_c)$$

$$c) COP_c = T_c / (T_f - T_c) \quad d) COP_c = (-T_c) / (T_c - T_f)$$

16. ¿Cuál es la eficiencia máxima posible (COP) de una bomba de calor operando como calentador cuando la temperatura exterior del aire es de 0°C y se quiere una temperatura interior de 35 °C? (Nota: Esta temperatura interior es muy alta pero es el estándar que se utiliza comúnmente.) Una vez calculado el COP máximo posible considerar que en la práctica sólo se logra una fracción del mismo, y que esta fracción es de ½. En la práctica se lograría un COP de

$$a) 0.5 \quad b) 2.2 \quad c) 1.9 \quad d) 4.4$$

17. Si en lugar de estar en el aire la tubería exterior a 0 °C la enterramos y la temperatura a profundidad es de 10 °C, la eficiencia (COP) se mejorará puesto que la diferencia de temperaturas ahora es menor entre el exterior y el interior. ¿Cuál es la eficiencia máxima posible en este caso? Siguiendo el criterio de que en la práctica sólo se logra un 50% del máximo posible: ¿Cuál es la eficiencia (COP) al enterrar las tuberías exteriores?

$$a) 1 \quad b) 2.8 \quad c) 4.4 \quad d) 6$$

18. En la práctica: ¿Cuánto se mejoró el COP al cambiar aire por tierra?

- a) 36% b) 46% c) 26% d) 40%

19. ¿Cuál es la eficiencia máxima posible (COP) de una bomba de calor operando como refrigerador cuando la temperatura exterior es de 45°C y se quiere una temperatura interior de 0°C ? Como en el caso anterior, suponer que en la práctica sólo se alcanza una eficiencia del 50% del máximo ideal. En este caso el COP en la práctica sería

- a) 3.9 b) 4.9 c) 5.9 d) 6.9

20. Si en lugar de estar en el aire la tubería exterior a 45°C la enterramos y la temperatura a profundidad es de 10°C , la eficiencia se mejorará puesto que la diferencia de temperaturas ahora es menor entre el exterior y el interior. Con el mismo criterio del 50% ¿Cuál es la eficiencia en la práctica con las tuberías enterradas?

- a) 4.6 b) 6.4 c) 13.6 d) 15.8

21. En la práctica: ¿Cuánto se mejoró el COP al cambiar aire por tierra?

- a) 50% b) 150% c) 250% d) 350%

22. La fórmula del COP_c es diferente que la del COP_f . Esto se debe a que para depositar calor en el foco caliente, el fluido que viene del foco frío se comprime, se invierte trabajo en ello y se calienta. En otras palabras, que el trabajo W se convierte en calor. Este calor no es calor que viene del foco frío, sino calor nuevo que se deposita en el foco que se está calentando. Esto hace que el COP_c sea mayor en igualdad de circunstancias que el COP_f por la cantidad de

- a) 100 b) 10 c) 1 d) 2

23. Un calentador a base de calentar una resistencia mediante energía eléctrica también tiene su COP. Y lo mismo para un calentador a base de quemar gas. En ninguno de los dos casos se trata de una bomba de calor porque no utilizan la energía que consumen para mover calor. En ambos casos se trata de la conversión directa de un tipo de energía en calor. ¿Cuál es el máximo posible COP de este tipo de calentadores?

- a) 0 b) 0.5 c) 1 d) 2

24. Es muy común ver que la potencia de los aires acondicionados se mida en toneladas. Al respecto hay una anécdota que cuentan los técnicos que instalan estos equipos, sobre una persona a la que le dijeron que le instalarían en su casa un aparato de dos toneladas. A lo que la persona les respondió: ¿Y cómo van a subirlo al segundo piso siendo tan pesado? La confusión se debe a la historia: hace más de cien años se utilizaba como medida de enfriamiento el calor necesario para fundir una tonelada de hielo en 24 horas. El hielo se recogía de los ríos congelados en invierno y se vendía para utilizarse en verano. Lo de una tonelada se refería a lo que se llama una tonelada corta (907 kg), y en lo relativo al enfriamiento se refería al calor que absorbe esa tonelada de hielo para convertirse en agua en 24 horas. Los datos son: se requieren 80 calorías para fundir un gramo de hielo, y una caloría equivale a 4.184 joules. ¿Cuántos joules se necesitan para fundir una tonelada corta de hielo?

- a) 160,458 b) 260,567
c) 303,591 d) 424,569

25) La unidad de tonelada en los aires acondicionados se refiere a fundir esa cantidad de hielo en 24 horas, por lo que se trata de una unidad de potencia. ¿Cuál es esta potencia en watts?

- a) 514 b) 1,514 c) 2,514 d) 3,514

26) El periodo geológico en el que sitúan una Tierra con temperaturas promedio muy bajas (prácticamente toda la Tierra congelada incluidos los océanos) se conoce como

- | | |
|------------|---------------|
| a) Pérmico | b) Glacial |
| c) Rodinio | d) Criogénico |

27) En el tiempo de La Tierra Bola de Nieve los continentes que existían estaban todos juntos en un super-continente llamado

- | | |
|-------------|-------------|
| a) Pangea | b) Rodinia |
| c) Gondwana | d) Laurasia |

28) La Tierra Bola de Nieve es anterior a la apertura del Océano Atlántico. ¿Cuántas veces?

- a) 2 b) 4 c) 6 d) 8

29) La Tierra Bola de Nieve es anterior a la extinción de los dinosaurios. ¿Cuántas veces?

- a) 2 b) 3 c) 5 d) 10

30) La Tierra bola de Nieve es anterior a la apertura del Mar de Cortés. ¿Cuántas veces?

- a) 10 b) 20 c) 30 d) 60

Interpretación de lineamientos estructurales en Nayarit, México, aplicando sensores remotos y software libre

Carrilo de la Cruz, Juan Luis¹, Felipe de Jesús Escalona Alcázar²

Araceli Zamora Camacho¹, Francisco Javier Nuñez Cornú¹

¹Centro de Sismología y Volcanología de Occidente (SisVOc), Universidad de Guadalajara
Av. Universidad 203, Del. Ixtapa, C.P. 48280, Puerto Vallarta, Jalisco.

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

juanluiscc9@gmail.com

Resumen

La aplicación de los sensores remotos facilita la interpretación y análisis de grandes áreas del territorio en relativamente poco tiempo. En este trabajo se realizó el procesamiento e interpretación de lineamientos estructurales de una imagen Landsat 7 ETM+ (Path 030, Row 045) del 30 de octubre de 2001, de la parte centro-occidental del estado de Nayarit, México con los programas QGIS y SAGA. Se aplicó la composición de colores en los diferentes canales RGB (432 y 754) y también se aplicó un Análisis de Componentes Principales (ACP) a 6 bandas del sensor (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta-1 e infrarrojo de onda corta-2) y el filtrado direccional del primer resultado del Análisis de Componentes Principales (ACP1). El objetivo de este procesamiento fue resaltar los rasgos lineales del terreno que pudieran estar asociados con lineamientos estructurales. Como resultado de este análisis se obtuvo una rosa de fracturas en la cual se observó una dirección preferente NW-SE. Los lineamientos interpretados se pueden asociar al origen y desarrollo del Graben Tepic-Zacoalco, en el límite NW del Bloque Jalisco y aportan una mejor definición de estructuras que no estaban definidas en mapas regionales anteriores.

Palabras clave: Sensores remotos, lineamientos estructurales, software libre, QGIS, SAGA.

Abstract

Remote sensing analyses permit the study of large areas in a short time and simplify the selection of target zones for detailed exploration. Spatial analysis with commercial software is usually expensive (*e.g.* ArcGIS). In recent years, free software like "Quantum Geographic Information System" (QGIS) and "System for Automated Geoscientific Analyses" (SAGA), are competitive for analytic purposes and for their displaying capabilities. Both software are useful for the analysis and interpretation of satellite Landsat 7 ETM+ and Digital Terrain Model (DTM).

We used the QGIS and SAGA software to analyze and interpret structural lineaments from a Landsat 7 ETM+ image (Path 030, Row 045 of October 30th, 2001) of the West-Central part of Nayarit, Mexico. We used the composite color bands in RGB together with Principal Component Analysis (PCA) of six bands (Blue, Green, Red, Near Infrared, Short-wave infrared-1 and Short-wave infrared-2). The final map show a NW-SE main trend of structural lineaments which are oriented parallel to the NW edge of the Jalisco block. It is proposed that they were formed during the evolution of the Tepic-Zacoalco graben.

Keywords: Remote sensing, structural lineaments, free software, QGIS, SAGA

Introducción

En años recientes se ha vuelto común el uso de software libre para el procesamiento de imágenes digitales. Dicho software cada día tiene mayor capacidad de análisis, edición e intercambio de información con software comercial, además de facilitar la enseñanza de metodologías para el procesamiento de imágenes de satélite porque es accesible a cualquier persona o institución. El análisis espacial se puede realizar con Sistemas de Información Geográfica comerciales cuyo costo es elevado (*p. ejem.* ArcGIS). En años recientes, el desarrollo de software libre, como “Quantum Geographic Information System (QGIS)” y “System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)”, compiten con los programas comerciales en la capacidad de análisis y en la forma de desplegar la información. Estos programas proporcionan las herramientas para procesar e interpretar imágenes Landsat 7 ETM+ y Modelos Digitales del Terreno (MDT).

Una de las grandes ventajas de la percepción remota se debe a que facilita explorar grandes áreas en poco tiempo porque el procesamiento de las imágenes puede resaltar rasgos geológicos superficiales, en particular, los rectilíneos asociados con fallas o sistemas de fractura. Las fallas son superficies a lo largo de las cuales ha habido desplazamiento, por lo que los bloques afectados pueden poner en contacto unidades litológicas con características físicas diferentes. La traza de un plano de falla, aunque no sea visible por estar cubierto por vegetación o suelo, puede inferirse a partir de las tendencias lineales en la morfología o por contrastes en la tonalidad de las superficies, o el tipo de vegetación.

El área de estudio está delimitada por las coordenadas geográficas extremas 21°44'59.8" N, 105°30'1.1"W y 21°15'0.8"N, 104°44'59.8"W que corresponden a un sector del occidente y centro del estado de Nayarit (Figura 1). En esta región hay una deformación activa por la interacción entre las placas Rivera y Norteamérica, a la que incluso se ha asociado el desarrollo del graben Tepic-Zacoalco, que es el límite norte del bloque Jalisco (Ferrari et al. 2013). Más que discutir sobre la historia tectónica de la región, o sobre el origen

de las fallas, el objetivo de este trabajo es proponer una forma alternativa de identificar estructuras asociadas con el fenómeno de fallamiento a partir de imágenes de satélite.

Se realizó la interpretación, procesamiento y análisis de lineamientos estructurales de una imagen Landsat 7 ETM+ (Path 030, Row 045) del 30 de octubre de 2001, utilizando los criterios definidos por Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma (1995), Amri et al. (2011) y Ehsan (2012), los cuales consisten básicamente en aplicar filtros direccionales que son definidos en forma matricial. Los resultados obtenidos a partir de los filtros direccionales se compararon con los datos estructurales reportados en la literatura geológica, los cuales fueron obtenidos a partir de la cartografía de campo, o interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas.

Fallas regionales

El área de estudio tiene una historia tectónica compleja y la edad de la deformación y las estructuras asociadas aún es materia de debate (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 2013). Los rasgos estructurales de la región son el resultado de eventos tectónicos a los que se puede asociar la apertura del Golfo de California y separación de la península de Baja California del macizo continental de México y, en consecuencia, el desarrollo del bloque Jalisco y los graben que lo limitan (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 2013). En los estudios estructurales hechos en el graben de Tepic-Zacoalco y en el estado de Nayarit por Nieto et al. (1985), Ferrari et al. (1994 y 2013) y Duque-Trujillo et al. (2014) se han identificado tres tendencias preferentes de fallas. La deformación más antigua es probablemente de finales del Oligoceno o principios del Mioceno y formó fallas normales cuya orientación varía de N-S a NNE-SSW (Duque-Trujillo et al. 2014). Esta tendencia se observa en el oriente del estado de Nayarit (Ferrari et al. 2013; Duque-Trujillo et al. 2014) y continúa hasta cerca de Tequila, Jalisco, aunque en esta última zona no representa la orientación dominante (Nieto et al. 1985). La segunda etapa de deformación se considera del Mioceno Temprano a

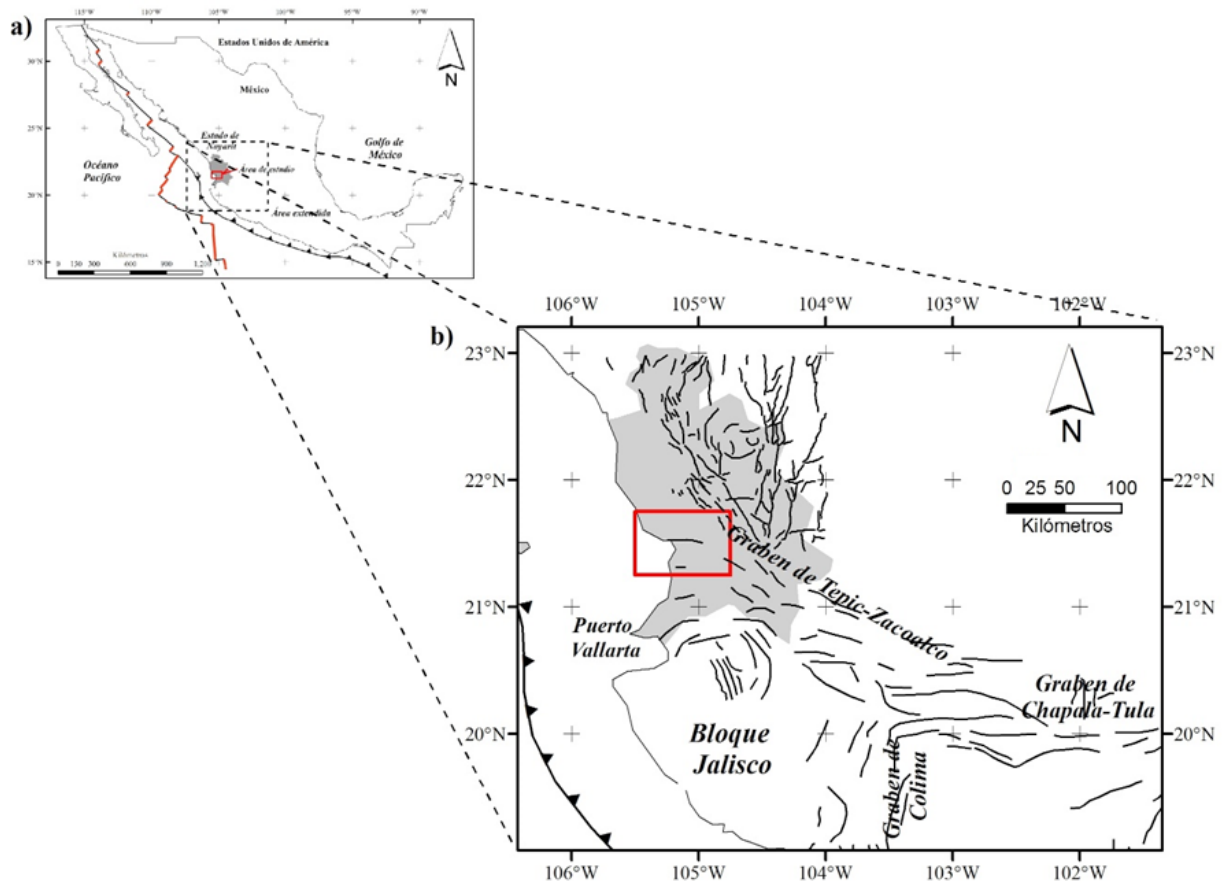


Figura 1. Ubicación del área de estudio (rectángulo rojo). a) Estado de Nayarit (gris), área de estudio y rasgos tectónicos principales. b) Acercamiento al área de estudio con los rasgos estructurales regionales tomados de Ferrari et al. (2003) y de Rutz-López y Núñez-Cornú (2011).

Medio (Duque-Trujillo et al. 2014), y se caracteriza por el desarrollo de fallas normales con orientación preferente NW-SE que es la tendencia dominante en la mayor parte del estado de Nayarit y en el graben de Tepic-Zacoalco (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994 y 2013; Duque-Trujillo et al. 2014). La última etapa de deformación es del Mioceno Tardío (Duque-Trujillo et al., 2014) o posiblemente del Plio-Cuaternario (Ferrari et al. 1994), a la que se atribuye la formación de fallas oblicuas y de desplazamiento lateral orientadas E-W y NE-SW.

En síntesis, hay cuatro tendencias preferentes de fallas: N-S a NNW-SSE, NW-SE, E-W y NE-SW, las cuales han sido identificadas a partir de trabajo de campo (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994 y 2013; Duque-Trujillo et al. 2014).

Metodología

La imagen del 30 de octubre de 2001 fue descargada de la página Earth explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). De la imagen se seleccionó esta área con la intención de correlacionar la sismicidad poco profunda asociada al rift Tepic-Zacoalco, del que se compilaron y procesaron sus rasgos estructurales siguiendo el procedimiento que se describe a continuación.

Composición RGB

Al modelo digital del terreno (MDT) se le agregaron distintas composiciones RGB (Rojo, verde y azul, por sus siglas en inglés). La primera fue la 432 en

falso color para resaltar la vegetación en tonos de rojo y las áreas urbanas en cian (Figura 2a) (Fernández-Coppel y Herrero-Llorente, 2001). La composición 754 (Figura 2b) permite visualizar mejor el terreno porque no incluye las bandas visibles.

Filtrado de las imágenes

Los filtros espaciales que se utilizaron en el procesamiento de las imágenes de satélite tienen como objetivo resaltar rasgos lineales de la morfología. El procesamiento resalta rasgos que no son solamente naturales sino también antropogénicos (p. ejem. líneas de transmisión de electricidad, cultivos, etcétera). Por ello, es necesario conocer la infraestructura y áreas agrícolas de la región y así distinguirlas de los rasgos geológicos.

El filtrado se realizó por medio de una convolución espacial del tipo Prewitt (Aldalur y Santamaría, 2002). Tanto Fernández de la Vega-Márquez et al. (2001) como Aldalur y Santamaría (2002) utilizaron los filtros Prewitt para definir componentes direccionales usando algoritmos de convolución. De esta manera se pudieron resaltar bordes y segmentos de líneas de los que son perpendiculares al kernel (matriz móvil con un número impar de valores en cada dimensión) aplicado. Debido a que hay cuatro tendencias preferentes de orientación de lineamientos, las máscaras de convolución utilizadas fueron:

$$N - S = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad E - W = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$NW - SE = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad NE - SW = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

Además, en el Análisis de las Componentes Principales (ACP) se aplicó la metodología propuesta por Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma (1995). El ACP se aplicó a seis bandas espectrales (Thematic Mapper) y se excluyó la banda 6 por ser banda térmica (Tabla 1). El ACP permite reducir la cantidad de información de los datos originales porque la

mayor parte de la información se concentra en las componentes principales (ACP1 a ACP6; Tabla 1) (Mehl y Peinado, 1997). El ACP se realizó con el *plugin PCA (Principal Component Analysis* por sus siglas en inglés) para QGIS ver. 2.8.2 (Figura 3) (Stravos, 2014).

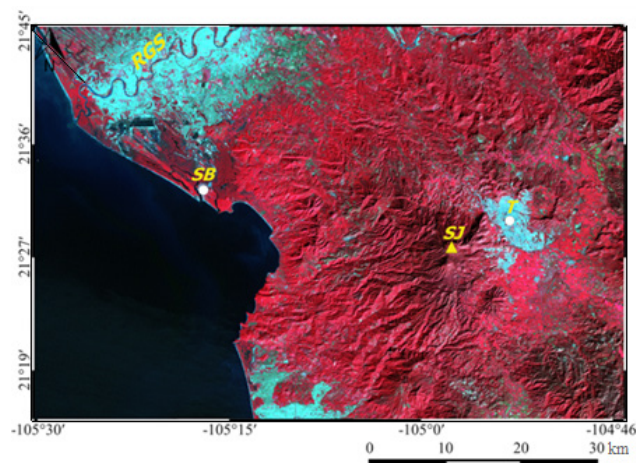


Figura 2a) Composición RGB 432 con el MDT superpuesto en donde destaca la abundante vegetación (rojo) y tonos de azul intenso en zonas urbanas.

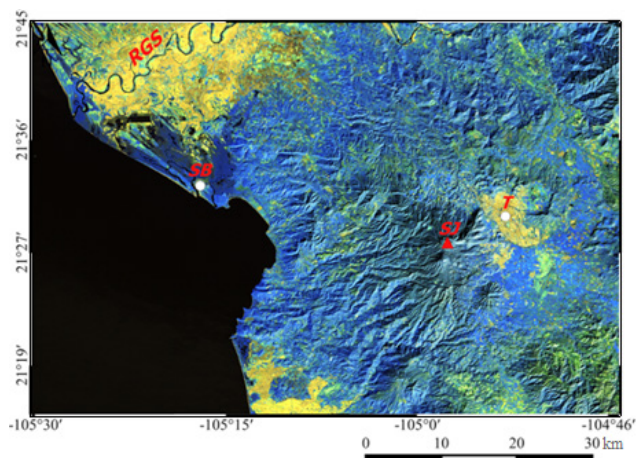


Figura 2b) Composición RGB 754 con MDT superpuesto. En esta composición la vegetación cambia a tonos de azul, mientras que las áreas urbanas están con los tonos de amarillo más claro. T= Tepic, SB= San Blas, RGS= Río Grande de Santiago, SJ=volcán San Juan..

Tabla 1. Estadísticas del análisis de componentes principales. Las abreviaturas son: Cov.=Covarianza, PC= Componente Principal y TM= Banda Temática del Sensor Landsat.

Matriz de correlación	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
TM1	1	0.811	0.806	-0.111	0.323	0.614
TM2	0.811	1	0.947	0.382	0.745	0.873
TM3	0.806	0.947	1	0.246	0.725	0.92
TM4	-0.111	0.382	0.246	1	0.765	0.452
TM5	0.323	0.745	0.725	0.765	1	0.895
TM7	0.614	0.873	0.92	0.452	0.895	1
	APC1	APC2	APC3	APC4	APC5	APC6
Cov. Eigenvalores	4.29	1.381	0.236	0.059	0.022	0.013
Suma de Eigenvalores	4.29	5.671	5.907	5.965	5.987	6
Porcentajes (%)	71.5	23	3.9	1	0.4	0.2

Abreviaturas: Cov.=Covarianza, PC= Componente Principal y TM= Banda Temática del Sensor Landsat.

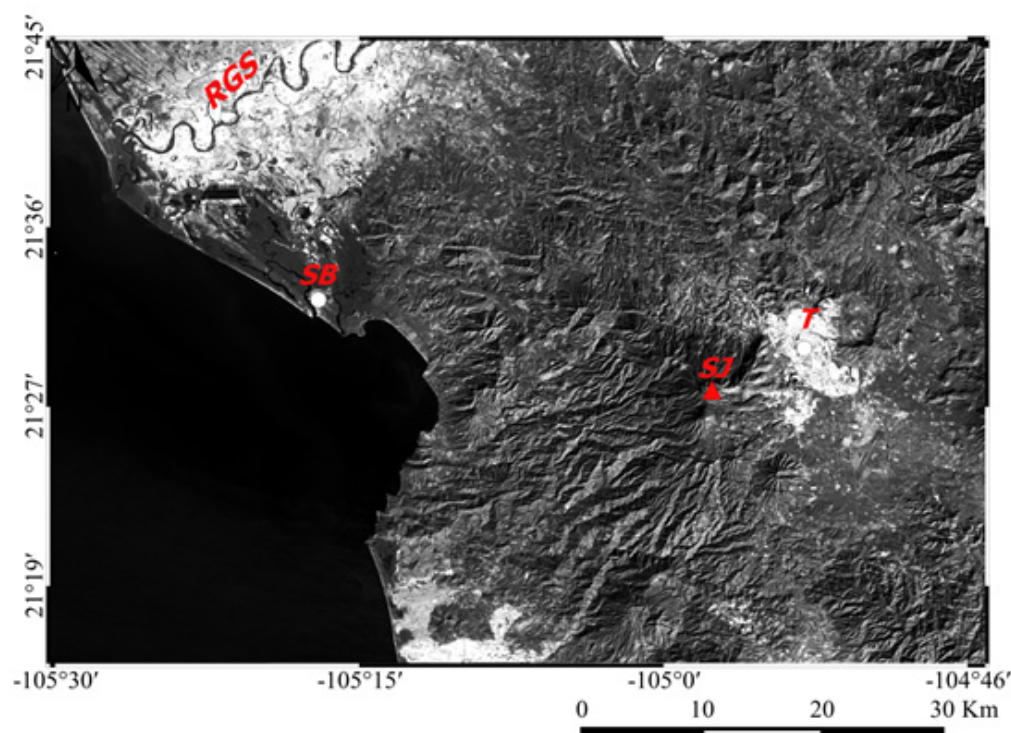


Figura 3. Resultado del ACP denominada imagen ACP1, utilizada para procesamientos posteriores ya que concentra el 71.5% de la información de la imagen original, en contraste con las otras pruebas (Tabla 1). T= Tepic, SB= San Blas, RGS= Río Grande de Santiago, SJ=San Juan.

El Primer Análisis de Componentes Principales (ACP1) concentra el 71.5 % de la información de la imagen original, razón por la que se utilizó para la aplicación de los filtros subsecuentes. El primero fue un filtro pasa-bajas para reducir el ruido provocado por las altas frecuencias. A la imagen resultante se le aplicó un filtro direccional y nuevamente un filtro pasa-bajas para eliminar el ruido provocado por la convolución direccional (Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1995). Todos los filtros se realizaron con la herramienta Simple Filter de SAGA GIS del programa QGIS. En los filtros se ingresaron los valores de las máscaras de convolución que permitieron filtrar las imágenes en las direcciones NS, E-W, NE-SW y NW-SE.

El último paso consistió en agregar a las imágenes filtradas una composición RGB (Amri et al. 2011). En el canal R (rojo) se colocó el filtro NW-SE, en el G (verde) el N-S y en el B (azul) el filtro NE-SW (Figura 4). Los lineamientos estructurales interpretados se muestran en la Figura 5, los cuales se ponderaron tomando en cuenta el tamaño del menor de ellos que es de 1.5 km y, a partir de esa longitud, se hizo una retícula con cuadros de 1.5 km de lado. De esa forma se contaron los lineamientos y se midió la orientación de los lineamientos interpretados. En total, se midieron 580 azimuts con los que se hizo el diagrama de rosa de la Figura 5.b en el programa *GeoRose* de *Young Technology* (2015).

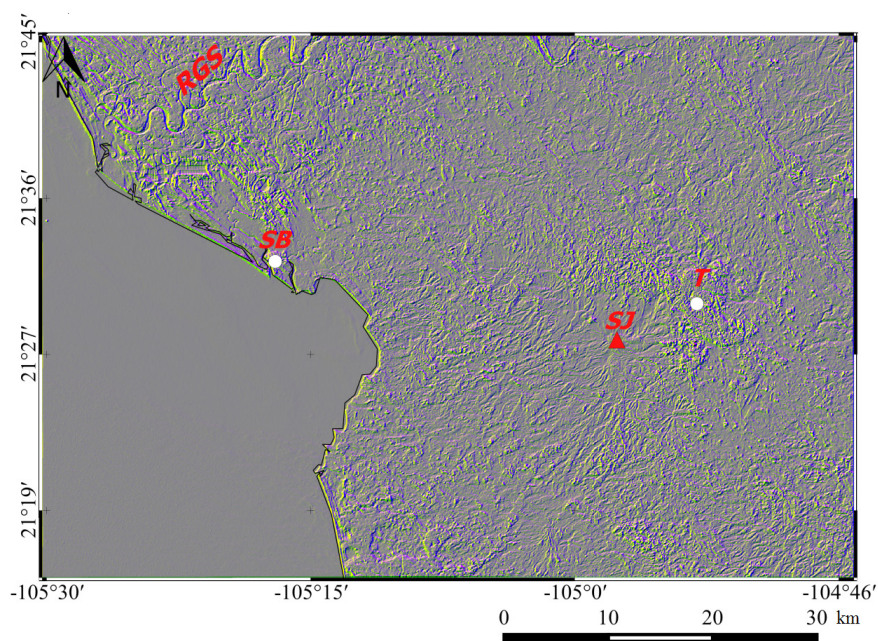


Figura 4. Imagen RGB con el filtrado direccional: R (NW-SE), G (N-S) y B (NE-SW). Los filtros resaltan los principales lineamientos estructurales del área de estudio. T= Tepic, SB= San Blas, RGS= Río Grande de Santiago, SJ=San Juan.

Discusión y conclusiones

El filtrado direccional de las imágenes tipo Landsat es una herramienta útil para resaltar los lineamientos estructurales con distintos tipos de cobertura vegetal, suelo y geología (p.ejem. Cengiz et al. 2006; Solomon y Ghebreab, 2006; Meshkani et al. 2013). La orientación y distribución de los lineamientos estructurales interpretados a partir del procesamiento de imágenes de satélite es paralela a las fallas y fracturas reportadas en artículos científicos (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994 y 2013; Duque-Trujillo et al. 2014). El procesamiento digital resalta los lineamientos estructurales cuando éstos tienen una expresión morfológica.

En el área de estudio los lineamientos estructurales interpretados están asociados con fallas o fracturas cuya orientación preferente es NW-SE. En menor proporción se observan tendencias hacia el E-W, NE-SE y N-S a NNE-SSW, en ese orden de abundancia (Figura 5). Estas orientaciones preferentes son paralelas a las que se han descrito con diferentes niveles de detalle en el graben de Tepic-Zacoalco y en el estado de Nayarit (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994 y 2013; Duque-Trujillo et al. 2014). En estos trabajos las tendencias obtenidas son hacia el NW-SE, E-W, N-S y NE-SW y corresponden con fallas normales y, en menor proporción, de desplazamiento lateral formadas desde el Mioceno Tardío al Cuaternario (Nieto et al. 1985; Ferrari et al. 1994; Ferrari y Rosas-Elguera, 1999; Ferrari et al. 2003; Duque-Trujillo et al. 2014). En la Figura 1 se destaca que los dos lineamientos que aparecen en la parte central del recuadro se orientan E-W y difieren de la tendencia preferente $295^{\circ} \pm 10^{\circ}$. La tendencia es similar a la del Graben Tepic-Zacoalco y claramente difiere de la tendencia 60° - 75° que se desarrolla hacia el oriente de Puerto Vallarta, así como de la tendencia NW (315°) que define el río Ameca en el límite norte del Bloque Jalisco. Los filtros direccionales utilizados en el procesamiento de la imagen resaltan las tendencias lineales de la morfología asociada con un patrón de

estructuras regionales que difiere de la tendencia E-W reportada anteriormente por Ferrari et al. (2003) y Rutz-López y Núñez-Cornú (2011), según se muestra en la Figura 1b.

Referencias

- Amri, K., Yamina, M., Lazha, G., 2011, Use of Landsat 7 ETM+ for lithological and structural mapping of Wadi Afara Heouine area (Tahifet-Central Hoggar, Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, v. 4, p. 1273-1287.
- Aldalur, B., Santamaría, M., 2002, Realce de imágenes: filtrado espacial. *Revista de Teledetección*, v. 17, p. 31-42.
- Cengiz, O., Sener, E., Yagmurlu, F., 2006, A satellite image approach to the study of lineaments, circular structures and regional geology in the Golcuk Crater district and its environs (Isapata, SW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 27, p. 155-163.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Norini, G., López-Martínez, M., 2014, Miocene faulting in the southwestern Sierra Madre Occidental, Nayarit, Mexico: kinematics and segmentation during the initial rifting of the southern Gulf of California. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 31, p. 283-302.
- Ehsan, G., 2012, Investigation of lineaments in Tehran province on the basis of remote sensing techniques. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, v. 3, p. 339-350.
- Fernández-Coppel, I.A., Herrero-Llorente, E., 2001, El satélite Landsat: Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ satélite Landsat. Universidad de Valladolid, España, 37 pp.
- Fernández-de la Vega-Márquez, T., Prol-Ledesma, R.M., Orozco, G., 2001, Hydrothermal alteration and main structures mapping using TM images in La Primavera geothermal field (Mexico). *Geofísica Internacional*, v. 40, p. 147-162.
- Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas, S., Castillo, D., Romero, F., 1994, Regional tectonics of western Mexico and its implications for

- the northern boundary of the Jalisco block. *Geofísica Internacional*, v. 33, p. 139-151.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., Solari, L., 2013, Late Oligocene to Middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: The beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere*, v. 9, p. 1161-1200.
- Mehl, H., Peinado, O., 1997, Fundamentos del procesamiento digital de imágenes. Reporte. Universidad Autónoma de Baja California Sur, 24 pp.
- Meshkani, S.A., Mehrabi, B., Yaghubpur, A., Sadeghi, M., 2013, Recognition of the regional lineaments of Iran: Using geospatial data and their implications for exploration of metallic ore deposits. *Ore Geology Reviews*, v. 55, p. 48-63.
- Nieto, J., Delgado, L., Damon, P.E., 1985, Geochronologic, petrologic, and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and the Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, v. 24, p. 623-663.
- Ruiz-Armenta, J.R., Prol-Ledesma, R.M., 1995, Técnicas de procesamiento de imágenes en la exploración de yacimientos minerales de origen hidrotermal. *Física de la Tierra*, v. 7, p. 105-137.
- Solomon, S., Ghebreab, W., 2006, Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea. *Journal of African Earth Sciences*, v. 46, p. 371-378.

Recepción del manuscrito: 9 de mayo de 2016

Recepción del manuscrito corregido: 10 de agosto de 2016

Aceptación: 6 de septiembre de 2016

Políticas editoriales

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

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

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

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

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

Instrucciones para los autores

Publicar en GEOS es gratuito, todos los manuscritos deberán enviarse en forma electrónica a cualquiera de los editores principales:

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

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

Preparación de texto:

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

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

Secciones:

Preparación de figuras e ilustraciones:

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

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

Resumen:

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

Introducción:

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

Metodología:

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

Resultados:

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

Discusiones y conclusiones:

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

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

Referencias

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

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

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

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

Formato para citas:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ripa, P. y Velázquez, G. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California, *Geofísica Internacional*, 32 (1), 41-56. Recuperado de: [http://](http://www.raugm.org.mx/publicaciones/GeofisicaInternacional/GI%201993%20V.32/GI%201993%20V.32%20N.1%20p.%2041.pdf)

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

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

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

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

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

Unidades

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

densidad en g/cm³
presión en bar

Expresiones matemáticas

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

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

Recordamos a todos los miembros de la Unión Geofísica Mexicana, A.C.
que la cuota es de \$300.00 para investigadores
y \$150.00 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

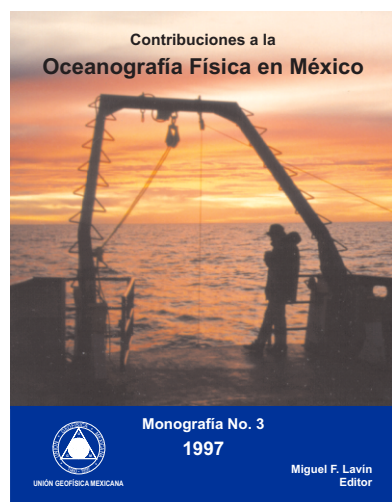
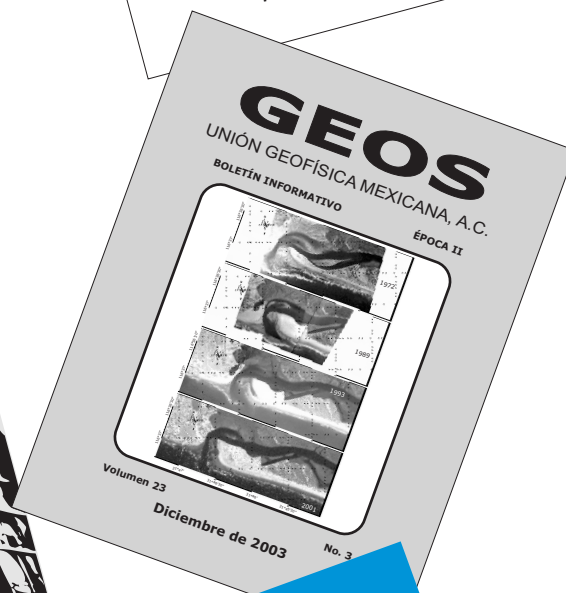
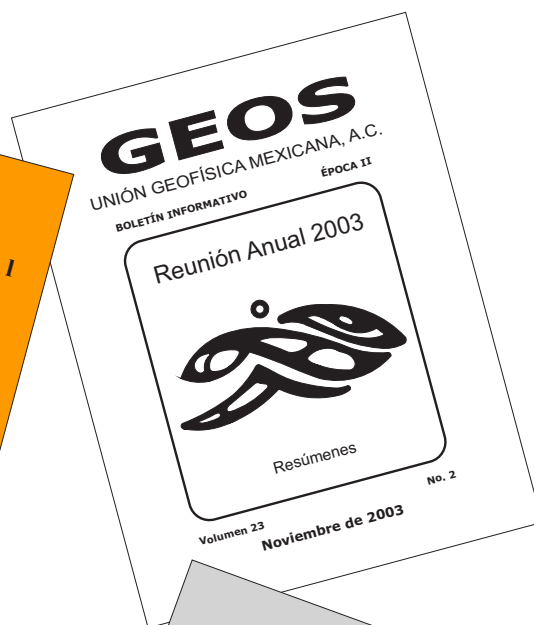
Instituciones:	Comerciales y Gubernamentales	Académicas
Página completa	\$4,000.00	\$2,000.00
Media página	\$2,000.00	\$1,000.00

GEOS

Información con:

Ivonne Pedrín Morales
División de Ciencias de la Tierra
Tel: 01(646)175-05-00
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.