

## **Análisis geoestadístico de las barrancas Colorada y Quimichule del volcán Popocatepetl (México) como aporte a la prevención de desastres naturales**

**Rogelio Ramos-Aguilar<sup>1</sup>**, rogelio.ramos@correo.buap.mx, **Patricia Máximo-Romero<sup>1</sup>**, **Blanca Susana Soto-Cruz<sup>2</sup>**, **Salvador Alcántara-Iniesta<sup>2</sup>** y **María de la Cruz Vázquez-García<sup>3</sup>**

### **RESUMEN**

Este trabajo se presenta como una contribución a la prevención de desastres naturales y para generar un complemento a otros estudios semejantes. El volcán Popocatepetl ha presentado actividad importante y constante desde el año 1994. Dentro de su estructura geológica se localizan las barrancas Colorada y Quimichule, que por sus características topográficas, el material volcánico expulsado y las lluvias torrenciales que se han presentado en los últimos años, ponen en riesgo a las poblaciones cercanas. Se presenta un análisis geoestadístico para obtener la aceleración de la gravedad, la pendiente por distancia-elevación, la altura-gravedad y la fuerza de un líquido sobre las barrancas. La conversión de coordenadas UTM a geográficas se hizo con el programa Traninv aplicando el Datum ITRF2008 y la zona 14, la gravedad local se calculó con el programa Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) y el análisis estadístico con el Geoestatistical Enviromental Assessment. La modelación estructural se realizó con Surfer y se utilizaron modelos hidrológicos para calcular el gasto y la fuerza. Del análisis de correlación se concluyó que la barranca con mayor gravedad es la de Quimichule, la que transportaría con mayor velocidad flujos de lodo con ceniza volcánica. Se aplicaron las técnicas y modelos cartográficos, geomorfológicos y estadísticos acordes al estudio, para obtener los resultados presentes.

**Palabras clave:** desastre natural, geoestadística, fuerza, aceleración, gravedad.

## **Geostatistical analysis of the Quimichule y Colorada canyons from Popocatepetl (México) volcano as a contribution to the prevention of natural disasters**

### **ABSTRACT**

This paper aims to contribute to the prevention of natural disasters and generate a complement to other similar studies. The Popocatepetl volcano has showed significant and constant activity since 1994. Within its geologic structure are located Colorada and Quimichule streams, due to its topographic features, volcanic material ejected and torrential rains in last years the mentioned volcano hazards nearby towns. This work shows a geostatistical analysis to obtain the gravity acceleration, slope by the distance-elevation relation, height-gravity and the fluid force on streams. The conversion of UTM coordinates to geographical was made with the use of the program Traninv applying the ITRF2008 Datum and the 14 zone, the local gravity was calculated with the use of International Organization of Legal Metrology (OIML) and the statistical analysis was obtained with the use of Geoestatistical Enviromental Assessment. The structural modeling was performed with the use of Sufer and to calculate spending and force was used hydrological models. Correlation analysis concluded that Qumichule is the stream with major gravity and also this stream transport faster mudflows with ash. The techniques were applied and mapping, geomorphological and statistical models in accordance with the study to obtain the expected results, the application of other models would probably come to the same conclusions.

**Keywords:** natural disasters, geostatistical, force, acceleration, gravity.

Recibido el 19 de febrero de 2013, aceptado el 18 de julio de 2014.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 sur, C.U., Puebla, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 sur, C.U., Puebla, México.

<sup>3</sup> Bufete de Ingeniería en Telecomunicaciones y Sistemas. México, S. A. de C. V., José Toribio Medina 130. México, D. F.

## INTRODUCCIÓN

El volcán Popocatepetl se encuentra situado a los 19°17' de latitud Norte y a los 98°38' longitud Occidental del meridiano de Greenwich. Tiene una altura de 5.420 m.s.n.m y colinda con los estados de Puebla, Morelos y México. El volcán Popocatepetl inició en 1994 una etapa importante de actividad manifestando expulsión de vapor de agua, ceniza y roca incandescente, y eventos sísmicos. A partir de entonces, se ha mantenido activo con períodos de alta y baja intensidad. La constante actividad, las lluvias torrenciales atípicas causadas por el cambio climático, el deshielo del glaciar existente y la topografía, favorecen los deslizamientos de flujos de lodo con ceniza volcánica en las barrancas como la Colorada y Quimichule, mismos que están relacionados directamente con la gravedad, la pendiente, la altura y el gasto, y que pondrían en riesgo a las comunidades aledañas. Además, los cambios de presión generados por la actividad dentro de la cámara magmática producen deformación y variaciones de gravedad en la superficie del volcán, las que deben cuantificarse periódicamente. Después de la erupción de 1994, se realizó un estudio denominado Posible Flujo de Lodo en el Costado Oriente del Volcán Popocatepetl (GARCÍA *et al.* 1996). En este estudio se construyó un perfil de la barranca El Aguardientero y se calcularon sus pendientes cada 100 m de elevación, utilizando cartas topográficas del INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA a una escala 1:50.000, determinando que una de las zonas con mayor acumulación de ceniza es San Pedro Benito Juárez, por donde pasa la barranca El Aguardientero.

El presente trabajo se plantea como una contribución a la prevención de desastres naturales volcánicos, específicamente a través del desarrollo de metodologías

geoestadísticas. Contar con esta información servirá para determinar acciones de prevención en situaciones de actividad volcánica generadas por deshielo cuando exista una actividad volcánica mayor; actualmente se continúan estudios para calcular otras variables geomorfológicas.

Se han realizado estudios de estabilidad en barrancas aplicando métodos geotécnicos y de elementos finitos para determinar tensiones, deformaciones y resistencias al corte (FRANCO *et al.* 2009). Estos métodos están basados en modelos matemáticos que proporcionan una aproximación a la solución del problema, pero sin tomar en cuenta los métodos geodésicos para determinar la pendiente y la gravedad. Los métodos geodésicos proporcionan resultados más aproximados a la realidad, pues los datos que se inyectan a los programas de cómputo se obtienen a través de lecturas en cartas topográficas con una buena aproximación.

La localización de este volcán y la actividad que ha presentado en los últimos años, lo identifica como una estructura de riesgo para las comunidades que se encuentran cerca del mismo.

Con relación a este trabajo, no existe información de estudios o investigaciones similares en la zona del Popocatepetl, siendo importante conocer los posibles darían que se presentarían en el caso de una erupción mayor. La figura 1 muestra la topografía del área de estudio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Las coordenadas UTM del perfil de las barrancas se obtuvieron a través de la lectura de cartas topográficas digitales del volcán y que se encuentran a disposición de los usuarios en el sitio

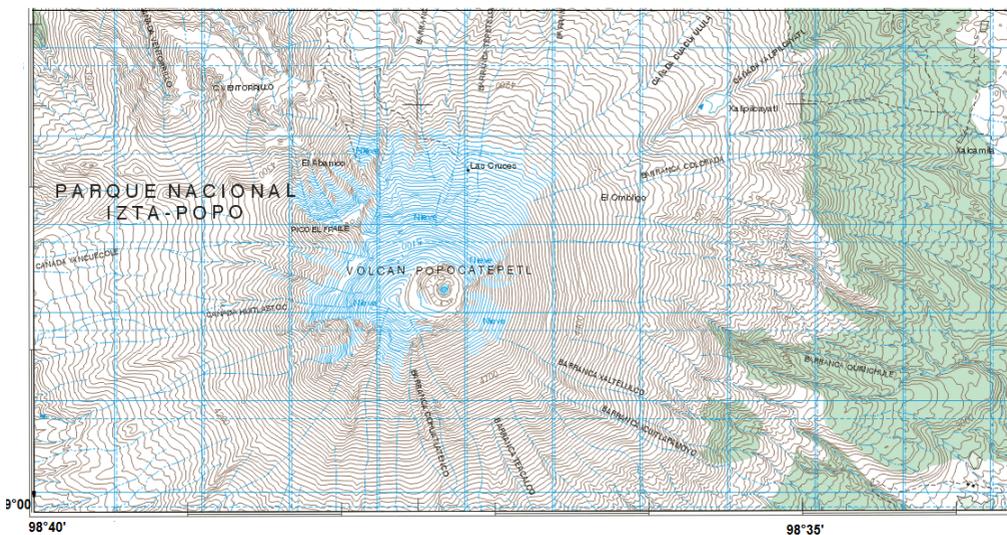
web del INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA. Con estas cartas se definieron los puntos donde se calcularon la aceleración de la gravedad, la pendiente por distancia-elevación y la gravedad-altura. Las coordenadas UTM se convirtieron a geográficas con el programa Traninv, aplicando el Datum ITRF2008 y la zona 14. Actualmente, toda la cartografía y productos digitales producidos por el INEGI, utiliza el que entró en vigor en diciembre de 2010 y que establece como marco de referencia oficial al ITRF2008 en época 2010.0 en sustitución del ITRF92 época 1988.0. liberando al mismo tiempo un software (Traninv) basado en el algoritmo matemático para la transformación o conversión de coordenadas de ITRF92 a ITRF2008, con lo cual se busca una transición suave hacia un nuevo sistema de referencia. La aceleración local de la gravedad se calculó con el programa que se encuentra en el sitio web del CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, basado en el boletín OIML-N° 127 de 1992.

El análisis estadístico se realizó con el *Geostatistical Enviromental Assessment* y la modelación estructural con el programa *Surfer*. Además, se utilizaron modelos hidrológicos para calcular el gasto y la fuerza de un líquido. Posteriormente, se obtuvieron las relaciones entre gravedad-altura y gravedad-pendiente, y los correspondientes coeficientes de correlación.

La correlación entre las tres variables estudiadas es importante porque define el comportamiento de flujos sobre las barrancas, con lo que se tendría una idea de la ubicación de la zona de mayor riesgo en esas estructuras geológicas.

### Conversión de coordenadas de los datos registrados

Para cada barranca los datos se obtuvieron de la carta topográfica E14B42, obteniendo las coordenadas UTM y posteriormente transformándolas a geográficas con el programa Traninv, donde  $X=W$  e  $Y=N$  (Fig.2).



**Fig. 1. Topografía del volcán Popocatépetl en el Parque Nacional Izta-Popo, México.**

**Fig. 1. Topography of Volcán Popocatépetl in the Izta-Popo National Park, México.**

TRANSFORMACION DE COORDENADAS			
[NAD27 a ITRF92]			
Coordenadas Geográficas			
NAD27		ITRF92	
Longitud	Latitud	Longitud	Latitud
98°12'56.5"W	19°01'12.4"N	98°12'57.379"W	19°01'14.900"N
-98.21569	19.02011	-98.21594	19.02081
Coordenadas en Proyección UTM			
Zona: 14			
NAD27		ITRF92	
x	y	x	y
582541.421	2103110.870	582514.154	2103313.555
Diferencia (ITRF92-NAD27)			
x		y	
-27.267		202.685	
Coordenadas en Proyección CCL (12, -102, 17.5, 29.5, 2500000, 0)			

Fig. 2. Modelo de transformación de las coordenadas de UTM a geográficas para todas las lecturas de las barrancas.

En las Tablas 1 y 2 se muestran los datos que fueron utilizados para el procesamiento cada 500 metros de longitud para cada barranca.

TABLA 1. LA BARRANCA COLORADA TIENE UNA LONGITUD DE 6.5 KM, POR LO QUE SE REALIZARON 13 LECTURAS (Z=ALTURA, N=LATITUD, W=LONGITUD, EN METROS).

"Datos"					
Punto	Latitud	Longitud	Z	W	N
1	19°02'04.2°	98°36'09.827°	4200	541805.29189908	2104565.59683705
2	19°02'08.988°	98°35'53.520°	4055	542281.71412205	2104714.52382324
3	19°02'11.112°	98°35'36.960°	3940	542765.33555756	2104780.79813034
4	19°02'15.864°	98°35'24.18°	3800	543138.27430897	2104927.04944176
5	19°02'17.303°	98°35'06.324°	3640	543659.93448173	2104973.45727285
6	19°02'19.428°	98°34'49.439°	3440	544153.19176827	2105039.48355822
7	19°02'19.428°	98°34'32.375°	3315	544652.15627396	2105040.68221700
8	19°02'12.336°	98°34'15.311°	3195	545151.65408519	2104823.66422687
9	19°02'11.220°	98°33'58.247°	3065	545650.70770577	2104791.38677296
10	19°02'06.072°	98°33'41.183°	2985	546149.78489721	2104633.40908685
11	19°02'00.168°	98°33'24.120°	2920	546649.21750056	2104453.92978774
12	19°01'49.619°	98°33'07.056°	2855	547149.02607009	2104130.92352549
13	19°01'48.107°	98°33'05.22°	2840	547202.93224521	2104084.34099710

TABLA 2. LA BARRANCA QUIMICHULE TIENE UNA LONGITUD DE 6.5 KM, POR LO QUE SE REALIZARON 13 LECTURAS (Z=ALTURA, N=LATITUD, W=LONGITUD, EN METROS).

<b>"Datos"</b>					
<b>Punto</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Z</b>	<b>W</b>	<b>N</b>
1	19°01'17.760	98° 35' 49.847°	3920	542391.91	2103140.27
2	19°01'09.012	98° 35' 36.060°	3680	542795.823	2102872.32
3	19°01'00.768	98° 35'21.803°	3500	543213.32	2102619.41
4	19°00'58.68	98° 35'05.856°	3360	543679.56	2102556.7
5	19°00'56.484	98° 34'49.008°	3250	544172.501	2102490.61
6	19°00'54.432	98° 34'32.808°	3150	544645.769	2102428.8
7	19°00'51.731	98° 34'16.32°	3080	545128.049	2102346.38
8	19°00'52.020	98° 34'01.050°	3030	545574.45	2102356.31
9	19°00'30.183	98° 33'46.368°	2990	546003.96	2102300.98
10	19°00'36.359	98° 33'40.572°	2900	546174.736	2101876.96
11	19°00'25.128	98° 33'30.600°	2840	546466.746	2101532.29
12	19°00'11.34	98° 33'23.507°	2780	546675.861	2101108.85
13	18°59'59.856	98° 33'14.148°	2730	546949.951	2100756.32

**Desarrollo para el cálculo de la gravedad local**

La aceleración de la gravedad es la manifestación de la atracción universal que impulsa los cuerpos hacia el centro de la Tierra, es fuerza que determina el peso de los cuerpos (FRANCO *et al.* 2005). La aceleración de la gravedad se denota por *g*

y se define como el incremento constante de la velocidad por unidad de tiempo, percibido por un cuerpo en caída libre, es inversamente proporcional a la masa  $m_0$  del cuerpo en kilogramos (kg):  $g=F/m_0$ . Para calcular la gravedad local de cada barranca se aplicó el programa recomendado por la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) (Fig. 3).



Fig. 3. Ejemplo del cálculo de la aceleración de la gravedad local.

Para corroborar los resultados de la gravedad en diferentes puntos de la barranca cada 500 metros de distancia, se utilizó la ecuación (1), misma que puede calcularse con una exactitud del orden 0.001%=100 ppm. Los

datos que se introducen son: altitud (m) y latitud norte (°). Este programa calcula la aceleración local de la gravedad aplicando la ecuación (1) (Tablas 3 y 4)

$$gl = [ge * (1 + (f' * \sin^2 \phi) - (F_4 * \sin^2 2\phi))] - (Dg * h) \quad (1)$$

Donde:

gl = Aceleración de la gravedad local (m/s<sup>2</sup>).

ge = 9.7803185 m/s<sup>2</sup>, aceleración de la gravedad en el Ecuador (φ = 0).

f' = 0.0053024 (aplastamiento gravitacional).

φ = Latitud en grados, minutos, segundos (00°00'00").

h = Altitud sobre el nivel medio del mar (m).

F<sub>4</sub> = 0.0000059

Dg = 0.000003086

**TABLA 3. BARRANCA COLORADA. SE CALCULÓ LA GRAVEDAD CADA 500 METROS, OBTENIÉNDOSE EL PROMEDIO DE 9.775309 M/S<sup>2</sup>.**

"CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN PARCIAL DE LA GRAVEDAD"												
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Latitud °			(Decimal)	sen °	sen ° 2	Fza.de gravedad local (gl)	Constantes para calcular la gravedad de un punto cualquiera, con latitud diferente al Ecuador (ge)	
	W	N		'	"	"						
1	541805.292	2104565.597	4200	19	02	4.2000	19.034500	0.106366	0.380208	9.772851	ge = 9.7803185 m/s <sup>2</sup> f' = 0.0053024 f4 = 0.0000059 Dg= 0,000003086 φ = (latitud del punto) h = (altura del punto) Aceleración parcial de la gravedad local ( gl )	
2	542281.714	2104714.524	4055	19	02	8.988	19.035830	0.106380	0.380253	9.773300		
3	542765.336	2104780.798	3940	19	02	11.112	19.036420	0.106386	0.380273	9.773655		
4	543138.274	2104927.049	3800	19	02	15.864	19.037740	0.106400	0.380318	9.774088		
5	543659.934	2104973.457	3640	19	02	17.303	19.038140	0.106405	0.380331	9.774582		
6	544153.192	2105039.484	3440	19	02	19.428	19.038730	0.106411	0.380351	9.775199		
7	544652.156	2105040.682	3315	19	02	19.428	19.038730	0.106411	0.380351	9.775585		
8	545151.654	2104823.664	3195	19	02	12.336	19.036760	0.106390	0.380284	9.775954		
9	545650.708	2104791.387	3065	19	02	11.220	19.036450	0.106387	0.380274	9.776355		
10	546149.785	2104633.409	2985	19	02	6.072	19.035020	0.106371	0.380226	9.776601		
11	546649.218	2104453.930	2920	19	02	0.168	19.033380	0.106354	0.380170	9.776801		
12	547149.026	2104130.924	2855	19	01	49.619	19.030450	0.106322	0.380071	9.777000		
13	547202.932	2104084.341	2840	19	01	48.107	19.030030	0.106318	0.380056	9.777046		
										gl = [ge * (1 + (f' * sen <sup>2</sup> φ) - (f4 * sen <sup>2</sup> 2φ))] - (Dg * h)		
										Sgl = 127,079015811		No.Datos 13
										Gravedad Promedio de la Barranca:		9,775308909

**TABLA 4. BARRANCA QUIMICHULE. SE CALCULÓ LA GRAVEDAD CADA 500 METROS OBTENIÉNDOSE EL PROMEDIO DE 9.776018**

"CÁLCULO DE LA ACELERACIÓN PARCIAL DE LA GRAVEDAD"												
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Latitud °			(Decimal)	sen °	sen ° 2	Fza.de gravedad local (gl)	Constantes para calcular la gravedad de un punto cualquiera, con latitud diferente al Ecuador (ge)	
	W	N		'	"	"						
1	541805.292	2104565.597	3920	19	01	4.2000	19.017833	0.106186	0.379643	9.773706	ge = 9.7803185 m/s <sup>2</sup> f' = 0.0053024 f4 = 0.0000059 Dg= 0,000003086 φ = (latitud del punto) h = (altura del punto) Aceleración parcial de la gravedad local ( gl )	
2	542281.714	2104714.524	3680	19	01	8.988	19.019163	0.106201	0.379688	9.774448		
3	542765.336	2104780.798	3500	19	01	0.768	19.016880	0.106176	0.379611	9.775002		
4	543138.274	2104927.049	3360	19	00	58.680	19.016300	0.106170	0.379591	9.775434		
5	543659.934	2104973.457	3250	19	00	56.484	19.015690	0.106163	0.379571	9.775773		
6	544153.192	2105039.484	3150	19	00	54.432	19.015120	0.106157	0.379551	9.776081		
7	544652.156	2105040.682	3080	19	00	51.731	19.014370	0.106149	0.379526	9.776297		
8	545151.654	2104823.664	3030	19	00	52.020	19.014450	0.106150	0.379529	9.776451		
9	545650.708	2104791.387	2990	19	00	50.183	19.013940	0.106144	0.379511	9.776574		
10	546149.785	2104633.409	2900	19	00	36.359	19.010100	0.106103	0.379381	9.776850		
11	546649.218	2104453.930	2840	19	00	25.128	19.006980	0.106070	0.379275	9.777033		
12	547149.026	2104130.924	2780	19	00	11.340	19.003150	0.106028	0.379146	9.777216		
13	547202.932	2104084.341	2730	18	59	59.856	18.999960	0.105994	0.379038	9.777369		
										gl = [ge * (1 + (f' * sen <sup>2</sup> φ) - (f4 * sen <sup>2</sup> 2φ))] - (Dg * h)		
										Sgl = 127,088231465		No.Datos 13
										Gravedad Promedio de la Barranca:		9,776017805

**Cálculo de la pendiente**

La pendiente es la relación que existe entre el desnivel y la distancia en horizontal al plano, lo que equivale a la tangente del ángulo que forma la línea a medir con el eje X. Ver ecuación (2).

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad 2)$$

A través de las curvas de nivel en la carta topográfica y aplicando el método de interpolación, se determinó la pendiente de las barrancas tomando lecturas cada 500 metros a lo largo del cauce. También se calculó el promedio aritmético para los puntos en cada barranca (SPIEGEL 2000) (Tablas 5 y 6).

**TABLA 5. BARRANCA COLORADA.**

<b>"Cálculo de la pendiente de la Barranca"</b>						
Pto.	COORDENADAS		ALTURA (A)	Distancia	m = $\frac{A_2 - A_1}{500}$	
	W	N				
Pendiente Cauce No. 1						
1	541805.292	2104565.597	4200			$\Sigma(m_1+m_2\dots) = -2.560000000$  Pendiente promedio de la Barranca <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">-0.196923077</div> Punto alto <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 2px auto;">4200</div> Punto Bajo <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 2px auto;">2840</div> Distancia <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 2px auto;">6500</div> Pendiente entre puntos <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 2px auto;">-0.209230769</div>
2	542281.714	2104714.524	4055	500	-0.29000	
3	542765.336	2104780.798	3940	500	-0.23000	
4	543138.274	2104927.049	3800	500	-0.28000	
5	543659.934	2104973.457	3640	500	-0.32000	
6	544153.192	2105039.484	3440	500	-0.40000	
7	544652.156	2105040.682	3315	500	-0.25000	
8	545151.654	2104823.664	3195	500	-0.24000	
9	545650.708	2104791.387	3065	500	-0.26000	
10	546149.785	2104633.409	2985	500	-0.16000	
11	546649.218	2104453.930	2920	500	-0.13000	
12	547149.026	2104130.924	2855	500	-0.13000	
13	547202.932	2104084.341	2840	500	-0.03000	

**TABLA 6. BARRANCA QUIMICHULE.**

<b>"Cálculo de la pendiente de la Barranca"</b>						
Pto.	COORDENADAS		ALTURA (A)	Distancia	m = $\frac{A_2 - A_1}{500}$	
	W	N				
Pendiente Cauce No. 1						
1	542391.910	2103140.269	3920			$\Sigma(m_1+m_2\dots) = -2.160000000$  Pendiente promedio de la Barranca <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">-0.166153846</div> Punto alto <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 2px auto;">3920</div> Punto Bajo <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 2px auto;">2730</div> Distancia <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 2px auto;">6500</div> Pendiente entre puntos <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 2px auto;">-0.183076923</div>
2	542795.823	2102872.318	3680	500	-0.48000	
3	543213.320	2102619.414	3500	500	-0.36000	
4	543679.560	2102556.697	3360	500	-0.28000	
5	544172.501	2102490.609	3250	500	-0.22000	
6	544645.769	2102428.804	3150	500	-0.20000	
7	545128.049	2102346.380	3080	500	-0.14000	
8	545574.450	2102356.312	3030	500	-0.10000	
9	546003.960	2102300.982	2990	500	-0.08000	
10	546174.736	2101876.963	2900	500	-0.18000	
11	546466.746	2101532.286	2840	500	-0.12000	
12	546675.861	2101108.854	2780	500	-0.12000	
13	546949.951	2100756.324	2730	500	-0.10000	

**RESULTADOS**

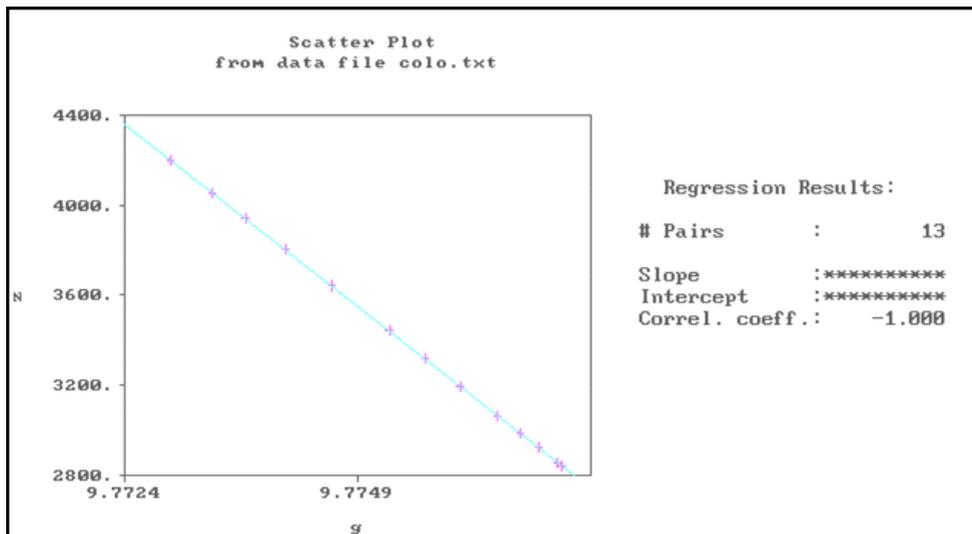
**Análisis geoestadístico con el programa Geoeas**

Utilizando el programa Geoeas, el cual genera gráficas de probabilidad normal ponderada de las variables forzantes (gravedad y altura), se obtuvo el comportamiento estadístico de dispersión con el modelo de regresión lineal de la matriz de variables analizadas, cuyo coeficiente de correlación para cada barranca procesada es cercano a -1 (fig. 4). Con una sobreposición del modelo surfér y la representación estadística desplegada, se observa la coincidencia entre los datos procesados y los modelados. También, se elaboraron gráficas que muestran el comportamiento de cada una de las variables consideradas (RAMOS et al. 2012). La estadística aplicada permitió

interrelacionar perfiles de correlación entre varianzas, covarianzas, medias y rangos.

Se realizó el análisis geoestadístico de las barrancas, calculándose para cada una la desviación estándar que permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media, y la covarianza, medida de dispersión conjunta de dos variables estadísticas (RAMOS et al. 2010). Las medidas anteriores se utilizaron para obtener el coeficiente de correlación, cuyo resultado en general para cada barranca se aproxima a -1. Para efectos estadísticos se hizo un análisis con el fin de determinar la covarianza y el coeficiente de correlación para cada uno de los cauces y obtener sus gráficas correspondientes, tal como se presentan en las tablas 7 y 8.

Barranca Colorada



**Fig. 4. Coeficiente de correlación para las barrancas Colorada y Quimichule.**

**Fig. 4. Correlation Coefficient for the Colorada and Quimichule streams.**

Barranca Quimichule

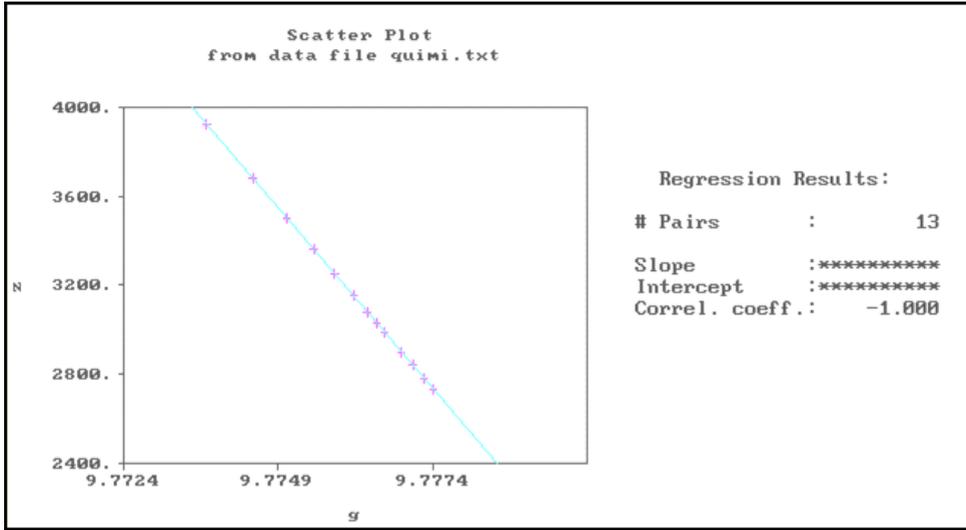


Fig. 4. Coeficiente de correlación para las barrancas Colorada y Quimichule.

Fig. 4. Correlation Coefficient for the Colorada and Quimichule streams.

TABLA 7. BARRANCA COLORADA.

TABLE 7. COLORADA STREAM.

Pto.	Altura (m)		$(X_i - \bar{X})^2$		Aceleración de la gravedad local (m/s <sup>2</sup> )		$(Y_i - \bar{Y})^2$			
1	4200	796,1538	633860,947		9,772851	-0,002458	6,03939E-06		-1,956560877	
2	4055	651,1538	424001,331		9,773300	-0,002009	4,03731E-06		-1,308367578	
3	3940	536,1538	287460,947		9,773655	-0,001654	2,73601E-06		-0,886845767	
4	3800	396,1538	156937,870		9,774088	-0,001221	1,49161E-06		-0,483828252	
5	3640	236,1538	55768,639		9,774582	-0,000727	5,29011E-07		-0,171762177	
6	3440	36,1538	1307,101		9,775199	-0,000110	1,20568E-08		-0,003969814	
7	3315	-88,8462	7893,639		9,775585	0,000276	7,61465E-08		-0,024516798	
8	3195	-208,8462	43616,716		9,775954	0,000645	4,16245E-07		-0,134741456	
9	3065	-338,8462	114816,716		9,776355	0,001046	1,09449E-06		-0,354493546	
10	2985	-418,8462	175432,101		9,776601	0,001292	1,66994E-06		-0,541259438	
11	2920	-483,8462	234107,101		9,776801	0,001492	2,22589E-06		-0,721869941	
12	2855	-548,8462	301232,101		9,777000	0,001691	2,85915E-06		-0,928044829	
13	2840	-563,8462	317922,485	Desviación Estándar	9,777046	0,001737	3,01702E-06	Desviación Estándar	-0,979377112	
	3403,846		211873,669	460,2973698	9,775309		2,01571E-06	0,001419758	-0,653510583	
Coeficiente de Correlación										
-0,999999554										Covarianza

### Análisis geoestadístico con *surfer*

Aplicando el programa *Surfer* se obtuvo el análisis de las variables estadísticas entre la altura y la gravedad (GASQUET 2000). Comparando los resultados de este análisis con las gráficas del *Geoeas*, se observa que el proceso de gravedad tiende a acercarse al valor calculado a medida que su altitud disminuye (Tablas 9 y 10).

TABLA 8. BARRANCA QUIMICHULE.

TABLE 8. QUIMICHULE STREAM.

"Estadística de la Barranca"

Pto.	Altura (m)		$(X_i - \bar{X})^2$		Aceleración de la gravedad local (m/s <sup>2</sup> )		$(Y_i - \bar{Y})^2$		
1	3920	750	562500.0000		9.773706	-0.002312	5.34349E-06		-1.733698657
2	3680	510	260100.0000		9.774448	-0.001570	2.46559E-06		-0.800811723
3	3500	330	108900.0000		9.775002	-0.001016	1.03227E-06		-0.335282639
4	3360	190	36100.0000		9.775434	-0.000584	3.41395E-07		-0.111015158
5	3250	80	6400.0000		9.775773	-0.000245	6.0108E-08		-0.019613542
6	3150	-20	400.0000		9.776081	0.000063	3.98338E-09		-0.00126228
7	3080	-90	8100.0000		9.776297	0.000279	7.76832E-08		-0.025084539
8	3030	-140	19600.0000		9.776451	0.000433	1.87542E-07		-0.060628639
9	2990	-180	32400.0000		9.776574	0.000556	3.09379E-07		-0.100119271
10	2900	-270	72900.0000		9.776850	0.000832	6.91932E-07		-0.224592674
11	2840	-330	108900.0000		9.777033	0.001015	1.03074E-06		-0.335033064
12	2780	-390	152100.0000		9.777216	0.001198	1.43589E-06		-0.467330943
13	2730	-440	193600.0000	Desviación Estándar	9.777369	0.001351	1.8247E-06	Desviación Estándar	-0.594357709
	3170		120153.8462	346.6321482	9.776018		1.13882E-06	0.001067156	-0.369910064
					Coeficiente de Correlación				
					-0.999998549				Covarianza

TABLA 9. BARRANCA COLORADA.

TABLE 9. STREAM COLORADA.

### Univariate Statistics

	X	Y	Z
Minimum:	2840	9.772851392	9.772851392
25%-tile:	2985	9.774087594	9.774087594
Median:	3315	9.775584855	9.775584855
75%-tile:	3800	9.776601172	9.776601172
Maximum:	4200	9.777045867	9.777045867
Midrange:	3520	9.7749486295	9.7749486295
Range:	1360	0.0041944750000003	0.0041944750000003
Interquartile Range:	815	0.0025135780000003	0.0025135780000003
Median Abs. Deviation:	395	0.0012159950000008	0.0012159950000008
Mean:	3403.8461538462	9.7753089084615	9.7753089084615
Trim Mean (10%):	3382.7272727273	9.7753744137273	9.7753744137273
Standard Deviation:	460.29736979376	0.0014197582068528	0.0014197582068528
Variance:	211873.66863905	2.015713365926E-006	2.015713365926E-006
Coef. of Variation:			0.00014523921649411
Coef. of Skewness:			-0.34133729589633

TABLA 10. BARRANCA QUIMICHULE.

TABLE 10. STREAM QUIMICHULE.

**Univariate Statistics**

	X	Y	Z
Minimum:	2730	9.773706207	9.773706207
25%-tile:	2900	9.775433515	9.775433515
Median:	3080	9.776296522	9.776296522
75%-tile:	3360	9.77684963	9.77684963
Maximum:	3920	9.777368618	9.777368618
Midrange:	3325	9.7755374125	9.7755374125
Range:	1190	0.0036624110000005	0.0036624110000005
Interquartile Range:	460	0.0014161149999996	0.0014161149999996
Median Abs. Deviation:	240	0.00073653499999971	0.00073653499999971
Mean:	3170	9.7760178050769	9.7760178050769
Trim Mean (10%):	3141.8181818182	9.7761051491818	9.7761051491818
Standard Deviation:	346.63214818283	0.0010671560113215	0.0010671560113215
Variance:	120153.84615385	1.1388219524997E-006	1.1388219524997E-006
Coef. of Variation:			0.00010916060430734
Coef. of Skewness:			-0.72181350474623

**Modelación estructural aplicando *surfer***

La modelación estructural en 2D y 3D se realizó con el programa *Surfer*, lo que sirvió

para identificar las barrancas de estudio y el comportamiento vectorial de las mismas (GODMAN 2001) (fig. 5 y 6).

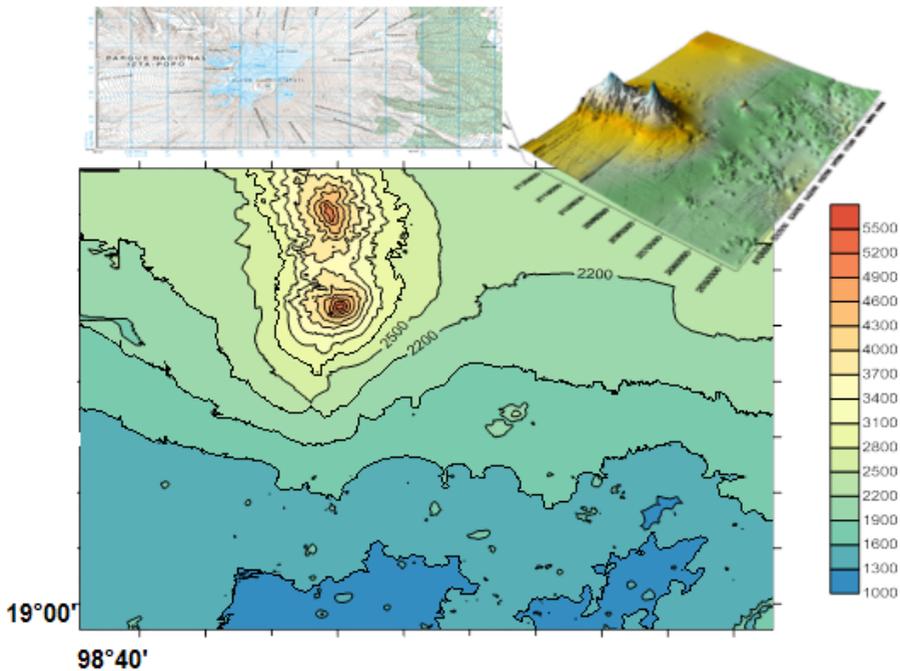


Fig. 5. Identificación de las barrancas en la zona del volcán Popocatépetl.

Fig. 5. identification streams in the volcano Popocatépetl area.

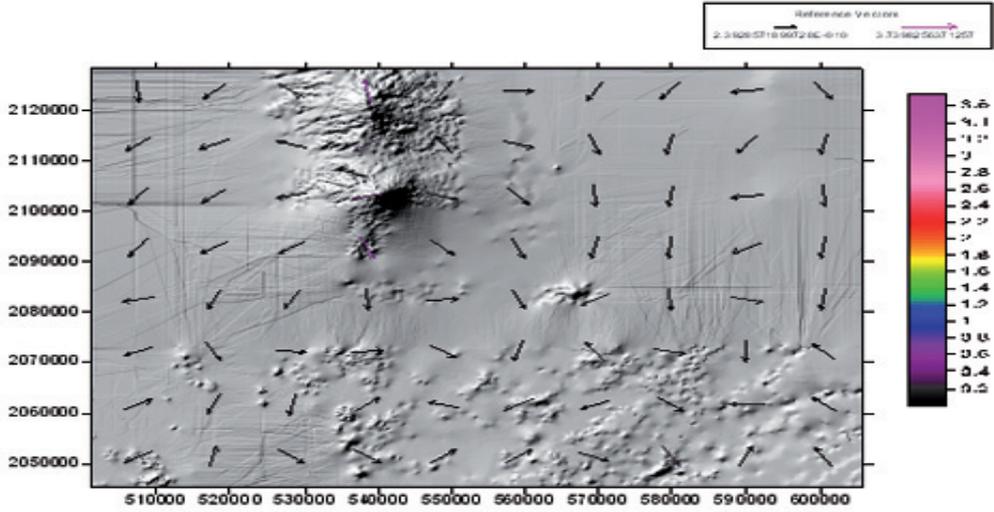


Fig. 6. Dirección vectorial de las barrancas con respecto a la gravedad.

Fig. 6. Stream vector orientation with respect to gravity.

El variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida (SCHENK

2002). En el caso de las barrancas, se elaboró el variograma de la altura contra la gravedad local calculada (Fig. 7).

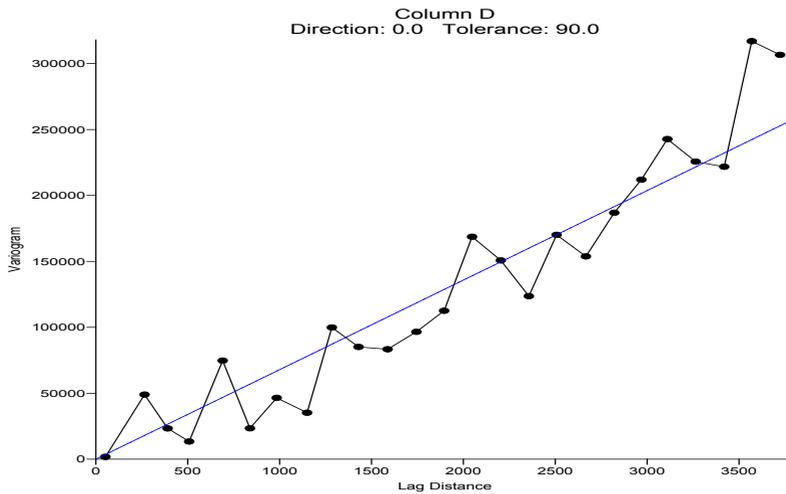


Fig. 7. Variograma de la altura respecto a la gravedad.

Fig. 7. Variogram height relative to gravity.

**Cálculo de la fuerza del agua**

La fuerza del agua es la cantidad de empuje que ejerce este líquido en dirección de la pendiente; la densidad del agua es  $1 \text{ gr/cm}^3$  o  $1000 \text{ Kg/m}^3$ . Los cálculos realizados mediante el modelo matemático o ecuación

mostraron que la fuerza aumenta proporcionalmente a la inclinación de la pendiente.

$$F_1 = (d * \cos m) \text{ (gl)} \quad (3)$$

El cauce del agua se subdividió con una equidistancia de 500 metros (LENNON 2002); los cálculos se muestran en las Tablas 11 y 12.

**TABLA 11. BARRANCA COLORADA.**  
**TABLE 11. COLORADA STREAM.**

<b>"CÁLCULO DE LA FUERZA DEL AGUA"</b>							
Pto.	Altura	Densidad del agua (Kg/m <sup>3</sup> )	$m = \frac{A2 - A1}{500}$	Coseno de la Pendiente (Cos m)	Gravedad local del punto (gl)	Fuerzas parciales	$F_i = (d * \cos m)(gl)$
Pendiente del cauce							
1	4200						SFi = 1173.05083838  Número de datos <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">12</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> <math display="block">F = \sum_{i=1}^n F_i</math> </div> 97.75423653 N
2	4055	1000	-0.290000	0.999987	9.773300	97.731744	
3	3940	1000	-0.230000	0.999992	9.773655	97.735761	
4	3800	1000	-0.280000	0.999988	9.774088	97.739709	
5	3640	1000	-0.320000	0.999984	9.774582	97.744291	
6	3440	1000	-0.400000	0.999976	9.775199	97.749609	
7	3315	1000	-0.250000	0.999990	9.775585	97.754918	
8	3195	1000	-0.240000	0.999991	9.775954	97.758683	
9	3065	1000	-0.260000	0.999990	9.776355	97.762544	
10	2985	1000	-0.160000	0.999996	9.776601	97.765631	
11	2920	1000	-0.130000	0.999997	9.776801	97.767757	
12	2855	1000	-0.130000	0.999997	9.777000	97.769746	
13	2840	1000	-0.030000	1.000000	9.777046	97.770445	

**TABLA 12. BARRANCA QUIMICHULE.**  
**TABLE 12. QUIMICHULE STREAM**

<b>"CÁLCULO DE LA FUERZA DEL AGUA"</b>							
Pto.	Altura	Densidad del agua (Kg/m <sup>3</sup> )	$m = \frac{A2 - A1}{500}$	Coseno de la Pendiente (Cos m)	Gravedad local del punto (gl)	Fuerzas Parciales	$F_i = (d * \cos m)(gl)$
Pendiente del cauce							
1	3920						SFi = 1173.13581323  Número de datos <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;">12</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> <math display="block">F = \sum_{i=1}^n F_i</math> </div> 97.76131777 N
2	3680	1000	-0.480000	0.999965	9.774448	97.741046	
3	3500	1000	-0.360000	0.999980	9.775002	97.748088	
4	3360	1000	-0.280000	0.999988	9.775434	97.753168	
5	3250	1000	-0.220000	0.999993	9.775773	97.757006	
6	3150	1000	-0.200000	0.999994	9.776081	97.760214	
7	3080	1000	-0.140000	0.999997	9.776297	97.762673	
8	3030	1000	-0.100000	0.999998	9.776451	97.764360	
9	2990	1000	-0.080000	0.999999	9.776574	97.765645	
10	2900	1000	-0.180000	0.999995	9.776850	97.768014	
11	2840	1000	-0.120000	0.999998	9.777033	97.770116	
12	2780	1000	-0.120000	0.999998	9.777216	97.771946	
13	2730	1000	-0.100000	0.999998	9.777369	97.773537	

### Cálculo del gasto

El gasto es el volumen de un líquido que pasa por una sección en un determinado tiempo. Para este caso se obtuvo el gasto de cada una de las barrancas aplicando la ecuación (4) (Tablas 13 y 14).

Donde:

$Q$ = Gasto en  $m^3/s$

$k$ = coeficiente de permeabilidad

$i$ = Gradiente hidráulico

$A$ = Área de captación

$$Q = 0.278 * k * i * A \quad (4)$$

TABLA 13. BARRANCA COLORADA.

TABLE 13. STREAM BARRANCA.

<b>"Cálculo del gasto"</b>	
Área de la cuenca hidrológica	4324587 $m^2$
Longitud del cauce	6500 m
Coficiente de permeabilidad (k)	0,05 cm/s
Gradiente hidráulico (i)	0,183077 m
Gasto	110,050759 $m^3/s$

TABLA 14. BARRANCA QUIMICHULE.

TABLE 14. QUIMICHULE STREAM.

<b>"Cálculo del gasto"</b>	
Área de la cuenca hidrológica	2356300 $m^2$
Longitud del cauce	6500 m
Coficiente de permeabilidad (k)	0.05 cm/s
Gradiente hidráulico (i)	0.209231 m
Gasto	68.528454 $m^3/s$

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Es importante destacar que dentro de la literatura relacionada con investigaciones del volcán Popocatépetl, no se ha encontrado un análisis similar al presente. El trabajo muestra los resultados obtenidos del procesamiento de datos cartográficos y la aplicación de los programas *Geoas* y *Surfer* para calcular la relación entre la aceleración local de la gravedad, la altura, la pendiente, el gasto y la fuerza de un líquido que corre sobre un perfil de las barrancas Colorada y Quimichule.

La gravedad, la pendiente, la fuerza y el gasto son menores en la barranca Colorada, resultados que validan los métodos aplicados. El coeficiente de correlación entre la gravedad y la altura muestra que existe una correlación negativa perfecta, es decir, a mayor altura menor gravedad.

El valor absoluto del caudal obtenido en cada barranca no es comparable, ya que la superficie de la barranca Colorada es solamente del 54.5% de la barranca Quimichule, y para poder compararlo es necesario obtener el caudal específico de

cada una (dividiendo su superficie, que habitualmente se proporciona en  $\text{m}^3/\text{s km}^2$  o en litros/s  $\text{km}^2$ ). Así entonces, los caudales específicos de cada barranca serían:

Colorada ( $68.528454 \text{ m}^3 / 2.3563 \text{ s km}^2$ ) =  $0.2908311 \text{ m}^3/\text{s km}^2$  o  $290.8311 \text{ l/s km}^2$

Quimichule ( $110.050759 \text{ m}^3 / 4.324587 \text{ s km}^2$ ) =  $0.254477 \text{ m}^3 / \text{s km}^2$  o  $254.477 \text{ l/s km}^2$

De tal manera que la barranca Quimichule produce por cada  $\text{km}^2$  un 87.5% del agua que escurre por la barranca Colorada, siendo esta última la que mostraría una capacidad más elevada de generar escorrentía.

Este resultado se puede comparar con la gravedad local de  $9.7760 \text{ m/s}^2$  en Quimichule y  $9.7753 \text{ m/s}^2$  en Colorada con los valores de fuerza del agua de  $97.76131777 \text{ N}$  en Quimichule y de  $97.75423653 \text{ N}$  en Colorada, con los valores de la pendiente promedio de  $-0.166153846$  en Quimichule y  $-0.196923077$  en Colorada. Se revela local y que las pequeñas diferencias de gravedad (0.0007% mayor en Quimichule) ejercen una influencia equivalente sobre la fuerza del agua, lo que hace suponer que se debe básicamente a las diferencias de altitud que muestran ambas barrancas. Sin embargo, estas variables no intervienen en el cálculo de los caudales (Q), donde la diferencia de pendiente media o gradiente hidráulico (i) son determinantes en el cálculo teórico de caudales; la misma diferencia observada entre los valores de i se manifiesta entre los valores de Q (87.5% entre Quimichule y Colorada).

La aplicación de modelos geoestadísticos pone de manifiesto la importancia de la aplicación matemática en los

análisis geomorfológicos, presentando diferentes gráficas y datos comparativos de los análisis, así como los estudios de modelados estructurales en procesos geomorfológicos e hidrológicos, que son útiles para tener una idea del comportamiento de flujos de agua, de lodo o de magma, ocasionados por las lluvias o la actividad del Popocatepetl y que podrían afectar a las poblaciones cercanas a las barrancas.

Este estudio pretende contribuir a los trabajos ya existentes, y se considera que los resultados obtenidos a través de herramientas tecnológicas representan un valioso aporte para el área de prevención de desastres naturales. Se insiste que la aplicación de modelos diferentes con certeza llevaría a obtener resultados similares.

## REFERENCIAS

**GARCÍA, F., R. RAMOS & R. DOMÍNGUEZ, 1996.** Posible flujo de lodo en el costado oriente del volcán Popocatepetl. En: Volcán Popocatepetl, Estudios Realizados Durante la Crisis de 1994-1995, Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Universidad Nacional Autónoma de México, México: 109-125.

**FRANCO, J. M., A. M. CASSANO & G. L. BOLLA, 2005.** Estabilidad de barrancas sobre el río Paraná. Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Regional de Paraná. 1-119.

**SPIEGEL, M., 2000.** Probabilidad y Estadística. Ed. Mc. Graw Hill. México.

**RAMOS, R., P. MÁXIMO, A. MONTIEL, Y. GONZÁLEZ & A. RODRÍGUEZ, 2010.** Análisis fotogramétrico del volcán Citlaltépetl. Cartográfica, 84:105-116.

**RAMOS, R., P. MÁXIMO, J. NARCISO, M. MIRÓN & M. BELTRÁN, 2012.** Estudio geoestadístico para obtener la gravedad local, pendiente y cálculo hidrológico de las barrancas Xaltelulco, Tepeloncocone y Tenepanco del volcán Popocatepetl. Boletín de Ciencias de la Tierra, 31: 65-84.

**GASQUET, C., 2000.** Analyse de fourier et applications. Ed. Dunod. France.

**GODMAN, P., 2001.** Principles of geographical information systems For Land Resources. Springer. USA.

**SCHENK, T., 2002.** Fotogrametría digital. Ed. Marcombo-ICC. España.

**LENNON, T., 2002.** Remote sensing digital image analysis, Esa/Esrin. USA.

## **Imagen de Investigaciones GEOGRÁFICAS**



Lahar deposits in the Avacha catchment close to Pietropavlovsk, Southern Kamtschatka, Russia. In the background the Koryaksky Volcano (3456 m) on the left and the Avacha Volcano (2741 m) on the right.

EU-IRSES Project entitled: “Fluvial processes and sediment dynamics of slope channel systems: Impacts of socio economic-and climate change on river system characteristics and related services (FLUMEN)”

The FLUMEN project is an EU funded scientific exchange programme. It is focused on the ecological and morphological characteristics of river channels and related processes of erosion, sediment transport and deposition under changing boundary conditions, described by socio economic and climate change scenarios. We study effects of these changes on river systems at different spatial and temporal scales. The specific focus of the project is addressing the interface between the river channel and related slope systems. We study also the historic evolution of river systems and simulate future developments using scenarios.

Dr. Michael Maerker. Earth Sciences Department, University of Florence, Italy; Heidelberg Academy of Sciences and Humanities, Germany. [mmaerker@unifi.it](mailto:mmaerker@unifi.it) / [www.flumen-irses.eu](http://www.flumen-irses.eu)