

---

---

**ESTUDIO GEOESTADÍSTICO PARA OBTENER LA GRAVEDAD LOCAL, PENDIENTE Y CÁLCULO HIDROLÓGICO DE LAS BARRANCAS XALTELULCO, TEPELONCOCONE, TENEPANCO, COLORADA Y QUIMICHULE DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL**

**GEOSTATISTICAL STUDY FOR GETTING THE LOCAL GRAVITY, SLOPE AND HYDROLOGIC CALCULATIONS OF THE XALTELULCO, TEPELONCOCONE, TENEPANCO, COLORADA Y QUIMICHULE CANYONS FROM POPOCATÉPETL VOLCANO**

---

---

***Rogelio Ramos-Aguilar<sup>1</sup>, Patricia Máximo-Romero<sup>1</sup>, Jessica Narciso-Hernández<sup>2</sup>, Monserrat Mirón-Morales<sup>2</sup>, Mayra Alejandra Beltrán-Cruz<sup>2</sup>.***

*1. Ciencias de la Tierra-Facultad de Ingeniería*

*2. Becarios adscritos a Ciencias de la Tierra<sup>2</sup>.*

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*

*rogelio.ramos@fi.buap.mx*

Recibido para evaluación: 20 de Junio de 2011 / Aceptación: 18 de Junio de 2012 / Recibida versión final: 10 de Julio de 2012

**RESUMEN**

El siguiente trabajo presenta un estudio geoestadístico de las principales barrancas del volcán Popocatepetl para obtener la aceleración de la gravedad, la pendiente por distancia-elevación, la altura-gravedad y la fuerza de un líquido.

También, se presentan los resultados hipotéticos de un modelo eruptivo para el volcán Popocatepetl.

**PALABRAS CLAVE:** Geoestadístico, Aceleración, Gravedad, Fuerza, Modelo.

**ABSTRACT**

This article presents a geostatistical study of the main canyons from Popocatepetl volcano for obtaining the gravity acceleration, distance-elevation by slope, height-gravity and the force of a liquid.

Also, it shows the hypothetical results of an eruptive model for Popocatepetl volcano.

**KEYWORDS:** Geostatistical, Acceleration, Gravity, Force, Model.

## 1. 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; colinda con los estados de Puebla, Morelos y México. La localización del volcán en estudio 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.

Aplicando diferentes tipos de programas geoestadísticos, se realizó el estudio geomorfológico de las barrancas Xaltelulco, Tepeloncocone, Tenepanco, Colorada y Quimichule calculando la gravedad local y la pendiente en diferentes puntos; posteriormente se obtuvo el coeficiente de correlación altura-gravedad.

La importancia que tiene la correlación de gravedad con la pendiente es relevante ya que de acuerdo a la inclinación que presente la estructura geológica sería mayor el riesgo generado por algún escurrimiento.

Además, mediante un modelo ideal, se presenta el resultado hipotético de las características eruptivas del volcán.

## 2. MÉTODO

Se utilizaron los programas Traninv web para la conversión de coordenadas UTM a geográficas aplicando el Datum NAD27 y zona 14, el OIML para calcular la gravedad local, el Geoestatistical Enviromental Assessment Software (Geoeas) para realizar el análisis estadístico y por último el Surfer para la modelación estructural.

Posteriormente se utilizaron modelos hidrológicos para calcular el gasto y la fuerza de un líquido sobre las barrancas. A través de la aplicación matemática hipotética se calcularon algunos parámetros eruptivos del volcán.

### 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. (Ver figura 1)

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)			

**Figura 1.** Ejemplo de la transformación de las coordenadas de UTM a geográficas para todas las lecturas de las barrancas.

En las tablas 1 a 5 se muestran los datos que fueron utilizados para el procesamiento a cada 500 metros de longitud para cada barranca.

**Tabla 1.** La barranca Xaltelulco tiene una longitud de 5.5 km, por lo que se realizaron 11 lecturas.

"Datos"					
Punto	Latitud	Longitud	Z	X	Y
1	19° 1' 46.451"	98° 37' 23.916"	4880	539640.388	2104015.758
2	19° 1' 39.899"	98° 37' 07.464"	4580	540121.747	2103815.432
3	19° 1' 33.707"	98° 36' 51.840"	4280	540578.888	2103626.111
4	19° 1' 26.616"	98° 36' 36.287"	4040	540034.0525	2103409.175
5	19° 1' 21.071"	98° 36' 20.015"	3820	541510.084	2103239.814
6	19° 1' 14.628"	98° 36' 03.888"	3580	541981.976	2103042.855
7	19° 1' 08.400"	98° 35' 48.119"	3440	542443.398	2102852.492
8	19° 0' 01.668"	98° 35' 31.236"	3280	542937.432	2102646.725
9	19° 0' 54.404"	98° 35' 15.396"	3120	543401.024	2102424.549
10	19° 0' 49.14"	98° 34' 59.628"	3000	543862.377	2102263.849
11	19° 0' 44.280"	98° 34' 47.460"	2960	544218.462	2102115.326

**Tabla 2.** La barranca Tepeloncocone tiene una longitud de 6.5 km, por lo que se realizaron 13 lecturas.

"Datos"					
Punto	Latitud	Longitud	Z	X	Y
1	19° 4' 25.824"	98° 36' 11.16"	3400	541756.322	2108918.483
2	19° 4' 14.087"	98° 36' 21.995"	3500	541440.288	2108557.144
3	19° 4' 3.9"	98° 36' 35.244"	3587.872	541054.072	2108243.504
4	19° 3' 52.055"	98° 36' 46.835"	3651.994	540715.696	2107878.453
5	19° 3' 39.996"	98° 36' 55.512"	3738.675	540463.511	2107507.299
6	19° 3' 24.66"	98° 37' 0.804"	3820.266	540309.798	2107035.544
7	19° 3' 11.087"	98° 37' 8.4"	3881.08	540088.629	2106617.608
8	19° 2' 56.759"	98° 37' 15.348"	3978.361	539885.763	2106177.386
9	19° 2' 41.64"	98° 37' 17.436"	4149.287	539826.346	2105712.186
10	19° 2' 27.42"	98° 37' 14.52"	4291.082	539912.587	2105275.253
11	19° 2' 11.327"	98° 37' 14.808"	4491.679	539904.737	2104780.647
12	19° 1' 56.567"	98° 37' 21.576"	4760.342	539708.481	2104326.534
13	19° 1' 46.74"	98° 37' 22.835"	4962.988	539672.005	2104024.676

**Tabla 3.** La barranca Tenepanco tiene una longitud de 5.5 km, por lo que se realizaron 11 lecturas.

"Datos"					
Punto	Latitud	Longitud	Z	X	Y
1	19° 1' 37.235"	98° 37' 50.808"	4960	538854.957	2103730.338
2	19° 1' 51.167"	98° 37' 43.752"	4676.335	539060.301	2104159
3	19° 02' 06.972"	98° 37' 41.915"	4453.86	539112.935	2104644.879
4	19° 02' 23.100"	98° 37' 41.340"	4237.626	539128.715	2105140.639
5	19° 02' 37.787"	98° 37' 41.088"	4102.476	539135.119	2105592.119
6	19° 02' 52.223"	98° 37' 35.436"	4000	539299.367	2106036.188
7	19° 03' 07.524"	98° 37' 37.128"	3916.481	539248.909	2106506.358
8	19° 03' 20.628"	98° 37' 27.047"	3834.621	539542.646	2106909.765
9	19° 03' 34.488"	98° 37' 18.192"	3769.253	539800.549	2107336.337
10	19° 03' 44.567"	98° 37' 05.34"	3712.687	540175.476	2107646.981
11	19° 03' 47.808"	98° 36' 58.176"	3680	540384.624	2107747.027

**Tabla 4.** La barranca Colorada tiene una longitud de 6.5 km, por lo que se realizaron 13 lecturas.

"Datos"					
Punto	Latitud	Longitud	Z	X	Y
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 5.** La barranca Quimichule tiene una longitud de 6.5 km, por lo que se realizaron 13 lecturas.

"Datos"					
Punto	Latitud	Longitud	Z	X	Y
1	19°01'17.760	98° 35' 49.847°	3920	542391.91	2103140.269
2	19°01'09.012	98° 35' 36.060°	3680	542795.823	2102872.318
3	19°01'00.768	98° 35' 21.803°	3500	543213.32	2102619.414
4	19°00'58.68	98° 35' 05.856°	3360	543679.56	2102556.697
5	19°00'56.484	98° 34' 49.008°	3250	544172.501	2102490.609
6	19°00'54.432	98° 34' 32.808°	3150	544645.769	2102428.804
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	2102356.312
9	19°00'30.183	98° 33' 46.368°	2990	546003.96	2102300.982
10	19°00'36.359	98° 33' 40.572°	2900	546174.736	2101876.963
11	19°00'25.128	98° 33' 30.600°	2840	546466.746	2101532.286
12	19°00'11.34	98° 33' 23.507°	2780	546675.861	2101108.854
13	18°59'59.856	98° 33' 14.148°	2730	546949.951	2100756.324

### 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. 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. (Thulin, A. 1992). Ver figura 2.

**Figura 2.** Ejemplo del cálculo de la aceleración de la gravedad local, cuyos datos que se requieren son la altitud y la latitud norte.

The image shows a software interface with the following fields and values:

- Altitud: 4520 m
- Latitud Norte: 9.2323511 °
- Acel. Gravedad Local: 9.767698 m/s<sup>2</sup>
- Calcular button

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

$$g_l = [g_e * (1 + (f^2 * \text{sen}^2 \phi) - (F_4 * \text{sen}^2 2\phi))] - (\Delta g * h) \quad (1)$$

Donde:

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

$g_e = 9.7803185$  m/s<sup>2</sup>, aceleración de la gravedad en el Ecuador ( $\Phi = 0$ ).

$f^l = 0.0053024$  (Aplastamiento gravitacional).

$\Phi$  = Latitud, en grados, minutos, segundos (00°00 '00’’).

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

$F_4 = 0.0000059$

Ver tablas 6 a 10, los resultados se redondearon a 6 decimales.

**Tabla 6.** Barranca Xaltelulco. Se calculó la gravedad a cada 500 metros obteniéndose el promedio de 9.774308 m/s<sup>2</sup>

"CALCULO DE LA ACELERACION PARCIAL DE LA GRAVEDAD"												
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Latitud °			(Decimal)	sen <sup>2</sup>	sen <sup>2</sup> 2	Fza.de gravedad local (gl)	Constantes para calcular la gravedad de un punto cualquiera, con latitud diferente al Ecuador (ge)	
	X	Y		o	'	"						
1	541756.322	2108918.483	3400	19	4	25.824	19.073840	0.106789	0.381542	9.775342	ge =	9.7803185 m/s <sup>2</sup>
2	541440.288	2108557.144	3500	19	4	14.087	19.070580	0.106754	0.381431	9.775032	f' =	0.0053024
3	541054.072	2108243.504	3587.872	19	4	3.900	19.067750	0.106724	0.381335	9.774759	f4 =	0.0000059
4	540715.696	2107878.453	3651.994	19	3	52.055	19.064460	0.106688	0.381224	9.774559	Dg	0.000003086
5	540463.511	2107507.299	3738.675	19	3	39.990	19.061108	0.106652	0.381110	9.774290	h =	(altura del punto)
6	540309.798	2107035.544	3820.266	19	3	24.660	19.056850	0.106606	0.380965	9.774036	f	XX "
7	540088.629	2106617.608	3881.08	19	3	11.087	19.053080	0.106566	0.380838	9.773846		(latitud del punto)
8	539885.763	2106177.386	3978.361	19	2	56.759	19.049100	0.106523	0.380703	9.773543	Aceleracion parcial de la gravedad local (gl)	
9	539826.346	2105712.186	4149.287	19	2	41.640	19.044900	0.106478	0.380560	9.773014	gl = [ge * (1 + (f^2 * sen^2 phi) - (f4 * sen^2 2 phi))] - (Dg * h)	
10	539912.587	2105275.253	4291.082	19	2	27.420	19.040950	0.106435	0.380427	9.772574		
11	539904.737	2104780.647	4491.679	19	2	11.327	19.036480	0.106387	0.380275	9.771952	Sgl = 127.054561911 No.Datos 13	
12	539708.481	2104326.534	4760.342	19	1	56.567	19.032380	0.106343	0.380136	9.771121	Gravedad Promedio de la Barranca: 9.773427839	
13	539672.005	2104024.676	4962.988	19	1	46.740	19.029650	0.106313	0.380044	9.770494		

**Tabla 7.** Barranca Tepeloncocone. Se calculó la gravedad a cada 500 metros obteniéndose el promedio de 9.773428 m/s<sup>2</sup>

"CALCULO DE LA ACELERACION PARCIAL DE LA GRAVEDAD"												
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Latitud °			(Decimal)	sen <sup>2</sup>	sen <sup>2</sup> 2	Fza.de gravedad local (gl)	Constantes para calcular la gravedad de un punto cualquiera, con latitud diferente al Ecuador	
	X	Y		o	'	"						
1	539640.388	2104015.758	4880	19	01	46.451	19.029570	0.106313	0.380041	9.770750	ge =	9.7803185 m/s <sup>2</sup>
2	540121.747	2103815.432	4580	19	01	39.899	19.027750	0.106293	0.379979	9.771675	f' =	0.0053024
3	540578.888	2103626.111	4280	19	01	33.707	19.026030	0.106274	0.379921	9.772600	f4 =	0.0000059
4	540034.053	2103409.175	4040	19	01	26.616	19.024060	0.106253	0.379854	9.773339	Dg	0.000003086
5	541510.084	2103239.814	3820	19	01	21.071	19.022520	0.106237	0.379802	9.774017	h =	(altura del punto)
6	541981.976	2103042.855	3580	19	01	14.628	19.020730	0.106217	0.379741	9.774757	f	XX "
7	542443.398	2102852.492	3440	19	01	8.400	19.019000	0.106199	0.379683	9.775188		(latitud del punto)
8	542937.432	2102646.725	3280	19	01	1.668	19.017130	0.106179	0.379619	9.775681	Aceleracion parcial de la gravedad local (gl)	
9	543401.024	2102424.549	3120	19	00	54.404	19.015112	0.106157	0.379551	9.776173	gl = [ge * (1 + (f^2 * sen^2 phi) - (f4 * sen^2 2 phi))] - (Dg * h)	
10	543862.377	2102263.849	3000	19	00	49.140	19.013650	0.106141	0.379501	9.776543		
11	544218.462	2102115.326	2960	19	00	44.280	19.012300	0.106127	0.379456	9.776666	Sgl = 107.517389928 No.Datos 11	
											Gravedad Promedio de la Barranca: 9.774308	

**Tabla 8.** Barranca Tenepanco. Se calculó la gravedad a cada 500 metros obteniéndose el promedio de 9.773099 m/s<sup>2</sup>

<b>"CALCULO DE LA ACELERACION PARCIAL DE LA GRAVEDAD"</b>											
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Latitud °			(Decimal)	sen <sup>2</sup>	sen <sup>2</sup> 2	Fza.de gravedad local ( gl )	Constantes para calcular la gravedad de un punto cualquiera, con latitud diferente al Ecuador
	X	Y		°	'	"					
1	538854.957	2103730.338	4960.000	19	1	37.235	19.027010	0.106285	0.379954	9.770502	ge = 9.7803185 m/s <sup>2</sup> f' = 0.0053024 f4 = 0.0000059 Dg = 0.000003086 h = (altura del punto) f XX " (latitud del punto) Aceleracion parcial de la gravedad local ( gl ) $gl = [ge * (1 + (f * sen^2)) - (f4 * sen^2)] - (Dg * h)$ Sgl = 107.504085840 No Datos 11 Gravedad Promedio de la Barranca: 9.773098713
2	539060.301	2104159.000	4676.335	19	1	51.167	19.030880	0.106327	0.380085	9.771379	
3	539112.935	2104644.879	4453.860	19	2	6.972	19.035270	0.106374	0.380234	9.772068	
4	539128.715	2105140.639	4237.626	19	2	23.100	19.039750	0.106422	0.380386	9.772738	
5	539135.119	2105592.119	4102.476	19	2	37.787	19.043830	0.106466	0.380524	9.773158	
6	539299.367	2106036.188	4000.000	19	2	52.223	19.047840	0.106509	0.380660	9.773476	
7	539248.909	2106506.358	3916.481	19	3	7.524	19.052090	0.106555	0.380804	9.773736	
8	539542.646	2106909.765	3834.621	19	3	20.628	19.055730	0.106594	0.380928	9.773991	
9	539800.549	2107336.337	3769.253	19	3	34.488	19.059580	0.106636	0.381058	9.774195	
10	540175.476	2107646.981	3712.687	19	3	44.567	19.062380	0.106666	0.381153	9.774371	
11	540384.624	2107747.027	3680.000	19	3	47.808	19.063280	0.106676	0.381184	9.774472	

**Tabla 9.** Barranca Colorada. Se calculó la gravedad a cada 500 metros obteniéndose el promedio de 9.775309 m/s<sup>2</sup>

<b>"CALCULO DE LA ACELERACION PARCIAL DE LA GRAVEDAD"</b>											
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Latitud °			(Decimal)	sen <sup>2</sup>	sen <sup>2</sup> 2	Fza.de gravedad local ( gl )	Constantes para calcular la gravedad de un punto cualquiera, con latitud diferente al Ecuador ( ge )
	X	Y		°	'	"					
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 h = (altura del punto) f XX " (latitud del punto) Aceleracion parcial de la gravedad local ( gl ) $gl = [ge * (1 + (f * sen^2)) - (f4 * sen^2)] - (Dg * h)$ Sgl = 127.079015811 No Datos 13 Gravedad Promedio de la Barranca: 9.775308909
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	19.038760	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	

**Tabla 10.** Barranca Quimichule. Se calculó la gravedad a cada 500 metros obteniéndose el promedio de 9.776018

<b>"CALCULO DE LA ACELERACION PARCIAL DE LA GRAVEDAD"</b>											
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Latitud °			(Decimal)	sen <sup>2</sup>	sen <sup>2</sup> 2	Fza.de gravedad local ( gl )	Constantes para calcular la gravedad de un punto cualquiera, con latitud diferente al Ecuador ( ge )
	X	Y		°	'	"					
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 h = (altura del punto) f XX " (latitud del punto) Aceleracion parcial de la gravedad local ( gl ) $gl = [ge * (1 + (f * sen^2)) - (f4 * sen^2)] - (Dg * h)$ Sgl = 127.079015811 No Datos 13 Gravedad Promedio de la Barranca: 9.775308909
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	19.038760	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	

### 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.

Con la ayuda de las curvas de nivel en la Carta Topográfica y aplicando el método de interpolación, se determinó la pendiente de las barrancas tomando lecturas a cada 500 metros a lo largo del cause. También, se calculó el promedio aritmético para los puntos en cada barranca, ver tablas 11 a 15.

**Tabla 11.** Barranca Xaltelulco.

<b>"Calculo de la pendiente de la Barranca"</b>															
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Distancia	m = $\frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$										
	X	Y													
Pendiente Cauce No. 1															
1	539640.388	2104015.758	4880			Sm1+m2 = -3.840000000									
2	540121.747	2103815.432	4580	500	-0.60000										
3	540578.888	2103626.111	4280	500	-0.60000	Pendiente promedio de la Barranca <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">-0.349090909</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Punto alto</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4880</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Punto Bajo</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2960</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Distancia</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">5000</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Pendiente entre puntos</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">-0.384000000</td></tr> </table>	-0.349090909	Punto alto	4880	Punto Bajo	2960	Distancia	5000	Pendiente entre puntos	-0.384000000
-0.349090909															
Punto alto															
4880															
Punto Bajo															
2960															
Distancia															
5000															
Pendiente entre puntos															
-0.384000000															
4	540034.053	2103409.175	4040	500	-0.48000										
5	541510.084	2103239.814	3820	500	-0.44000										
6	541981.976	2103042.855	3580	500	-0.48000										
7	542443.398	2102852.492	3440	500	-0.28000										
8	5422937.432	2102646.725	3280	500	-0.32000										
9	543401.024	2102424.549	3120	500	-0.32000										
10	543862.377	2102263.849	3000	500	-0.24000										
11	544218.462	2102115.326	2960	500	-0.08000										

**Tabla 12.** Barranca Tepeloncocone.

<b>"Calculo de la pendiente de la Barranca"</b>															
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Distancia	m = $\frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$										
	X	Y													
Pendiente Cauce No. 1															
1	541756.322	2108918.483	3400.000			Sm1+m2 = 3.125976000									
2	541440.288	2108557.144	3500.000	500	0.20000										
3	541054.072	2108243.504	3587.872	500	0.17574	Pendiente promedio de la Barranca <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">0.240459692</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Punto alto</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4963</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Punto Bajo</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3400</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Distancia</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">500</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Pendiente entre puntos</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">-3.125976000</td></tr> </table>	0.240459692	Punto alto	4963	Punto Bajo	3400	Distancia	500	Pendiente entre puntos	-3.125976000
0.240459692															
Punto alto															
4963															
Punto Bajo															
3400															
Distancia															
500															
Pendiente entre puntos															
-3.125976000															
4	540715.696	2107878.453	3651.994	500	0.12824										
5	540463.511	2107507.299	3738.675	500	0.17336										
6	540309.798	2107035.544	3820.266	500	0.16318										
7	540088.629	2106617.608	3881.080	500	0.12163										
8	539885.763	2106177.386	3978.361	500	0.19456										
9	539826.346	2105712.186	4149.287	500	0.34185										
10	539912.587	2105275.253	4291.082	500	0.28359										
11	539904.737	2104780.647	4491.679	500	0.40119										
12	539708.481	2104326.534	4760.342	500	0.53733										
13	539672.005	2104024.676	4962.988	500	0.40529										

**Tabla 13.** Barranca Tenepanco.

<b>"Calculo de la pendiente de la Barranca"</b>						
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Distancia	m =	Y2 - Y1 X2 - X1
	X	Y				
Pendiente Cauce No. 1						
1	538854.957	2103730.338	4960.000			
2	539060.301	2104159.000	4676.335	500	-0.56733	Sm1+m2 = -2.560000000
3	539112.935	2104644.879	4453.860	500	-0.44495	
4	539128.715	2105140.639	4237.626	500	-0.43247	Pendiente promedio de la Barranca  -0.232727273  Punto alto 4960 Punto Bajo 3680 Distancia 5000 Pendiente entre puntos -0.256000000
5	539135.119	2105592.119	4102.476	500	-0.27030	
6	539299.367	2106036.188	4000.000	500	-0.20495	
7	539248.909	2106506.358	3916.481	500	-0.16704	
8	539542.646	2106909.765	3834.621	500	-0.16372	
9	539800.549	2107336.337	3769.253	500	-0.13074	
10	540175.476	2107646.981	3712.687	500	-0.11313	
11	540384.624	2107747.027	3680.000	500	-0.06537	

**Tabla 14.** Barranca Colorada.

<b>"Calculo de la pendiente de la Barranca"</b>						
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Distancia	m =	Y2 - Y1 X2 - X1
	X	Y				
Pendiente Cauce No. 1						
1	541805.292	2104565.597	4200			Sm1+m2 = -2.560000000
2	542281.714	2104714.524	4055	500	-0.29000	
3	542765.336	2104780.798	3940	500	-0.23000	Pendiente promedio de la Barranca  -0.196923077  Punto alto 4200 Punto Bajo 2840 Distancia 6500 Pendiente entre puntos -0.209230769
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 15.** Barranca Quimichule.

<b>"Calculo de la pendiente de la Barranca"</b>						
Pto.	COORDENADAS		ALTURA	Distancia	m =	Y2 - Y1 X2 - X1
	X	Y				
Pendiente Cauce No. 1						
1	542391.910	2103140.269	3920			Sm1+m2 = -2.160000000
2	542795.823	2102872.318	3680	500	-0.48000	
3	543213.320	2102619.414	3500	500	-0.36000	Pendiente promedio de la Barranca  -0.166153846  Punto alto 3920 Punto Bajo 2730 Distancia 6500 Pendiente entre puntos -0.183076923
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	



### Análisis goestadístico con el programa Geoeas

Utilizando el programa Geoeas, el cual genera gráficas de probabilidad normal ponderada de las variables forzantes (gravedad y altura), se obtiene 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 (ver figura 3). Con una sobreposición del modelo surfer 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.

La Estadística aplicada permitió interrelacionar perfiles de correlación entre varianzas, covarianzas, medias y rangos.

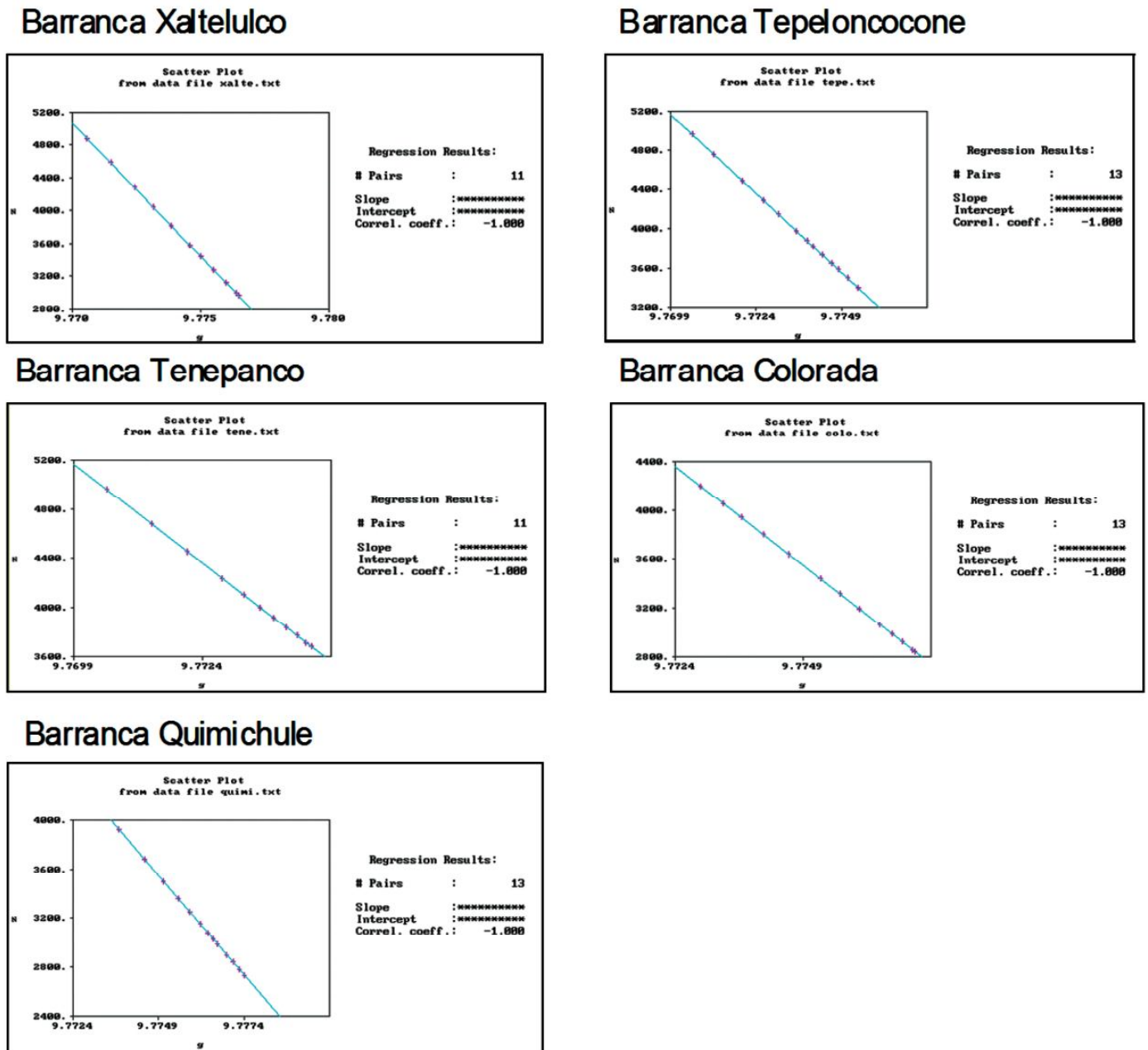


Figura 3. Tablas para corroborar el coeficiente de correlación.

## Covarianza y coeficiente de correlación

Para efectos estadísticos se presenta 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:

El valor del índice de correlación varía en el intervalo  $[-1, +1]$ :

Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada *relación directa*: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.

Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.

Si  $r = 0$ , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.

Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa.

Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada *relación inversa*: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

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. Las medidas anteriores se utilizaron para obtener el coeficiente de correlación, cuyo resultado en general para cada barranca se aproxima a -1. Los resultados se muestran en las tablas de la 16 a la 20.

Tabla 16. Barranca Xaltelulco.

"Estadística de la Barranca"									
Pto.	Altura		$(X_i - \bar{X})^2$		Aceleración de la gravedad local.		$(Y_i - \bar{Y})^2$		
1	4880	1154.5455	1332975.207		9.770750	-0.003558	1.2659E-05		-4.10788
2	4580	854.5455	730247.934		9.771675	-0.002633	6.9338E-06		-2.2502
3	4280	554.5455	307520.661		9.772600	-0.001708	2.9185E-06		-0.94737
4	4040	314.5455	98938.843		9.773339	-0.000969	9.3863E-07		-0.30474
5	3820	94.5455	8938.843		9.774017	-0.000291	8.4544E-08		-0.02749
6	3580	-145.4545	21157.025		9.774757	0.000449	2.0149E-07		-0.06529
7	3440	-285.4545	81484.298		9.775188	0.000880	7.7433E-07		-0.25119
8	3280	-445.4545	198429.752		9.775681	0.001373	1.8843E-06		-0.61147
9	3120	-605.4545	366575.207		9.776173	0.001865	3.4794E-06		-1.12937
10	3000	-725.4545	526284.298		9.776543	0.002235	4.9945E-06		-1.62127
11	2960	-765.4545	585920.661	Desviación Estandar	9.776666	0.002358	5.5579E-06	Desviación Estandar	-1.80457
	3725.455		387133.884	622.2008392	9.774308		3.6752E-06	0.001917071	-1.1928
Coeficiente de Correlación									Covarianza
-0.999999965									

Tabla 17. Barranca Tepelencoccone.

Pto.	Altura		$(X_i - \bar{X})^2$		Aceleración de la gravedad local.		$(Y_i - \bar{Y})^2$		
1	3400	-616.4328	379989.359		9.775342	0.001914	3.6644E-06		-1.1800071
2	3500	-516.4328	266702.805		9.775032	0.001604	2.5723E-06		-0.8282729
3	3587.872	-428.5608	183664.333		9.774759	0.001331	1.7718E-06		-0.5704511
4	3651.994	-364.4388	132815.617		9.774559	0.001131	1.28E-06		-0.4123161
5	3738.675	-277.7578	77149.378		9.774290	0.000862	7.4306E-07		-0.2394297
6	3820.266	-196.1668	38481.401		9.774036	0.000608	3.6948E-07		0.1192396
7	3881.08	-135.3528	18320.372		9.773846	0.000418	1.7479E-07		-0.056588
8	3978.361	-38.0718	1449.460		9.773543	0.000116	1.3376E-08		-0.0044031
9	4149.287	132.8542	17650.247		9.773014	-0.000414	1.7153E-07		-0.0550231
10	4291.082	274.6492	75432.200		9.772574	-0.000854	7.2921E-07		-0.2345335
11	4491.679	475.2462	225858.980		9.771952	-0.001475	2.177E-06		-0.7012102
12	4760.342	743.9092	553400.944		9.771121	-0.002307	5.3215E-06		-1.7160806
13	4962.988	946.5552	895966.805	Desviación Estandar	9.770494	-0.002934	8.6067E-06	Desviación Estandar	-2.7769326
	4016.433		220529.377	469.6055546	9.773428		2.1227E-06	0.00145695	-0.6841914
Coeficiente de Correlación									Covarianza
-0.999999331									

**Tabla 18.** Barranca Tenepanco.

Pto.	Altura		$(X_i - \bar{X})^2$		Aceleración de la gravedad		$(Y_i - \bar{Y})^2$	
1	4960	837.8783	702040.000		9.770502	-0.002597	6.74361E-06	-2.17584021
2	4676.335	554.2133	307152.352		9.771379	-0.001719	2.956E-06	-0.95286071
3	4453.86	331.7383	110050.282		9.772068	-0.001030	1.06153E-06	-0.34179126
4	4237.626	115.5043	13341.237		9.772738	-0.000361	1.2997E-07	-0.04164091
5	4102.476	-19.6457	385.955		9.773158	0.000059	3.4608E-09	-0.00115573
6	4000	-122.1217	14913.716		9.773476	0.000377	1.42356E-07	-0.04607662
7	3916.481	-205.6407	42288.109		9.773736	0.000637	4.06286E-07	-0.1310766
8	3834.621	-287.5007	82656.668		9.773991	0.000892	7.95757E-07	-0.25646558
9	3769.253	-352.8687	124516.339		9.774195	0.001096	1.20104E-06	-0.38671623
10	3712.687	-409.4347	167636.796		9.774371	0.001272	1.61809E-06	-0.52081838
11	3680	-442.1217	195471.622	Desviación Estandar	9.774472	0.001373	1.88627E-06	-0.60721702
	4122.122		160041.189	400.0514824	9.773099		1.5404E-06	-0.49651448
					Coeficiente de Correlacion			Covarianza
					-0.999999179			

**Tabla 19.** Barranca Colorada.

Pto.	Altura		$(X_i - \bar{X})^2$		Aceleración de la gravedad local.		$(Y_i - \bar{Y})^2$	
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		9.773855	-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	-0.024516796
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 Estandar	9.777046	0.001737	3.01702E-06	-0.979377112
	3403.846		211873.669	460.2973698	9.775309		2.01571E-06	-0.653510583
					Coeficiente de Correlacion			Covarianza
					-0.999999554			

**Tabla 20.** Barranca Quimichule.

Pto.	Altura		$(X_i - \bar{X})^2$		Aceleración de la gravedad local.		$(Y_i - \bar{Y})^2$	
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 Estandar	9.777369	0.001351	1.8247E-06	-0.594357709
	3170		120153.8462	346.6321482	9.776018		1.13882E-06	-0.369910064
					Coeficiente de Correlacion			Covarianza
					-0.999998549			

**Análisis goestadístico con el Surfer**

Aplicando el programa Surfer se obtuvo el análisis de las variables estadísticas entre la altura y la gravedad. 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, ver tablas de la 21 a la 25.

**Tabla 21.** Barranca Xaltelulco.

	X	Y	Z
Minimum:	3400	9.770494114	9.770494114
25%-tile:	3651.994	9.772573901	9.772573901
Median:	3881.08	9.773845917	9.773845917
75%-tile:	4291.082	9.774559212	9.774559212
Maximum:	4962.988	9.77534209	9.77534209
Midrange:	4181.494	9.772918102	9.772918102
Range:	1562.988	0.0048479760000006	0.0048479760000006
Interquartile Range:	639.089	0.00199653110000003	0.00199653110000003
Median Abs. Deviation:	293.208	0.000913008000000127	0.000913008000000127
Mean:	4016.4327692308	9.7734278392308	9.7734278392308
Trim Mean (10%):	3986.4216363636	9.7735205187273	9.7735205187273
Standard Deviation:	469.6055461319	0.0014569500142472	0.0014569500142472
Variance:	220529.37692341	2.1227033440148E-006	2.1227033440148E-006
Coef. of Variation:			0.00014907257067415
Coef. of Skewness:			-0.63537664699006

**Tabla 22.** Barranca Tepeloncocone.

	X	Y	Z
Minimum:	2960	9.770750171	9.770750171
25%-tile:	3120	9.772599803	9.772599803
Median:	3530	9.774757057	9.774757057
75%-tile:	4280	9.776173495	9.776173495
Maximum:	4880	9.776665692	9.776665692
Midrange:	3920	9.7737079315	9.7737079315
Range:	1920	0.0059155210000004	0.0059155210000004
Interquartile Range:	1160	0.0035736919999998	0.0035736919999998
Median Abs. Deviation:	460	0.001417709	0.001417709
Mean:	3725.4545454545	9.7743081753636	9.7743081753636
Trim Mean (10%):	3682.2222222222	9.7744415628889	9.7744415628889
Standard Deviation:	622.20083919706	0.0019170706328236	0.0019170706328236
Variance:	387133.88429752	3.6751598112348E-006	3.6751598112348E-006
Coef. of Variation:			0.0001961336391721
Coef. of Skewness:			-0.45299168315258

**Tabla 23.** Barranca Tenepanco.

	X	Y	Z
Minimum:	3680	9.770501867	9.770501867
25%-tile:	3769.253	9.772068409	9.772068409
Median:	4000	9.773476013	9.773476013
75%-tile:	4453.86	9.774194634	9.774194634
Maximum:	4960	9.774472129	9.774472129
Midrange:	4320	9.772486998	9.772486998
Range:	1280	0.0039702619999993	0.0039702619999993
Interquartile Range:	684.607	0.0021262250000014	0.0021262250000014
Median Abs. Deviation:	237.626	0.00073781399999995	0.00073781399999995
Mean:	4122.1217272727	9.7730987127273	9.7730987127273
Trim Mean (10%):	4078.1487777778	9.7732346493333	9.7732346493333
Standard Deviation:	400.05148239679	0.0012411276569361	0.0012411276569361
Variance:	160041.18866947	1.5403978608118E-006	1.5403978608118E-006
Coef. of Variation:			0.00012699428230678
Coef. of Skewness:			-0.79633451545555

**Tabla 24.** Barranca Colorada.

	X	Y	Z
Minimum:	2840	9.772851392	9.772851392
25%-tile:	2985	9.774087594	9.774087594
Median:	3315	9.775584855	9.775584855
75%-tile:	3900	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	2.016713365926E-006	2.016713365926E-006
Coef. of Variation:			0.00014523921649411
Coef. of Skewness:			-0.34133729589633

**Tabla 25.** Barranca Quimichule.

	X	Y	Z
Minimum:	2730	9.773705207	9.773705207
25%-tile:	2900	9.775433515	9.775433515
Median:	3090	9.776236522	9.776236522
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:	346.83214818283	0.0010571560113215	0.0010571560113215
Variance:	120153.84615385	1.1388219524997E-006	1.1388219524997E-006
Coef. of Variation:			0.00010916060430734
Coef. of Skewness:			-0.72181350474623

## Modelación estructural con el Surfer

La modelación estructural en 2D y 3D se realizó con el programa Surfer, en la que se identifican las cinco barrancas de estudio y el comportamiento vectorial de las mismas, ver figuras 4 y 5.

El variograma es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida. En el caso de las barrancas, se elaboró el variograma de la altura contra la gravedad local calculada, ver figura 6.

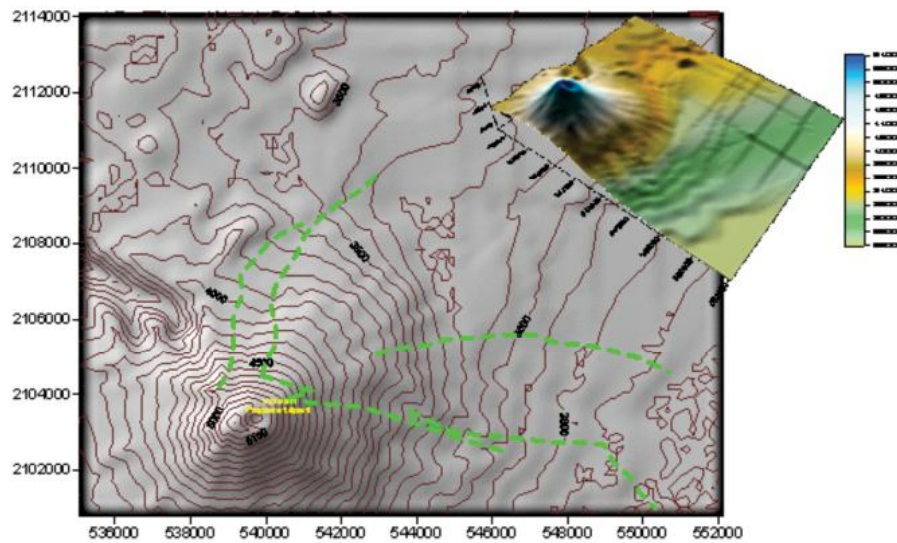


Figura 4. Se procesaron los datos para identificar las barrancas de estudio en el mapa base de la zona del volcán Popocatepetl.

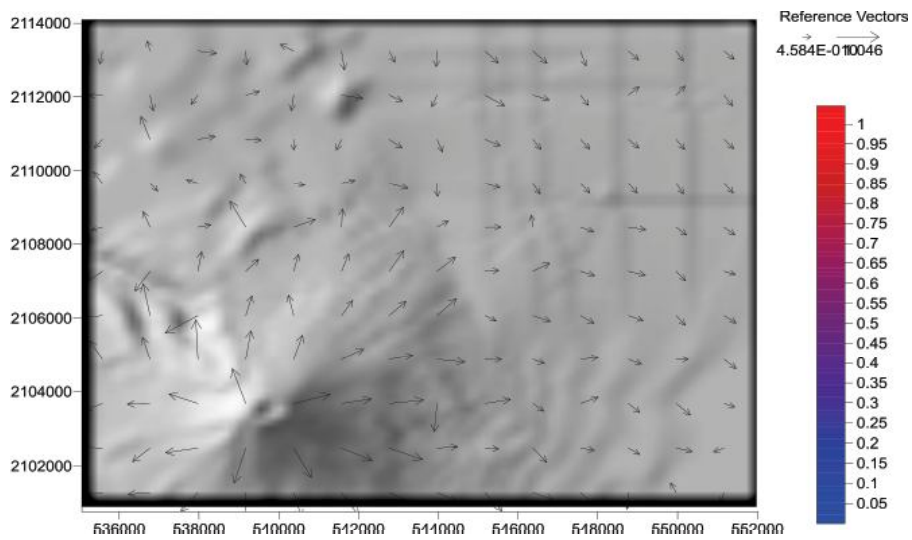


Figura 5. Dirección vectorial de las barrancas con respecto a la gravedad.

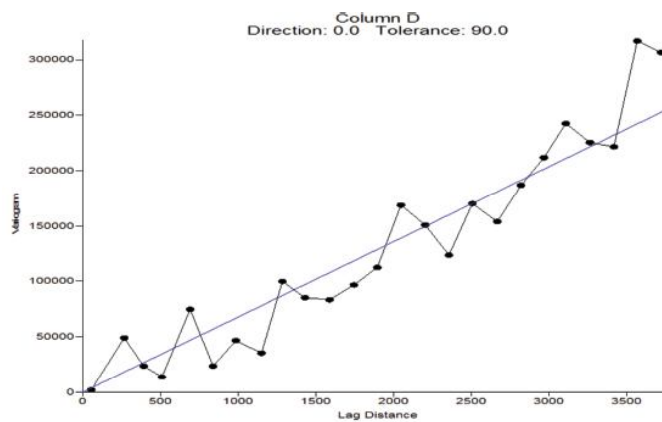


Figura 6. Variograma de la altura respecto a la gravedad.

### Cálculo de la fuerza del agua

Se denomina fuerza del agua a la cantidad de empuje que ejerce este líquido en dirección de la pendiente. Los cálculos realizados mediante el modelo matemático  $F_i = (d * \cos m)(gl)$  mostraron que la fuerza aumenta proporcionalmente a la inclinación de la pendiente. El cauce del agua se subdividió con una equidistancia de 500 metros; los cálculos se muestran en las tablas de la 26 a la 30.

Tabla 26. Barranca Xaltelulco.

"CALCULO DE LA FUERZA DEL AGUA"								
Pto.	ALTURA	Densidad del agua	m =	Y2 - Y1 X2 - X1	Coseno de la Pendiente (Cos m)	Gravedad local del punto ( gl )	Fuerzas Parciales	$F_i = (d * \cos m)(gl)$
Pendiente del cauce								
1	4880							SFi = 977.44918628  Numero de datos 10  $F = \sum_{i=1}^n F_i$ 97.74491863 N
2	4580	1000		-0.416168	0.999974	9.771675	97.714172	
3	4280	1000		-0.414141	0.999974	9.772600	97.723445	
4	4040	1000		0.398168	0.999976	9.773339	97.731034	
5	3820	1000		-0.114741	0.999998	9.774017	97.739978	
6	3580	1000		-0.417382	0.999973	9.774757	97.744977	
7	3440	1000		-0.412557	0.999974	9.775188	97.749347	
8	3280	1000		-0.000042	1.000000	9.775681	97.756809	
9	3120	1000		0.000046	1.000000	9.776173	97.761735	
10	3000	1000		-0.348323	0.999982	9.776543	97.763623	
11	2960	1000		-0.417100	0.999974	9.776666	97.764066	

Tabla 27. Barranca Tepeloncocone.

"CALCULO DE LA FUERZA DEL AGUA"								
Pto.	ALTURA	Densidad del agua	m =	Y2 - Y1 X2 - X1	Coseno de la Pendiente (Cos m)	Gravedad local del punto ( gl )	Fuerzas Parciales	$F_i = (d * \cos m)(gl)$
Pendiente del cauce								
1	3400							SFi = 1172.77719711  Numero de datos 12  $F = \sum_{i=1}^n F_i$ 97.73143309 N
2	3500	1000		0.200000	0.999994	9.775032	97.749721	
3	3588	1000		0.175744	0.999995	9.774759	97.747129	
4	3652	1000		0.128244	0.999997	9.774559	97.745347	
5	3739	1000		0.173362	0.999995	9.774290	97.742451	
6	3820	1000		0.163182	0.999996	9.774036	97.739960	
7	3881	1000		0.121628	0.999998	9.773846	97.738239	
8	3978	1000		0.194562	0.999994	9.773543	97.734871	
9	4149	1000		0.341852	0.999982	9.773014	97.728397	
10	4291	1000		0.283590	0.999988	9.772574	97.724542	
11	4492	1000		0.401194	0.999975	9.771952	97.717128	
12	4760	1000		0.537326	0.999956	9.771121	97.706913	
13	4963	1000		0.405292	0.999975	9.770494	97.702497	

Tabla 28. Barranca Tenepanco.

"CALCULO DE LA FUERZA DEL AGUA"								
Pto.	ALTURA	Densidad del agua	m =	Y2 - Y1 X2 - X1	Coseno de la Pendiente (Cos m)	Gravedad local del punto ( gl )	Fuerzas Parciales	$F_i = (d * \cos m)(gl)$
Pendiente del cauce								
1	4960							SFi = 977.28040135  Numero de datos 10  $F = \sum_{i=1}^n F_i$ 97.72804014 N
2	4676	1000		-0.567330	0.999522	9.771379	97.667122	
3	4454	1000		-0.444950	0.999970	9.772068	97.717737	
4	4238	1000		-0.432468	0.999972	9.772738	97.724598	
5	4102	1000		-0.270300	0.999989	9.773158	97.730488	
6	4000	1000		-0.204952	0.999994	9.773476	97.734135	
7	3916	1000		-0.167038	0.999996	9.773736	97.736946	
8	3835	1000		-0.163720	0.999996	9.773991	97.739509	
9	3769	1000		-0.130736	0.999997	9.774195	97.741692	
10	3713	1000		-0.113132	0.999998	9.774371	97.743517	
11	3680	1000		-0.065374	0.999999	9.774472	97.744658	

**Tabla 29.** Barranca Colorada.

"CALCULO DE LA FUERZA DEL AGUA"								
Pto.	ALTURA	Densidad del agua	m =	Y2 - Y1 X2 - X1	Coseno de la Pendiente (Cos m)	Gravedad local del punto ( gl )	Fuerzas Parciales	$F_i = (d \cdot \cos m)(gl)$
Pendiente del cauce								
1	4200							SFi = 1173.00206330
2	4055	1000		-0.416168	0.999974	9.773300	97.730418	
3	3940	1000		-0.414141	0.999974	9.773655	97.733995	Numero de datos 12
4	3800	1000		0.398168	0.999976	9.774088	97.738516	
5	3640	1000		-0.114741	0.999998	9.774582	97.745620	$F = \sum_{i=1}^n F_i$ 97.75017194 N
6	3440	1000		-0.417382	0.999973	9.775199	97.749397	
7	3315	1000		-0.412557	0.999974	9.775585	97.753314	
8	3195	1000		-0.000042	1.000000	9.775954	97.759541	
9	3065	1000		0.000046	1.000000	9.776355	97.763551	
10	2985	1000		-0.348323	0.999982	9.776601	97.764205	
11	2920	1000		-0.417100	0.999974	9.776801	97.765418	
12	2855	1000		0.582900	0.999948	9.777000	97.764939	
13	2840	1000		1.582900	0.999618	9.777046	97.733150	

**Tabla 30.** Barranca Quimichule.

"CALCULO DE LA FUERZA DEL AGUA"								
Pto.	ALTURA	Densidad del agua	m =	Y2 - Y1 X2 - X1	Coseno de la Pendiente (Cos m)	Gravedad local del punto ( gl )	Fuerzas Parciales	$F_i = (d \cdot \cos m)(gl)$
Pendiente del cauce								
1	3920							SFi = 1173.08566882
2	3680	1000		-0.416168	0.999974	9.774448	97.741897	
3	3500	1000		-0.414141	0.999974	9.775002	97.747464	Numero de datos 12
4	3360	1000		0.398168	0.999976	9.775434	97.751975	
5	3250	1000		-0.114741	0.999998	9.775773	97.757530	$F = \sum_{i=1}^n F_i$ 97.7513907 N
6	3150	1000		-0.417382	0.999973	9.776081	97.758215	
7	3080	1000		-0.412557	0.999974	9.776297	97.760431	
8	3030	1000		-0.000042	1.000000	9.776451	97.764509	
9	2990	1000		0.000046	1.000000	9.776574	97.765740	
10	2900	1000		-0.348323	0.999982	9.776850	97.766690	
11	2840	1000		-0.417100	0.999974	9.777033	97.767740	
12	2780	1000		0.582900	0.999948	9.777216	97.767101	
13	2730	1000		1.582900	0.999618	9.777369	97.736376	

**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 (2). Ver tablas 31 a la 35.

$$Q = 0.278 * k * i * A \tag{2}$$

donde: Q= Gasto en m³/s

k= coeficiente de permeabilidad

i= Gradiente hidráulico

A= Área de captación

**Tabla 31.** Barranca Xaltelulco.

"Calculo del gasto"	
Área de la cuenca hidrológica	2835645.45 m <sup>2</sup>
Longitud del cauce	5500 m
Coefficiente de permeabilidad (k)	0.05 cm/s
Gradiente hidraulico (i)	0.349091 m
Gasto	494.949024 m <sup>3</sup> /s

**Tabla 32.** Barranca Tepeloncocone.

<b>"Calculo del gasto"</b>	
Área de la cuenca hidrológica	2990700 m <sup>2</sup>
Longitud del cauce	6500 m
Coefficiente de permeabilidad (k)	0.05 cm/s
Gradiente hidraulico (i)	0.240462 m
<b>Gasto</b>	<b>359.574162 m<sup>3</sup>/s</b>

**Tabla 33.** Barranca Tenepanco.

<b>"Calculo del gasto"</b>	
Área de la cuenca hidrológica	3395707.79 m <sup>2</sup>
Longitud del cauce	5500 m
Coefficiente de permeabilidad (k)	0.05 cm/s
Gradiente hidraulico (i)	0.232727 m
<b>Gasto</b>	<b>395.136906 m<sup>3</sup>/s</b>

**Tabla 34.** Barranca Colorada.

<b>"Calculo del gasto"</b>	
Área de la cuenca hidrológica	2356300 m <sup>2</sup>
Longitud del cauce	6500 m
Coefficiente de permeabilidad (k)	0.05 cm/s
Gradiente hidraulico (i)	0.209231 m
<b>Gasto</b>	<b>246.505231 m<sup>3</sup>/s</b>

**Tabla 35.** Barranca Quimichule.

<b>"Calculo del gasto"</b>	
Área de la cuenca hidrológica	4324587 m <sup>2</sup>
Longitud del cauce	6500 m
Coefficiente de permeabilidad (k)	0.05 cm/s
Gradiente hidraulico (i)	0.183077 m
<b>Gasto</b>	<b>395.866041 m<sup>3</sup>/s</b>

### Cálculo de una erupción hipotética

Después de identificar las características geomorfológicas del volcán Popocatepetl y las cinco barrancas más importantes de acuerdo a su longitud y pendiente, y sabiendo que la actual actividad volcánica inició desde el año 1994; el análisis geoestadístico permitió complementar el trabajo, calculando modelos matemáticos hipotéticos para el caso de una erupción dentro de la escala del índice de explosividad volcánica mayor a 6 ( $IEV \geq 6$ ).

Se procedió a determinar las alturas (ver tabla 36) requeridas para efectuar los cálculos posteriores, aplicando el modelo matemático siguiente:

$$h = h_a - h_b \quad (3)$$

donde:



$h$  = Altura del cono

$h_a$  = Altura total del cono

$h_b$  = Altura del lugar de referencia es el centro de la ciudad de Puebla, ver tabla 36.

**Tabla 36.**

Altura del volcan en estudio $h_a$ (m)	Altura del lugar de referencia $h_b$ (m)	Altura $h$ (m) $h = h_a - h_b$
5520	2160	3360

Después de obtener el valor de la altura del volcán, se determina su volumen (ver tabla 37). Cabe mencionar que el modelo matemático que se utilizó es para un modelo ideal del cono truncado (ecuación 4):

$$V = \frac{1}{3} \pi h (r^2 + r'^2 + rr')$$
 (4)

donde:

$r$  = Radio de la base mayor (m)

$r'$  = Radio de la base menor (m)

$h$  = Altura del cono

**Tabla 37.**

"Volumen de tronco de cono circular recto"					
Volumen $V = \frac{1}{3} \pi h (r^2 + r'^2 + rr')$	Radio de la base mayor $r$ (m)	Radio de la base menor $r'$ (m)	Altura del volcan en estudio $h_a$ (m)	Altura del lugar de referencia $h_b$ (m)	Altura $h$ (m) $h = h_a - h_b$
292927006310.40	8960	320	5520	2160	3360

El volumen del volcán Popocatepetl en kilómetros calculado es de 299. 9270063 Km<sup>3</sup>.

Para determinar el valor de la presión liberada (ver tabla 38) en una erupción hipotética se propone el siguiente modelo:

$$M = \pi * r * (dm - dc) * g(8v)$$
 (5)

Para calcular la presión liberada se utilizó el valor de la gravedad en el punto más alto del volcán, tomando como referencia 7500 metros para el radio, desde el punto más alto del volcán hasta dentro del mismo para llegar al valor mencionado.

**Tabla 38.** El valor máximo calculado de la presión liberada en una erupción hipotética es de: 3315333094 Pa<sup>2</sup>\*seg.

Cálculo de la presión liberada en una erupción volcánica							
g m/s <sup>2</sup>	dm	dc	dm-dc	Radio hasta la cámara magmática (r) cm	v	8v m <sup>2</sup>	Valor máximo de una erupción volcánica $M = \pi \cdot r^2 \cdot (dm - dc) \cdot g(8v)$
9.77130	3.30	2.70	0.60	750000	30	240	3315333094 Pa <sup>2</sup> *seg
<b>Donde:</b> <b>M=</b> Valor de la presión liberada en una erupción volcánica <b>dc=</b> 2.7 g/cm <sup>3</sup> Densidad de la Corteza <b>dm=</b> 3.3 g/cm <sup>3</sup> Densidad del Manto <b>g=</b> 9.771304 m/s <sup>2</sup> Gravedad <b>v=</b> 30 Pa*s Viscosidad <b>r=</b> Radio hasta la cámara magmática							

## CONCLUSIONES

Este trabajo, presenta los resultados obtenidos del procesamiento de datos cartográficos para determinar la relación altura-gravedad, la gravedad promedio en cada barranca, así como su pendiente, y posteriormente, el gasto de un líquido en cada una de las mismas.

La aplicación de programas 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. Los datos obtenidos sirvieron de apoyo para el cálculo del modelo hipotético que intenta describir los posibles resultados en una erupción.

Se obtuvo una base de datos al hacer el cálculo de la gravedad de cada barranca en estudio, con esto se determinó que la barranca de mayor gravedad es Quimichule con un valor de 9.7760 m/s<sup>2</sup> y una pendiente de -0.20923%, e inversa a ésta tenemos la barranca Xaltelulco con una gravedad de 9.7743 m/s<sup>2</sup> y una pendiente de -0.38400%. Cabe mencionar que la gravedad ideal es la cercana al nivel del mar.

Para el análisis geoestadístico se aplicaron diversos programas para analizar el comportamiento de dispersión numérico de los resultados de covarianza y correlación entre varianzas, arrojando un resultado cercano a -1, el cual muestra una analogía negativa para las barrancas en estudio.

En el modelado estructural se muestra el comportamiento vectorial que presenta cada barranca con relación a la gravedad en el volcán Popocatepetl apoyado con el programa Surfer 8.

Para determinar el cálculo hidrológico de la fuerza del agua en cada barranca, se tomó en cuenta la gravedad local y la pendiente de sus perfiles expresada en porcentajes, obteniendo resultados que oscilan entre 97.72 N y 97.75 N.

Mediante el modelo racional se calculó el gasto en cada barranca empleando el coeficiente de escurrimiento, el área de captación e intensidad de lluvia. Se determinó que la barranca de Xaltelulco es la de mayor gasto con 494.94m<sup>3</sup>/s y la de menor gasto es la barranca Colorada con 246.50m<sup>3</sup>/s.

Para calcular los resultados de una erupción hipotética, se aplicó primero el modelo ideal del cono truncado para obtener el volumen que fue de 299.9270063 km<sup>3</sup>. Finalmente, con el modelo mencionado anteriormente se estima que la energía liberada en una erupción tiene un valor de 3315333094 Pa<sup>2</sup>\*seg. Este valor hipotético para el volcán Popocatepetl está dentro de la escala del índice de explosividad volcánica  $\geq 6$ .

## **BIBLIOGRAFÍA:**

- [1] Campbell, R. (2002). Introduction to remote sensing. Academic Press, USA. pp. 20-59.
- [2] Dóniz, J. (2002). El volcanismo basáltico de la dorsal de Pedro Gil en Tenerife. Universidad La Laguna. pp. 101-114.
- [3] Gasquet, C. (2000). Analyse de fourier et applications. France.
- [4] Godman, P. (2001). Principles of geographical information systems For Land Resources. Springer. USA.
- [5] Juárez, A, Gay, C. Flores, Y. (2005). Impact of the Popocatepetl's volcanic activity on the air quality of Puebla City, México. *Atmósfera*. 57-69. México.
- [6] Lennon, T. (2002). Remote sensing digital image analysis, Esa/Esrin. USA.
- [7] Schenk, T. (2002). Fotogrametría digital. ICC. España.
- [8] Spiegel, M. (2000). Probabilidad y Estadística. Ed. Mc. Graw Hill. México.
- [9] Ramos, R. (2005). Aplicación de imágenes satelitales para determinar el clima y la radiación solar en el estado de Puebla y la geohidrología de su zona norte. *Ciencia Ergo Sum*. México.
- [10] [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/epoca04/5703/\(6\)Macias.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/epoca04/5703/(6)Macias.pdf).
- [11] [http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/epoca04/5703/\(3\)Nieto.pdf](http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/epoca04/5703/(3)Nieto.pdf).
- [12] <http://www.um.es/dp-geografia/papeles/n35/07%20Doniz%20101-114.pdf>.
- [13] <http://www.crid.or.cr/digitalizacion/pdf/spa/doc16159/doc16159-2c.pdf>.

