

# Aplicación del Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje Subterráneo al Karst de la Región de Torotoro (Bolivia)

**Adolfo ERASO 1, M<sup>a</sup> del Carmen DOMÍNGUEZ 2, Soraya AYUB 3**

1 - Dr. en Geología. Profesor Titular de la Universidad Politécnica de Madrid. España.

2 - Dra. en Matemática Aplicada. Prof. Titular de la Uni. Salamanca. España. E-mail:

[karmenka@usal.es](mailto:karmenka@usal.es)

3 - Ingeniera Geóloga por la Universidad de Sao Paulo. Brasil.

## Resumen

Las investigaciones realizadas se han incardinado en la expedición Humajalanta 98, coordinada por Akakor, a quien agradecemos la logística recibida.

El estudio que presentamos abarca una región de 400 km<sup>2</sup> de extensión, correspondiente a los afloramientos calizos del cretácico superior, que conforman aquí los valles andinos del interior, entre los asentamientos nativos de Rodeo, Julo Grande e Inca Corral. Se han realizado 661 mediciones de planos extensionales, distribuidas en 4 estaciones: Humajalanta, Chiflonkhaka, Huayllas y Rodeo.

Los resultados obtenidos, que reflejan la anisotropía direccional del karst de la región, se han contrastado con las direcciones en las que se desarrollan las cavernas existentes, mediante la aplicación estadística de Kolmogorov. Se discute la aplicación de los resultados obtenidos al karst mixto (normal y termal) existente en la región.

## 1.- Introducción

Los trabajos de karstología que aquí se presentan, han sido realizados durante la "Expedición Humajalanta 98", organizada por Akakor Geographical Exploring, que nos suministró toda la logística que precisamos. Queremos agradecer desde aquí, a su presidente Lorenzo Epis, como máximo responsable de Akakor, y hacerlo extensivo a todos los demás miembros de la referida Sociedad Geográfica.

De los nativos de la región, queremos también agradecer su ayuda a Timoteo Jaillita, dirigente de la Comunidad Laguna, a Mario Jaldín, guardaparque de Torotoro y Amed Becerra, de la Federación Boliviana de Espeleología, también intérprete de Torotoro, intérprete de las lenguas aymara y quechua.

## 2.- Situación General

El área investigada se emplaza en el entorno de la localidad de Torotoro, provincia de Charcas, departamento de Potosí, Bolivia, en los terrenos calizos de la margen derecha del río Caine, donde se encuentran numerosas y excelentes improntas de dinosaurios.

*Geológicamente*, el karst se emplaza en los niveles mesozoicos (cretácico) representados por las calizas de la formación "El Molino", que yace sobre niveles calcareníticos, también karstificados, con un espesor total de más de 200 mts. Su estructura está representada por dos pliegues paralelos, sinclinal de Torotoro y anticlinal de Huayllas, de dirección NW (con cierre periclinal) - SE (donde los pliegues terminan suavizándose). (ERASO et al., 1998).

*Geomorfológicamente e hidrogeológicamente*, la región tiene dos estilos diferentes:

- Al NW de Torotoro una serie de cañones kársticos (El Garrapatal, Inca Corral, Laguna Mayu y Sucu Sumo), donde se emplaza un acuífero kárstico freático (con termalismo según fallas transcurrentes N30°-45°).
- Al SE de Torotoro un gran sinclinal (cuyos sedimentos miocenos confinan parcialmente un acuífero kárstico de carácter artesiano), que se cierra periclinamente en la Comunidad Rodeo.

En la Figura 1 (ERASO et al., 1998) presentamos una cartografía esquemática de la región, de carácter geodésico-geólogo, donde también aparece la ubicación (GPS) de las estaciones de medida donde hemos aplicado nuestras investigaciones.

### 3.- Trabajos de Campo

El objetivo perseguido con estos trabajos, consiste en aplicar aquí, el "Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje Subterráneo en Regiones Kársticas" (ERASO, 1985/86), (ERASO & FERNANDEZ-RUBIO, 1990). Es decir, la cuantificación direccional de la anisotropía del macizo kárstico, en cuyos planos de debilidad estructural, ( $\sigma_1, \sigma_2$ ), se establecen los conductos de drenaje y las galerías donde se desarrollan las cavernas.

La región de Torotoro, donde se emplaza entre otras, la caverna mayor de Bolivia (Humajalanta), supone un excelente ejemplo para contrastar nuestro Método de Predicción.

En la zona estudiada, se realizó la toma de datos ( $N = 661$ ), distribuidos en 13 Estaciones que se agrupan en 4 Zonas (ver Figura 1):

- Zona 1, Sector *Humajalanta* ( $N = 210$ ): Estación 1, Humajalanta Exterior ( $N = 34$ ); Estación 11, Humajalanta Interior ( $N = 46$ ); Estaciones 9 y 10, Laguna Mayu ( $N = 46, N = 41$ ); Estación 13, Tara Kkollu ( $N = 43$ ).
- Zona 2, Sector *Chijflon-Q'haq'ha* ( $N = 192$ ): Estación 2, Chijflon-Q'haq'ha ( $N = 48$ ); Estaciones 3 y 4, de Cañón Torotoro hacia estación 2 ( $N = 38, N = 56$ ); Estación 8, Huaq'ha-Senq'ha ( $N = 50$ ).
- Zona 3, Sector *Huayllas* ( $N = 200$ ): Estación 5, hacia cima Huayllas (2900 mts s.n.m.) ( $N = 69$ ); Estación 6, hacia cima Huayllas (3050 mts s.n.m.) ( $N = 80$ ); Estación 7, hacia cima Huayllas (3250 mts s.n.m.) ( $N = 51$ ).
- Zona 4, Sector *Rodeo* ( $N = 59$ ): Estación 12, Comunidad Rodeo ( $N = 59$ );

### 4.- Tratamiento Informático. Predicción de las Direcciones Preferentes de los Conductos Kársticos

El tratamiento informático de los datos de campo, se ha realizado mediante la aplicación del Método de Predicción (ERASO, 1985/86), utilizando la Versión 4.0 (realizada por M<sup>a</sup> del Carmen Domínguez), no publicada pero disponible vía e-mail.

Los resultados se condensan en la Figura 2, donde se observan comparativamente las correspondientes leyes de distribución, en probabilidad direccional de cada una de las Zonas 1, 2 y 3, que contienen varias estaciones de medida, y del Global, que con una población total de 661 planos extensionales ( $\sigma_1, \sigma_2$ ), predicen las direcciones preferentes de drenaje según modas, en las que cada una de las cuales lleva cuantificada su probabilidad porcentual.

El desarrollo del tratamiento informático, que aquí no detallamos, se encuentra en las páginas 9 a 29 del informe entregado a Akakor (ERASO et al., 1998).

Las modas direccionales que predice el Método de Predicción, se encuentran en la Tabla 1, donde se compara el Global con las zonas 1, 2 y 3 de la región kárstica investigada.

De dicha tabla se desprende que las modas direccionales que predicen las direcciones principales de los conductos kársticos, son, para el karst de Torotoro (Bolivia), las siguientes:

a.- Una moda principal en la clase 4 ( $N45^{\circ}-60^{\circ}$ ) con máximo modal según  $N48^{\circ}$ , con una probabilidad asociada del 18'3%.

b.- Seis modas secundarias:

- según la clase 2, ( $N15^{\circ}-30^{\circ}$ ), con máximo modal a  $N21^{\circ}$ , con el 9'3% de probabilidad asociada,
- según la clase 11, ( $N150^{\circ}-165^{\circ}$ ), con máximo modal a  $N162^{\circ}$ , de 9'2% de probabilidad asociada,
- según la clase 1, ( $N0^{\circ}-15^{\circ}$ ), con máximo modal a  $N12^{\circ}$ , con el 9'0% de probabilidad asociada,

- según la clase 6, (N75°-90°), con máximo modal a N87°, con el 8'1% de probabilidad asociada,
- según la clase 10 (N135°-150°), con máximo modal a N141°, con el 7'5% de probabilidad asociada,
- según la clase 8, (N105°-120°), con máximo modal a N117°, de 6'2% de probabilidad asociada,

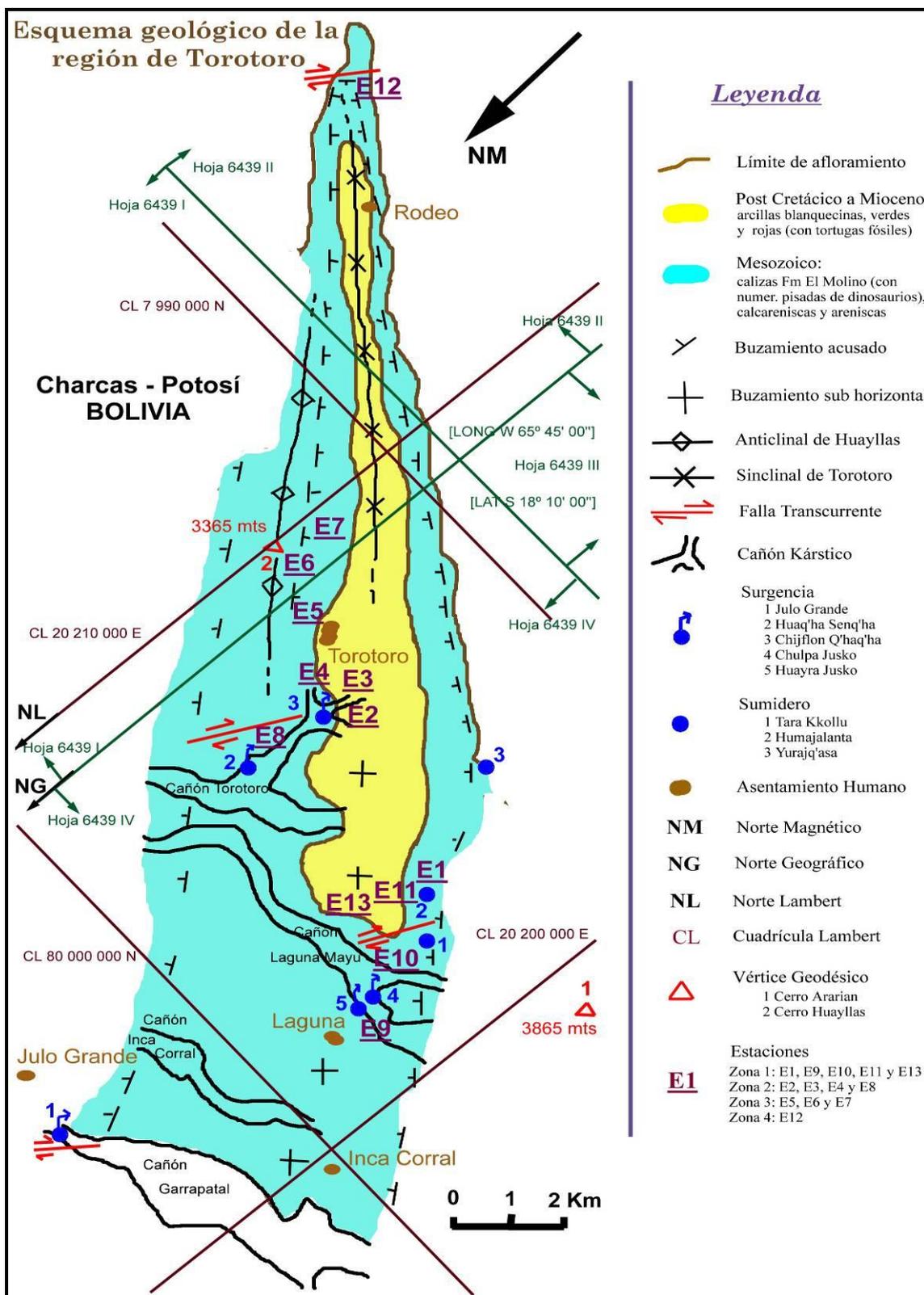


Figura1: Esquema geológico de la región de Torotoro

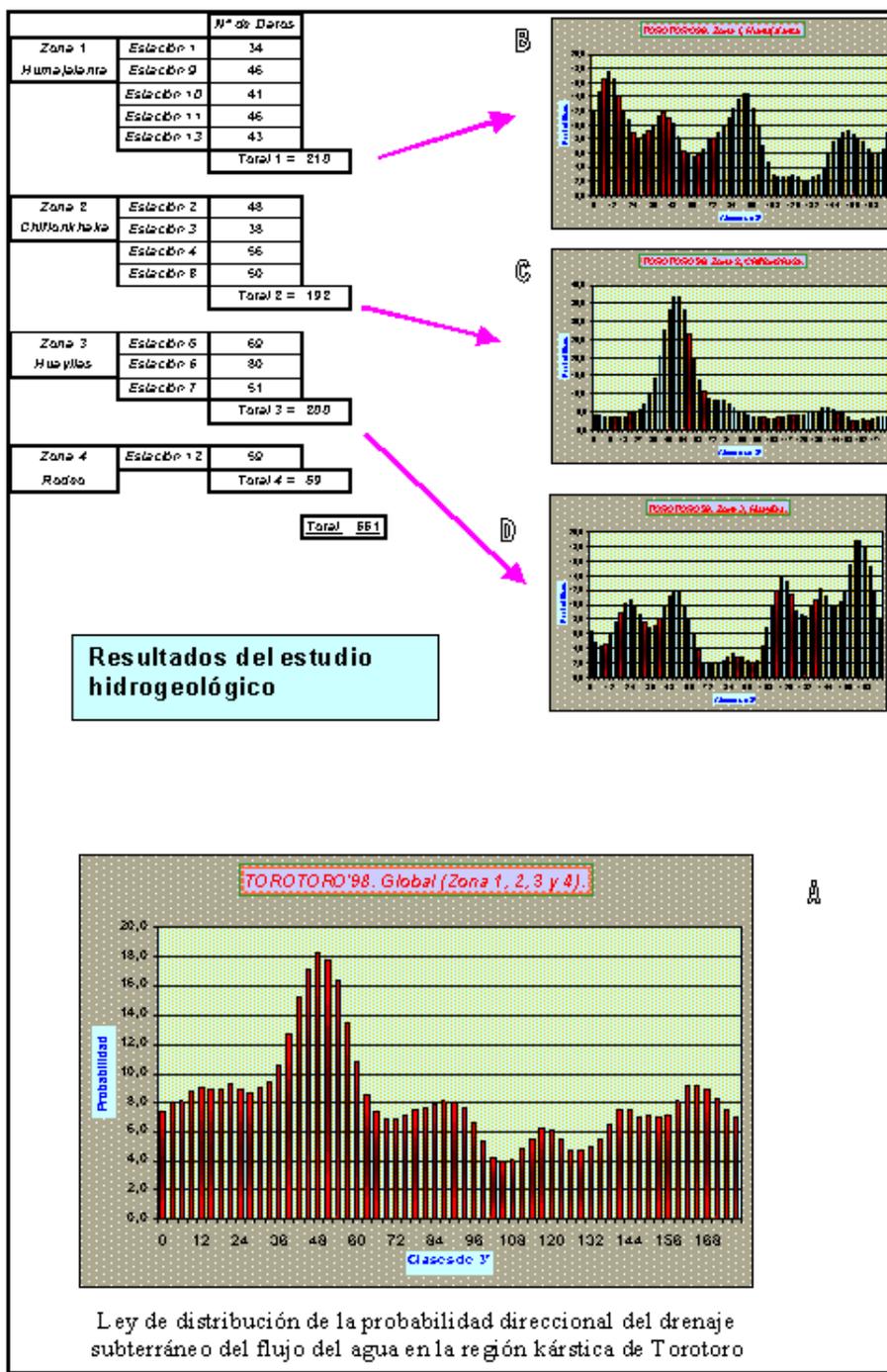


Figura 2: Función de distribución de los planos de debilidad de las diferentes Zonas y el Global

### 5.- Las Direcciones Reales de las Cavernas: Valores Topográficos Anteriores y Actuales (Expedición Humajalanta 98)

Los detalles de las topografías utilizadas, así como su análisis direccional y distribución por clases de 15° sobre norte magnético, vienen detalladas en las páginas 29 a 35 del informe entregado a Akakor (ERASO et al., 1998).

Los resultados, referidos a 4'3 km de topografía subterránea, se representan en la Tabla 2, donde se aprecian:

- a.- Dos modas principales a ambos lados de la clase 4:
  - según clase 5 (N60°- 75°) con 14'9% de probabilidad

- según clase 3 (N30°- 45°) con 10'6% de probabilidad

b- Y dos modas secundarias:

- según clase 9 (N120°- 135°) con 8'9% de probabilidad

- según clase 1 (N0°- 15°) con 8'6% de probabilidad

<b>MODAS</b>				
	Global (N=661)	Zona 3 (N= 200)	Zona 2 (N= 192)	Zona 1 (N= 210)
<b>Clase 1</b>	N 12° / 9%	-	N 3° / 4%	N 9° / 17,6%
<b>Clase 2</b>	N 21° / 9,3%	N 24° / 10,5%	-	-
<b>Clase 4</b>	N 48° / 18,3%	N 54° / 11,9%	N 48° / 36,8%	N 42° / 11,7%
<b>Clase 6</b>	N 87° / 8,1%	N 87° / 3,2%	-	N 90° / 14,3%
<b>Clase 8</b>	N 117° / 6,2%	N 117° / 14%	N 120° / 4,3%	N 120° / 2,8%
<b>Clase 10</b>	N 141° / 7,5%	N 141° / 12,2%	N 141° / 6%	-
<b>Clase 11</b>	N 162° / 9,2%	N 162° / 18,7%	N 162° / 2,8%	N 153° / 9%

Tabla 1: Coincidencia o proximidades de modas de direcciones de drenaje entre las leyes de distribución

Nombre	Coordenadas	Altitud	Desarrollo	Desnivel
Humajalanta	20202437E / 7994580N	2740	3005	-105
Chijflon-q'haq'ha I	20206372E / 7993784N	2720	720	33
Yurajq'asa	20203681E / 7992254N	2815	251	-139
Chilijusq'u	20208423E / 7992118N	2835	193	33
Huayllas	20208906E / 7991980N	3092	327	-154
Huaq'ha-senq'ha	18°06'16"S / 65°46'15"W	2536	20	0
Chankarani	18°06'37"S / 65°48'58"W	2730	76	-9
Chijflon-q'haq'ha II	20202437E / 7994580N	2760	327	-133
Wayq'ho Chinkasq'a	18°07'38"S / 65°46'12"W	2655	86	-8
Huasarín Railp'a	18°07'37"S / 65°46'12"W	2635	33	-8
Puyu allpa	20206365E / 7993775N	2730		

Tabla 2: Resultados topográficos obtenidos en exploración

## 6.- Contraste entre Predicción (Método) y Direcciones Reales (Topografía) de los Conductos Kársticos

Comparando la ley de distribución de las direcciones principales de drenaje - dada por el Método de Predicción - y las direcciones reales de conductos - según las topografías utilizadas -, hemos aplicado el test estadístico de Kolmogorov-Smirnov a la curva acumulada de cada una de ambas distribuciones consideradas, para conocer el error máximo entre predicción y realidad.

Los resultados encontrados, cuyo detalle se encuentra en las páginas 35 a 37 del informe entregado a Akakor (ERASO et al., 1998), los condensamos en la Tabla 3. El error máximo se encuentra en la clase 4 y su valor es  $\varepsilon \leq 3'0\%$ , es decir, muy pequeño. Siendo para la clase 9, del 2'2%, para la 10 del 1'4%, y menor del 1% para las otras clases, lo que a nuestro juicio demuestra la validez del Método de Predicción utilizado.

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Clase 6	Clase 7	Clase 8	Clase 9	Clase 10	Clase 11	Clase 12
Predicción	9,4	8,6	10,1	19,2	6,1	7,3	7,0	5,1	4,5	7,3	8,0	7,4
Cuevas	8,6	8,4	10,6	9,4	15,0	9,7	6,3	8,2	9,0	4,4	3,8	6,8
Acumul. Predi.	9,4	18,0	28,1	47,4	53,4	60,7	67,6	72,8	77,3	84,6	92,6	100,0
Acumul. Cuev.	8,6	17,0	27,6	36,9	51,9	61,6	67,9	76,0	85,0	89,4	93,2	100,0
Error	0,2	0,3	0,2	3,0	0,4	0,3	0,1	0,9	2,2	1,4	0,2	0,0

Tabla 3: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov al comparar la Predicción y los Conductos

## 7.- Conclusiones

Los errores máximos, según el test de Kolmogorov-Smirnov, entre la predicción dada por el Método, y las direcciones medidas en las topografías, de las cavernas existentes, son:

- Para la moda principal (clase 4),  $\varepsilon \leq 3'0\%$
- Para las modas secundarias: Clase 1,  $\varepsilon \leq 0'2\%$ ; Clase 2,  $\varepsilon \leq 0'3\%$ ; Clase 6,  $\varepsilon \leq 0'3\%$ ; Clase 8,  $\varepsilon \leq 0'9\%$ ; Clase 10,  $\varepsilon \leq 1'4\%$ ; Clase 11,  $\varepsilon \leq 0'2\%$ ,

Es decir, lo suficientemente pequeños como para validar la bondad del Método de Predicción utilizado.

## 8.- Referencias

- ERASO, A. 1985/86. Método de Predicción de las Direcciones Principales de Drenaje en el Karst. KOBIE (Sec. Ciencias Naturales), nº XV. Dip. Prov. de Vizcaya, Bilbao, España: 15-165.
- ERASO, A. & FERNANDEZ-RUBIO, R. 1990. Predicción de las Direcciones de Drenaje Subterráneo en Macizos Rocosos. Estado actual de la cuestión. Livro Homenagem al Prof. Carlos Romariz. Secção de Geología Económica e Aplicada. Vol 1. Lisboa, Portugal: 1-20.
- ERASO, A.; DOMINGUEZ, MC.; AYUB, S. 1998. Trabajos de Hidrogeología: Expedición de Akakor, Humajalanta 98. (Informe entregado a Akakor, soporte papel y magnético). 43 p.