

Incidencia de los eventos El Niño y La Niña en la variación de la superficie del Glaciar Huaytapallana

Incidence of event El Niño and La Niña in the variation of surface of Huaytapallana glacier

¹Raida Matos, Gilberto Medina².

RESUMEN

Los eventos El Niño y La Niña en el Océano Pacífico tropical se dan de manera casi periódica a través del tiempo y tienen una clara incidencia en el crecimiento y mantenimiento de la superficie glaciar de los nevados.

Aplicando la técnica multifractal, el método de la caja de contar, la diferencia normalizada del índice de nieve NDSI y la relación de bandas de imágenes satelitales 3/5 se analizó el comportamiento de la superficie glaciar del nevado Huaytapallana, ubicado en la cordillera Central de Perú en años en que se presentaron los eventos El Niño, La Niña y años normales desde 1987 al 2010.

Las técnicas multifractales devinieron muy versátiles, prácticas y sensibles para mostrar la incidencia de los eventos El Niño y La Niña en el espectro multifractal y para estimar la superficie glaciar. El Huaytapallana disminuyó en aproximadamente 15 por ciento hallado por SIG y 16 por ciento con multifractales, su área glaciar en un periodo de 23 años. La estimación de la superficie glaciar por métodos convencionales y multifractales, resultó no significativa en un análisis como muestras relacionadas o pareadas, significando que es indistinto utilizar el SIG o Multifractales para determinar el área glaciar. La dimensión fractal D_0 , en promedio para los últimos 23 años de la superficie glaciar fue de 1.52.

La mayor heterogeneidad se observó en el espectro multifractal, resultando su amplitud $\Delta\alpha$ más grande para los eventos La Niña en comparación de aquellos en que se presentó El Niño o un año normal.

Palabra clave: El Niño y La Niña, cambio climático, retroceso glaciar, NDSI.

ABSTRACT

The events El Niño and La Niña in the tropical Pacific Ocean occur some periodically over time and have a clear impact on the growth and maintenance of the snowy glacier surface.

Applying multifractal technique, the box counting method, the normalized difference snow index NDSI and band ratio 3/5 of satellite images, was analyzed the behavior of the glacier surface of tropical glacier, Huaytapallana located in the Cordillera Central of Peru in years when occur events El Niño, La Niña and normal years since 1987 to 2010.

Multifractal modern techniques became very versatile, practical and sensitive to show the impact of El Niño and La Niña in the multifractal spectrum and to estimate the glacier surface. The Huaytapallana decreased by approximately 15 per cent find for SIG and 16 per cent find with multifractals, otheir glacier area in a period of 23 years. The estimate of the glacier surface by conventional methods and multifractal, were not significant in an analysis as related or paired samples, meaning it not diferent to use method multifractal or GIS to determine the glacier area. The fractal dimension D_0 , on average for the past 23 years, the glacier surface was 1.52.

The greater heterogeneity was observed in the wider multifractal spectrum for La Niña events compared to those that are presented El Niño or a normal year.

Key words: El Niño and La Niña, climate change, glacier retreat, NDSI, ratio of bands 3/5, multifractals.

¹Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María.
²Ing. Agrónomo

INTRODUCCIÓN

La pérdida de la masa glaciar de los nevados tropicales de nuestro país es tan notoria que hasta se le considera como un indicador del cambio climático que está sufriendo el planeta Tierra. Según afirma Urrutia & Vuille (2009) para el año 2020, todos los glaciares por debajo de los 5 500 metros desaparecerían.

El concepto de multifractales contempla un número infinito de dimensiones fractales. Un proceso multifractal se caracteriza por eventos extremos y más o menos aislados. A pesar de las ventajas conceptuales y de mayor flexibilidad en el análisis, el concepto multifractal no ha sido aplicado masivamente, posiblemente la complejidad de los parámetros multifractales constituye un impedimento para la interpretación de los resultados (Posadas *et al.*, 2003).

En el presente trabajo se utilizaron imágenes satelitales de los años 1985, 1993, 2001 y 2008 con resolución de 30 metros por pixel, y el método empleado fue el de box counting o método de la caja de contar, empleado para cuantificar los pixeles de la superficie glaciar, asimismo se usó el Índice de Diferencia de Nieve Normalizada (NDSI) y el ratio imagen o relación de bandas 3/5 para delimitar la superficie glaciar y discriminar la nieve de la posible presencia de nubes, roca o suelo. Las imágenes satelitales escogidas fueron las que no presentaban nubes sobre la superficie glaciar o en una mínima

proporción que no representaban un problema para la digitalización. Los objetivos propuestos en este trabajo fueron:

El general: Investigar la aplicabilidad de las técnicas fractales para estimar la magnitud (área) de los glaciares, caracterizar sus propiedades fractales, así como la relación de tales propiedades de los glaciares con las variaciones climáticas.

Los específicos:

- Constatar la bondad de la técnica multifractal para el estudio de glaciares.
- Determinar los parámetros multifractales del glaciar Huaytapallana en años en que se presentaron los eventos El Niño, La Niña y años normales, para los últimos 23 años.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio abarca el glaciar Huaytapallana (4 396 msnm) localizado en la Cordillera Central de Perú, muy cercano a la ciudad de Huancayo. El área de estudio del Nevado Huaytapallana abarca la cuenca del río Shullcas que abastece de agua a la ciudad de Huancayo, que tiene un área de 221.89 Km²

El perímetro es de 82 634 m, altitud mínima de 3 199 msnm, máxima de 5 550 msnm, y altitud promedio de 4 396 msnm (Núñez, 2008). El nevado Huaytapallana abastece el 80% del agua potable para la ciudad de Huancayo

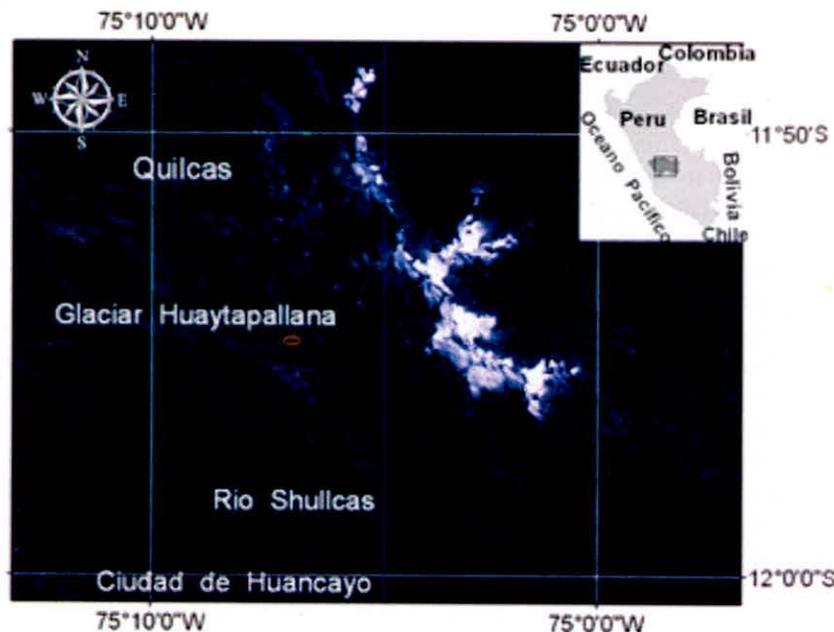


Fig. 1. Localización del nevado Huaytapallana

MATERIALES Y MÉTODOS

Se usaron imágenes correspondientes al Mapeador Temático Landsat TM5, éste tiene 7 bandas, cada una capta una determinada longitud de onda, la resolución es de 30 metros por pixel; las imágenes Landsat son multispectrales. Todas las imágenes fueron obtenidas en la dirección <http://www.inpe.br/> del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Brasil. Las imágenes

pertencen a la estación de invierno, entre fines de mayo a agosto; las escogidas no presentan problemas de nubes sobre la superficie glaciar.

Las coordenadas geográficas del glaciar Huaytapallana se hallan entre $-11^{\circ}45'26''$ a $-11^{\circ}32'26''$ de Latitud, y entre las Longitudes $-75^{\circ}8'21''$ a $-74^{\circ}58'28''$.

En el presente trabajo se utilizaron las bandas 2, 3 y 5 de los años indicados:

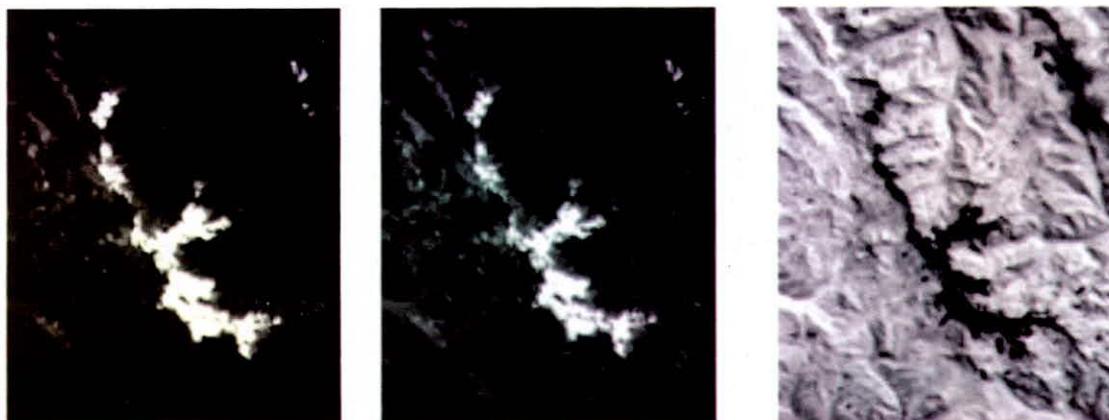


Figura 2. Bandas 2, 3 y 5, respectivamente, del nevado Huaytapallana del 2008.

La figura 2, muestra que las bandas 2 y 3 son similares en sus valores de reflectancia, pero la banda 5 presenta mucha diferencia con las anteriores. Las bandas 2 y 5 son usadas para hallar el NDSI (Índice Normalizado de Diferencia de Nieve); varios trabajos acerca de este índice están en la literatura (Gómez-Landesa *et al.*, 2001) para detectar propiedades del glaciar (Salminen *et al.*, 2009), y las bandas 3 y 5 son recientemente usadas como una razón (ratio) de imágenes para estudiar el

espectro multifractal del glaciar (Paul *et al.*, 2007).

Tendencia de la temperatura en la zona de los glaciares

Como se aprecia en la figura 3, la tendencia en el intervalo de tiempo 1968-2008, describe un incremento de la temperatura media anual de alrededor de 1.58°C lo que es corroborado por IPCC (Bates *et al.*, 2008).

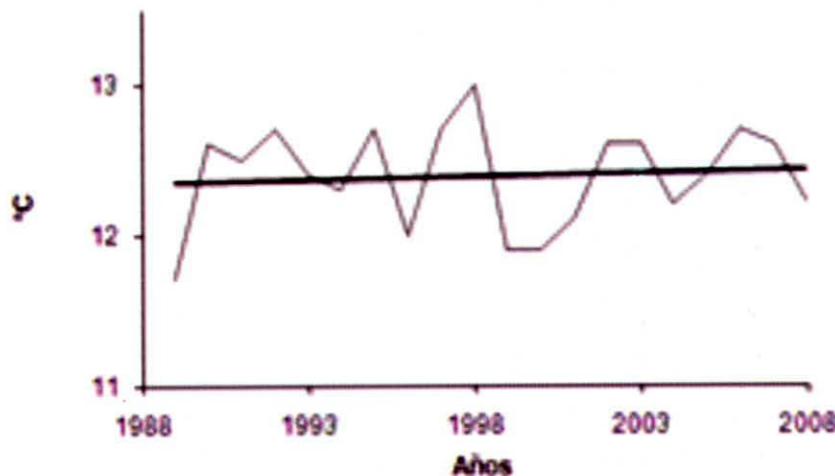


Figura 3. Tendencia de la temperatura media anual, en el entorno del Huaytapallana (Fuente: SENAMHI-Perú).

Métodos para estimar la cobertura glaciar

El perfil espectral para la imagen (figura 4b) respecto de algún pixel fijo (punto negro sobre la figura 4a), muestra los valores de pixel en una

imagen compuesta con siete bandas (figura 4b), esto es corroborado por Pitte *et al.*, (2009) de la imagen compuesta con 7 bandas en un punto P1, respectivamente.

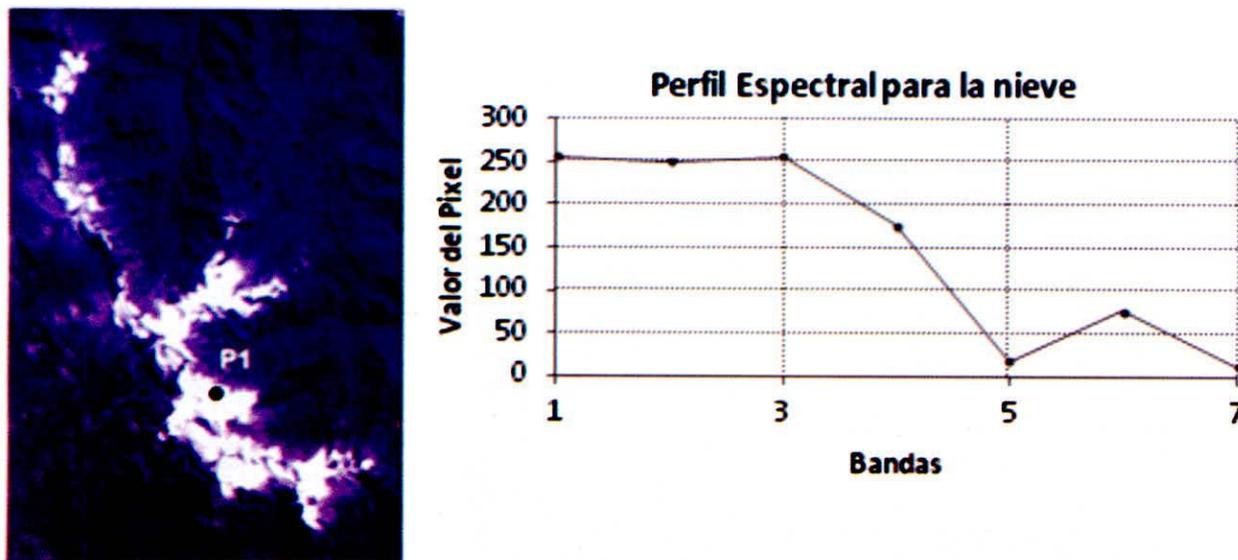


Figura 4. Imagen 2008 (RGB 321) del nevado Huaytapallana, y perfil espectral

Como se puede apreciar en la figura 4, las bandas 1 y 3 presentan mayor reflectancia (valor de pixel) y las bandas 5 y 7 tienen bajo valor de reflectancia.

Procedimiento 1

Obtenidas las imágenes, se georreferenciaron con la carta nacional a escala 1:100 000, y adaptaron al formato WGS 84. Se combinó en 3 bandas (RGB), se cortó la imagen a un número redondo de píxeles, recomendándose que sea múltiplo de 10, por ejemplo 600x800 píxeles abarcando áreas de 14.4 km². Luego se separó las bandas (banda 2 (b2), banda 3 (b3) y banda 5 (b5)) y se obtuvo otras imágenes modificadas correspondientes al NDSI y al ratio 3/5, y se estimó las características de la superficie glaciar, usando para ello:

a) *NDSI* (Índice Normalizado de Diferencia de Nieve), comúnmente empleado para detección de nieve; este método ayuda a diferenciar entre cobertura de nubes, nieve o hielo (Hall *et al.*, 1995). El NDSI es hallado tomando la diferencia normalizada de las bandas Landsat 2 y 5, empleando la siguiente ecuación:

$$NDSI = \frac{(b2 - b5)}{(b2 + b5)} \quad (1)$$

El NDSI está basado sobre la respuesta espectral particular de glaciar con alta reflectancia en el espectro visible y el infrarrojo inferior (Pitte *et al.*,

2009).

b) El ratio imagen 3/5 es una simple razón entre las bandas Landsat 3 y 5. El ratio imagen 3/5 es un excelente indicador de nieve y hielo (Todd, 2004; Vargas *et al.*, 2009). El más efectivo índice para el mapeo glaciar automatizado es el ratio imagen 3/5 (Paul *et al.*, 2007), y para discriminación de nieve o hielo, en regiones de sombras, tierra o roca. La razón de bandas 3/5 fue entonces aplicada a escenas Landsat usando las bandas 3 (0.63–0.69 μm), y la banda 5 (1.55–1.75 μm).

$$Ratio = \frac{(b3)}{(b5)} \quad (2)$$

Procedimiento 2

Empleando el ratio imagen 3/5, por resultar mejor el perfil horizontal, dado que presenta menos confusión entre la cobertura glaciar y el agua, comparado con los resultados obtenidos con el NDSI.

En el caso de las áreas con suelo y/o roca tienen valores más uniformes con respecto a la cobertura glaciar. En el caso de las sombras, éstas se diferencian más dentro de la cobertura glaciar comparadas con los resultados del NDSI (Vargas, 2009); binarizamos la imagen con el programa image j, grabamos el archivo en formato texto, y en

el programa Mass, especial para analizar Fractales por el método de box counting, hallamos el espectro fractal ajustando a un coeficiente de determinación entre 98 al 99%. La imagen combinada RGB, fue recortada con el programa Envi y luego con el programa Erdas, se separaron las bandas, se vuelve al Envi y se realiza la división

entre las bandas 3 y 5, luego se binariza y se procesa con el programa Mass que emplea el método de box counting, que consiste en contabilizar las celdas donde se halla al menos un pixel. Se busca la linealidad con un ajuste del coeficiente de determinación del 98 al 99%.

Comparación de los índices para nieve

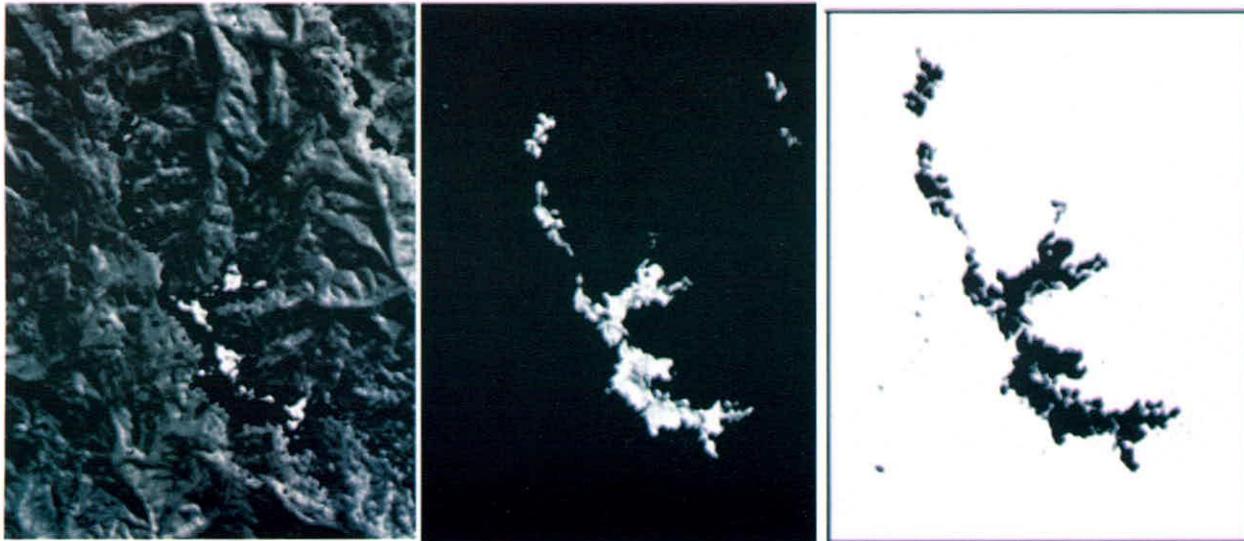


Figura 5. NDSI, Ratio 3/5 e imagen binarizada, respectivamente del 2008

El NDSI y el ratio Imagen 3/5, son frecuentemente usados para identificar la cobertura glaciar, y también para discriminar entre nieve, nube, roca o

suelo. El análisis de los *Perfiles Horizontales* de la figura 8, muestra las diferencias entre los dos índices.

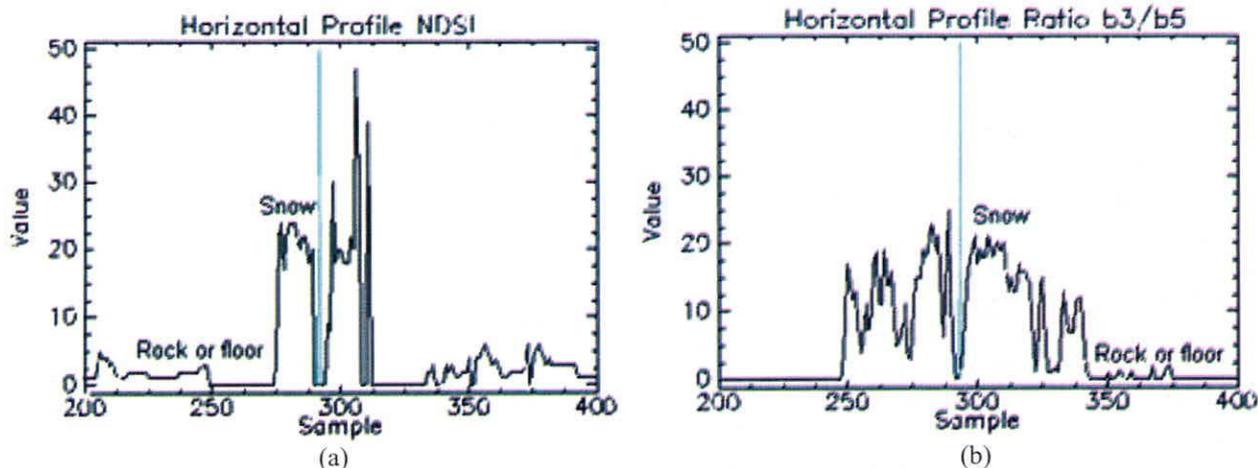


Figura 6. (a) Perfil horizontal NDSI 2008. (b) Perfil horizontal para el ratio 3/5

Como se aprecia en las figuras 5 y 6, el método del ratio imagen 3/5 resultó mejor que el NDSI para la eliminación de sombras como nubes (Vargas *et al.*, (2009). En el caso de las áreas con suelo y/o roca tienen valores más uniformes con respecto a la cobertura glaciar (Figura 6(b)). En el caso de las

sombras, éstas se diferencian más dentro de la cobertura glaciar comparadas con los resultados del NDSI; basándonos en este resultado preliminar, hemos utilizado el ratio imagen 3/5 para obtener la imagen modificada y binarizada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación del Área Glaciar

La figura 3 nos da una idea de la deglaciación del Huaytapallana en el tiempo.

El nevado Huaytapallana tiene una deglaciación dinámica, pues crece en los eventos La Niña y decrece en los eventos El Niño, aún así la superficie viene disminuyendo ostensiblemente en el tiempo, sobretodo en los últimos 23 años, desde 1987 al 2010.

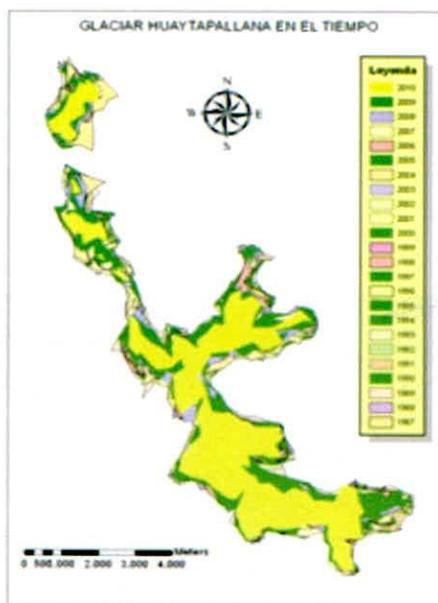


Figura 7. Deglaciación del nevado Huaytapallana en el tiempo.

Tabla 1. Área glaciar obtenida por SIG y Multifractales

SIG			EVENTOS	MULTIFRACTALES		
AÑO	AREA (m ²)	%		AÑO	AREA (m ²)	%
1987	24264631	100	EN	1987	24336413	100
1988	26664430	110	LN	1988	26364431	109
1989	25564430	105	N	1989	25764429	106
1990	24685432	102	N	1990	24185437	100
1991	24575433	101	EN	1991	24275435	100
1992	26475431	109	EN	1992	26275432	108
1993	25875437	107	N	1993	25975444	107
1994	21885434	90	EN	1994	21785435	90
1995	25175431	104	N	1995	25075439	103
1996	25375434	105	N	1996	25475436	105
1997	20985437	86	EN	1997	20885430	86
1998	26275432	108	LN	1998	26575438	110
1999	24375435	100	N	1999	24475431	101
2000	24376436	100	LN	2000	24476434	101
2001	25076430	103	N	2001	25176431	104
2002	23476439	97	EN	2002	23376438	96
2003	25976431	107	N	2003	25776434	106
2004	21116433	87	EN	2004	21216435	87
2005	25117537	104	EN	2005	25317536	104
2006	26117534	108	LN	2006	26157535	108
2007	25917533	107	LN	2007	25957534	107
2008	25017535	103	LN	2008	25127432	104
2009	20917554	86	EN	2009	20717557	85
2010	20537553	85	EN	2010	20297551	84

El cuadro 1 muestra que el Huaytapallana perdió un 15% de su superficie glaciar en promedio en un

lapso de 24 años, esto es corroborado por Ramirez *et al.*, (2001).

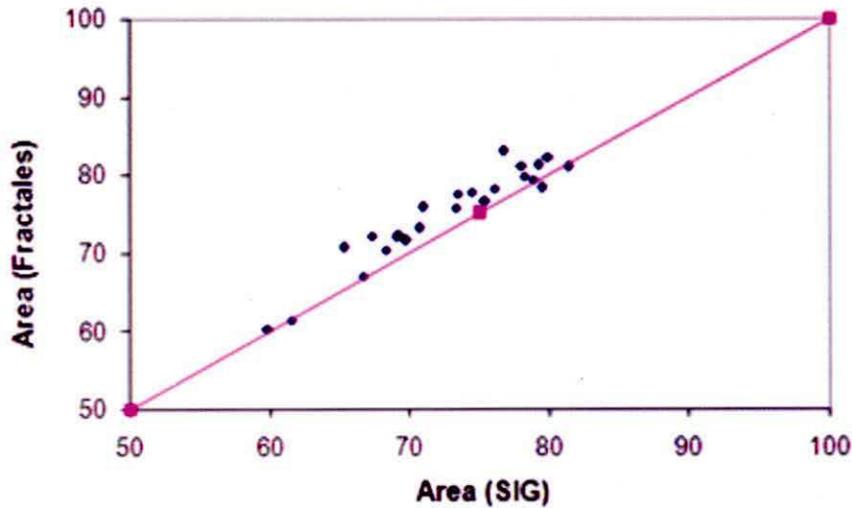


Figura 8. Correlación de áreas obtenidas con SIG y Multifractales.

Como se observa en la figura 8, existe una alta correlación entre las áreas obtenidas por SIG con

respecto a las obtenidas por la técnica multifractal **Función q vs Dq**

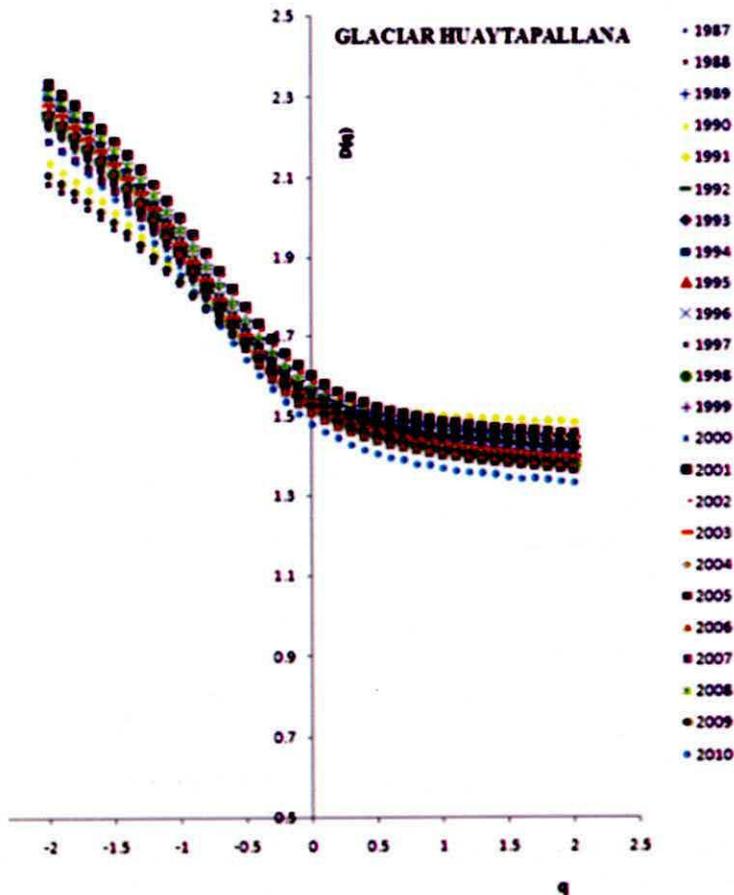


Figura 9. Función q vs Dq para el Huaytapallana

En la figura 9 la dimensión fractal generalizada Dq , muestra una distribución típica para sistemas heterogéneos ($D_0 \neq D_1 \neq D_2$), es fácilmente perceptible que $D_0 > D_1 > D_2$, presenta un quiebre en $q=0$. Para el Huaytapallana la dimensión fractal D_0 promedio es de 1.543, $D_1=1.442$ y $D_2=1.413$

Comportamiento multifractal

Los espectros multifractales de la figura 11

muestran unas curvas asimétricas con un pico en $q=0$ y una tendencia más grande al lado derecho donde $q < 0$. La asimetría a lo largo del lado izquierdo indica el dominio de muy grandes valores en los patrones de variabilidad espacial (o en tamaño de cajas), mientras que la asimetría al lado derecho indica dominio de pequeños o presencia de valores extremadamente pequeños (Eghball, 2003).

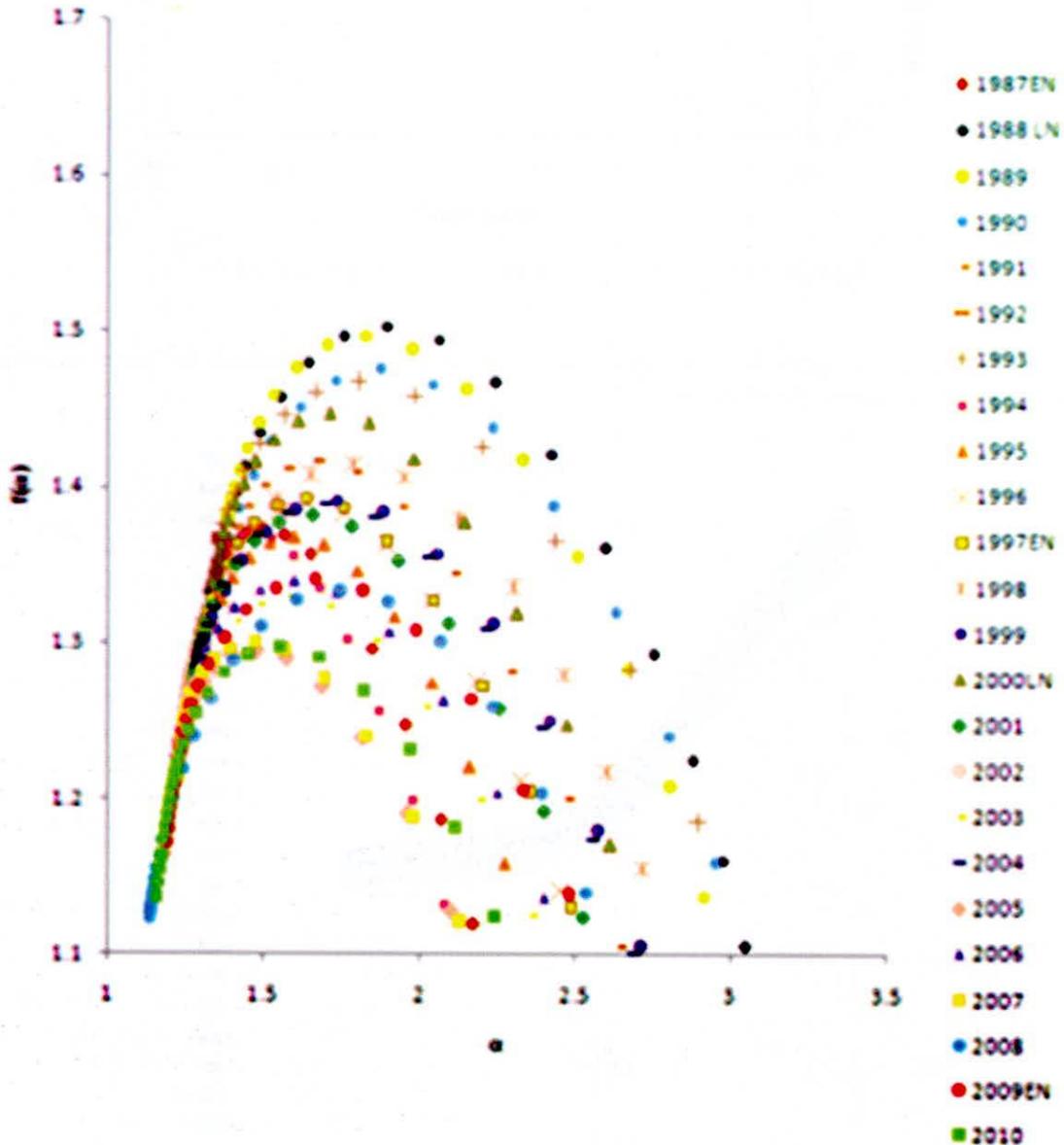


Figura 10. Espectros multifractales del Huaytapallana

Se nota una ligera tendencia o desviación hacia la derecha de las curvas de los años 1988 y 2000 en

que coincidentemente se presentó el fenómeno La Niña (NOAA, 2009).

Parámetros multifractales

Tabla 2. Parámetros multifractales del Huaytapallana para los últimos años

		HUAYTAPALLANA								Pará_ metro
Tiempo	Detalle	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Med ia
	D_0	1.53 5	1.53 3	1.50 5	1.50 9	1.52 5	1.56 9	1.55 2	1.48 1	1.54 3
Dimensión entropía	D_1	1.42 9	1.42 6	1.39 8	1.40 6	1.43 9	1.46 6	1.46 3	1.36 8	1.44 2
	D_2	1.39 5	1.39 5	1.36 2	1.37 3	1.43 1	1.43 9	1.43 3	1.33 3	1.41 3
Longitud de la variabilidad	$max(\alpha)-min(\alpha)$	1.65 7	1.65 5	1.62 7	1.66 1	1.43 2	1.63 3	1.29 7	1.62 2	1.54 7
	$promedio(\alpha)$	2.06 2	2.06 6	2.01 5	2.04 0	2.00 2	2.09 4	1.93 9	1.97 9	2.03 4
	$(max(\alpha)+min(\alpha))/2$	2.20 1	2.20 2	2.14 9	2.18 0	2.12 7	2.23 8	2.06 1	2.12 0	2.17 3
	$f[\alpha (q=0)]$	1.53 5	1.53 3	1.50 5	1.50 9	1.52 5	1.56 9	1.55 2	1.48 1	1.54 5
	D_0-D_1	0.10 7	0.10 7	0.10 7	0.10 3	0.08 7	0.10 3	0.08 9	0.11 3	1.10 1
	$D_0-f[\alpha(q=-1)]$	0.49 6	0.48 9	0.48 7	0.50 9	0.41 8	0.48 8	0.37 4	0.46 4	0.45 5

Estos parámetros permiten comparar por ejemplo los valores de D_0 , con los valores de $f[\alpha (q=0)]$ que coinciden en valor, asimismo permite el poder verificar que se cumpla que $D_0 \neq D_1 \neq D_2$, y al mismo tiempo que $D_0 > D_1 > D_2$ para sistemas heterogéneos (es decir que la concentración de materia glaciara sea diferente en toda su superficie) o lo contrario para sistemas homogéneos.

CONCLUSIONES

1. La teoría multifractal es una herramienta promisoría para vislumbrar el comportamiento caótico de los glaciares, cuya superficie decrece y crece en el tiempo.
2. El derretimiento de los glaciares, en parte es afectado por “El Niño” y el crecimiento glaciara por la Niña, constatado por Técnicas SIG o Multifractales.
3. La superficie glaciara tiene un comportamiento dinámico variable en el tiempo; sólo si

tomamos en cuenta los años de inicio y final del presente estudio podemos concluir que la reducción promedio de la superficie glaciara del Huaytapallana obtenida por SIG es de 15 por ciento, mientras que la obtenida por la técnica multifractal es del 16 por ciento en el periodo comprendido de 1987 al 2010.

4. Las áreas glaciares del Huaytapallana obtenidas por métodos convencionales (SIG) y multifractales, con la prueba de t, resultaron no significativas y con alto coeficiente de correlación (0.951 y 0.885 respectivamente) lo que significa que es indistinto o estadísticamente da igual utilizar el SIG o multifractales para determinar el área.
5. La dimensión fractal D_0 promedio, para la superficie glaciara fue de 1.543. En la mayoría de veces D_0, D_1, D_2 y $\Delta\alpha$ presentaron menores valores ante los eventos El Niño y mayores ante La Niña.

6. La moderna técnica multifractal devino muy versátil, práctica y sensible para mostrar la incidencia de los eventos El Niño y La Niña en el espectro multifractal y en la función $\Delta\alpha$ y suficientemente precisa en el campo ingenieril para estimar la superficie glaciar.
7. Para las series de tiempo de las áreas, en la mayoría de veces guarda una correlación de una mayor área para los eventos La Niña (1988, 1998 y 2000) y una menor área para los eventos El Niño (1987, 1991, 1997 y 2009).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bates, B.; Kundzewicz, S.; Palutikof, J.; 2008. Climate change and water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on climate Change, IPCC Secretariat, Geneva 210 pp.
- Braña, J.P., 2003. Introducción a la Geometría Fractal. Curso on line en <http://fractaltec.org>. Buenos Aires, Argentina 59 p.
- Chhabra, A. B. y Jensen, R.V., 1989, Direct determination of the $f(a)$ singularity spectrum. *Physical Review Letters*, 62, pp. 1327–1330.
- Chevallier, P.; Pouyaud, B.; Suarez, W.; 2004, Climate Change Impact on the water resources from the mountains in Peru. Paper presented at the OECD Global Forum on Sustainable Development: Development and Climate Change, OECD, Paris, 13, pp. [en línea] < <http://www.oecd.org/dataoecd/37/20/34692989.pdf> > [consulta : 26 de Setiembre del 2009].
- Dyurgerov, M. y Meier M., 2000, Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers. pp 97, 1406-1411
- Eghball, B.; Schepers, J.S.; Negahban, M. and SCHLEMMER, M.R.; 2003, Spatial and temporal variability of soil nitrate and corn yield: multifractal analysis. *Agronomy Journal*, 95, pp. 339–346.
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J. And Sicart, J., 2003 Tropical climate change recorded by a glacier of the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research*, 108, D5, 4154.
- Gomez-Landesa E.; Rango A.; Hall D.; 2001, Improved snow cover remote sensing for snowmelt runoff forecasting. *Remote Sensing*. 65 pp.
- IPCC, 2001, Third report of evaluation climatic change 2001. The scientific basis. They summarize for responsible for political and summary technician, 83 pp. [en línea] < <http://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/scientific-basis/scientific-spm-ts-sp.pdf> > [consulta : 21 de Setiembre del 2009].
- Mandelbrot, B. 1993. Los objetos fractales. Forma, azar y dimensión. Tusquets Editores, S.A., ISBN 978-84-7223-458-1
- NOAA, 2009. Multivariate Enso Index. [en línea] < http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/enso.mei_index.html > [consulta : 17 de diciembre del 2009].
- Posadas, A.; Gimenez, D.; Quiroz, R.; 2002, Análisis multifractal de la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica en un suelo estratificado *Revista de Investigación de Física*, ISSN 1605-7744, Vol.5, 36-43.
- Senamhi, 2005. Guía Básica de Meteorología General. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) del Perú. Dirección General de Meteorología, 43 pp.
- Vargas, C., Villón, C. y Pasapera, J., 2009. Comparación de Técnicas para el Mapeo de Cobertura Glaciar con Imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoramento Remoto, Natal, Brasil, INPE*, p. 6911-6917.
- Pasapera, J., 2009. Comparación de Técnicas para el Mapeo de Cobertura Glaciar con Imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca, Ancash, Perú. *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoramento Remoto, Natal, Brasil, INPE*, p. 6911-6917.
- Zapata M. 2006. “Deglaciación y Cambio Climático en la Cordillera Blanca” Instituto Nacional de Recursos Naturales, INRENA. Intendencia de Recursos Hídricos, IRH, Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, UGRH, Ponencia, diciembre 2006 en la UNALM.

Correspondencia

Raida Matos

Casilla postal 156 Tingo María,
Km.1.5 carretera a Huánuco,
raidamatos04@yahoo.es
Teléf: (062)564041