

# CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS CAÍDAS DE ROCA EN LIMA METROPOLITANA Y EL CALLAO ENFOCADO AL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR ESTOS PROCESOS

---

Lucile Tatard (1,2,3), Sandra Villacorta (3), Pascale Metzger (2)

1. ISTerre - OSUG – Universidad de Grenoble, Francia

E-mail: lucile.tatard@ujf-grenoble.fr

2. IRD, Lima, Perú

3. INGEMMET, Lima, Perú

## INTRODUCCIÓN

El 85% de la población expuesta a sismos, ciclones, inundaciones y sequías vive en países en desarrollo (IPU, 2010). También esta población vive directamente bajo riesgo por movimientos en masa, los cuales son desencadenados por los fenómenos señalados. Para contribuir a mitigar este riesgo, es necesario contar con información sobre el fenómeno y elaborar mapas de susceptibilidad. En esta tarea se emplea inventarios de los movimientos en masa para identificar los factores que los promueven. El principio básico para elaborar los mapas de susceptibilidad es “El pasado es la llave del presente” según el cual los mismos factores que actuaron sobre los movimientos en masa en el pasado, actuarán en el futuro. De la calidad de los datos empleados y del método utilizado depende la calidad del mapa de susceptibilidad que se obtendrá.

En este trabajo, se presenta pruebas estadísticas para verificar la validez y caracterizar los datos de un inventario de movimientos en masa con el fin de utilizarlos para elaborar un mapa de susceptibilidad. El ensayo se ha realizado con los datos de caídas de roca de Lima Metropolitana y El Callao (Perú) con la intención de diseñar una metodología aplicable a otros eventos similares en otros lugares.

## PRESENTACIÓN DE DATOS

### Presentación del Lugar de Interés y del Proyecto

Lima está localizada en la zona de subducción de la placa oceánica de Nazca por debajo de la placa de América del Sur, donde se espera un sismo de magnitud de momento (Mw) superior a 8 (Tavera y Bernal, 2005; Perfettini et al., 2010) que probablemente detonará un número importante de procesos de movimientos en masa. De hecho, Keefer (2002) muestra que para un sismo de

magnitud Mw=8 en general se esperan más de 100,000 movimientos en masa sobre un área total que puede ser mayor a 10,000 km<sup>2</sup>. Es una necesidad para la capital del Perú, con 9,5 millones de habitantes, de estudiar la ocurrencia de los movimientos en masa para proponer obras de prevención y/o mitigación.

Asimismo, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ha ejecutado como parte del Programa Nacional de Riesgos Geológicos del Perú, el Proyecto de Investigación GA11 « Peligros Geológicos del Área de Lima Metropolitana y la región Callao » cuyo objetivo principal ha sido el generar información que sea de utilidad para las instituciones involucradas en el ordenamiento y desarrollo territorial de Lima Metropolitana y El Callao (Villacorta et al., 2013). Parte de este proyecto, específicamente el análisis de susceptibilidad, se ha realizado en colaboración con el IRD y la Universidad de Grenoble, Francia.

### Obtención de los Datos

La base de este trabajo se apoya sobre el inventario de caídas de roca recientes y antiguas realizado por el INGEMMET en Lima Metropolitana, con datos recopilados desde 1970 a la actualidad. El inventario fue recopilado utilizando imágenes satelitales Google Earth®, fotografías aéreas de Lima y Callao (escala 1/40000, año 1970) y estudio de campo (cartografía al 1/25000). Se cuenta con un inventario de 732 caídas de roca de los cuales ~150 muestran actividad reciente (entre los años 2000 y 2010) y el resto de actividad anterior al 2000 (Fig. 1).

Debido a que no todos los eventos registrados poseen información completa relativa a su geología y geomorfología, se reconstruyó la información con dos fuentes de datos: el modelo numérico de terreno del ASTER GDEM a 30 m y diferentes capas de información elaboradas por el INGEMMET para el Atlas Ambiental de Lima Metropolitana (IMP, 2008).

En este estudio preliminar se analiza los siguientes parámetros: litología, altitud, pendiente y orientación de la ladera.

## PRUEBAS ESTADÍSTICAS

### Distribución de las Áreas de las Caídas de Roca

Primero se estudió la distribución de las áreas (A) para las 732 caídas de roca inventariadas. Hallamos que las áreas siguen una ley de potencia para los eventos que tienen una superficie mayor a  $A_0 = 38 \text{ km}^2$ , utilizando el método de Clauset et al. (2009) (Fig. 2). Físicamente, una ley de potencia significa que las pequeñas caídas de roca son más abundantes que las grandes. Anteriormente, Dussauge et al. (2003) como Malamud et al. (2004) mostraron que los inventarios de movimientos en masa detonados por sismo, lluvia, deshielo o sin detonador conocido siguen una ley de potencia. Dussauge et al. (2003) proponen que un inventario es completo para los eventos con  $A \geq A_0$ , es decir que no falta ningún evento con área mayor a  $A_0$  en el inventario. Son 153 eventos con  $A \geq A_0$  para nuestro inventario.

correlación que proporciona información sobre la repartición espacial de un fenómeno.

El principio del método consiste en calcular la distancia  $r$  entre todos los pares de eventos y representar gráficamente la proporción  $C(r)$  de pares separados por una distancia menor que  $r$ .

Se obtiene  $C(r) \propto r^D$  para valores pequeños de  $r$ , donde  $C(r)$  es la integral de correlación (Grassberger y Procaccia, 1983). Si  $D = 2$  los eventos están distribuidos uniformemente en el espacio mientras que si  $D < 2$  los eventos están más agrupados que una distribución uniforme. Se calcula el valor del exponente  $D$  utilizando el método de « two-point slope » de Eneva (1996).

La dimensión de correlación  $D$  calculada para las caídas de roca de Lima Metropolitana y El Callao es igual a 1.35 para todas las caídas y 1.28 para las caídas con un área mayor a  $A_0$ : las caídas de roca tienen una distribución espacial agrupada (Fig. 3). Esto nos confirma que se puede buscar los factores que controlan la distribución de las caídas, con el objetivo de elaborar un mapa de susceptibilidad por ese fenómeno.

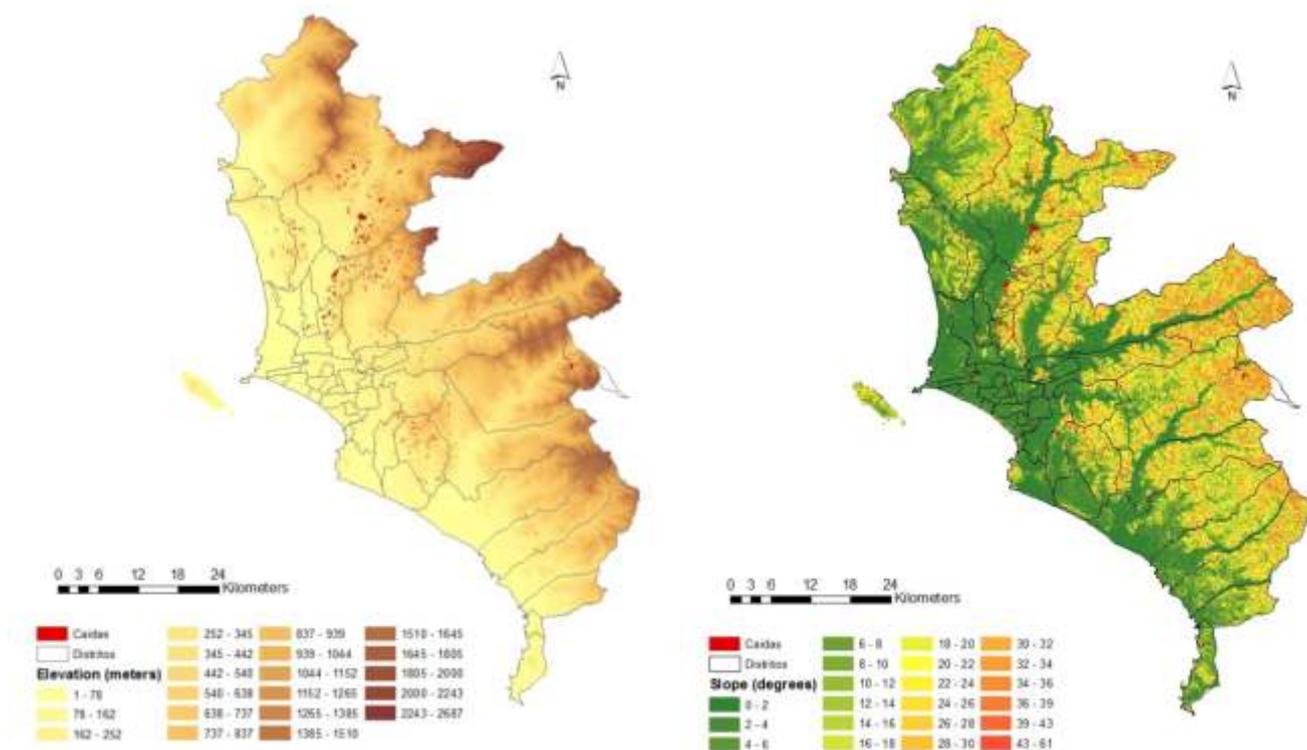


Fig. 1: Ubicación de las caídas de roca (rojo) y valores de elevación y de pendiente para Lima Metropolitana y El Callao.

### Dimensión de Correlación "d" entre las Caídas de Roca

La elaboración de un mapa de susceptibilidad por movimientos en masa asume que la repartición de estos eventos no es al azar, lo que correspondería a una distribución espacial uniforme de los eventos, sino que está dirigida por factores identificables, así como la distribución espacial está agrupada. Se verifica esa hipótesis para nuestro inventario calculando  $D$ , la dimensión de

### Características Estadísticas de las Caídas de Roca en Relación con las de la Topografía

Se debe verificar que las propiedades de las caídas de roca son diferentes a las de la topografía. De no ser así significaría que las caídas de roca ocurrieron aleatoriamente en relación con el parámetro estudiado (geología, pendiente, elevación, etc), y por eso tienen las mismas características que las de la topografía. Las Figuras 4 y 5 nos

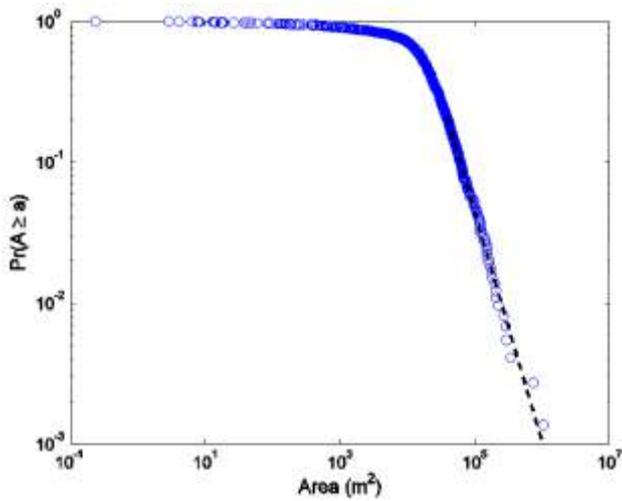


Fig. 2: Función de distribución acumulada (CDF, Cumulative Distribution Function) de las áreas de las caídas de roca en Lima Metropolitana y El Callao (puntos azules). La línea de puntos negra corresponde con el mejor ajuste de una ley de potencia a los datos y tiene como exponente 1.6.

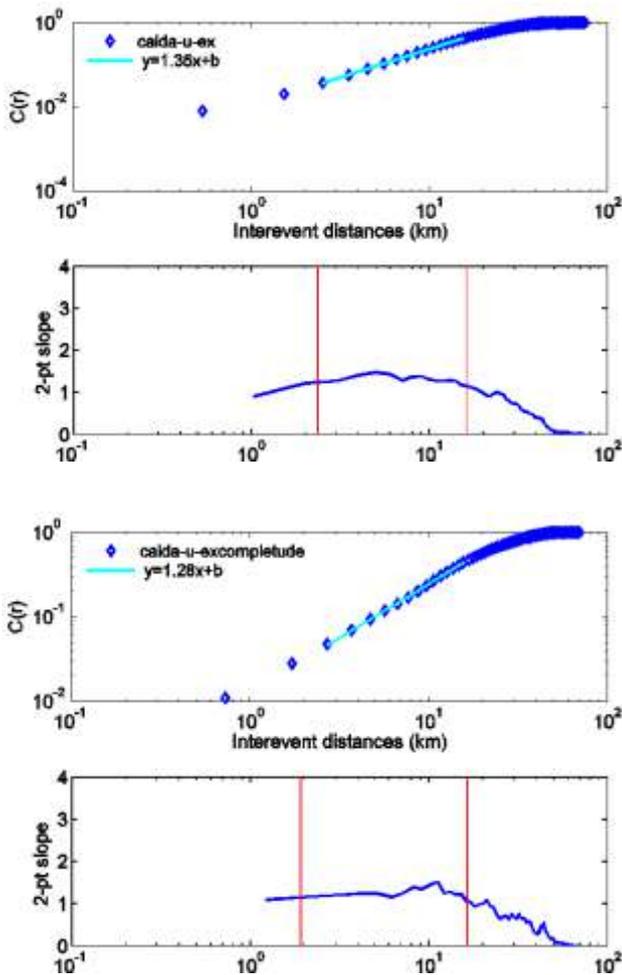


Fig. 3: Integral de correlación (gráficos de arriba) y curvas de “two-point slope” asociadas (gráficos de abajo) para todos los eventos (arriba) y los eventos con  $A \geq A_0$  (abajo) Puntos azules: distancia  $r$  entre todos los pares de eventos, con una distancia menor que  $r$  (función de distribución acumulada), línea azul: pendiente de la curva calculado entre dos puntos seguidos de  $C(r)$ , líneas rojas: rango en el que se calculó el valor de  $D$  y línea cyan: ajuste por mínimos cuadrados de los puntos en el rango definido.

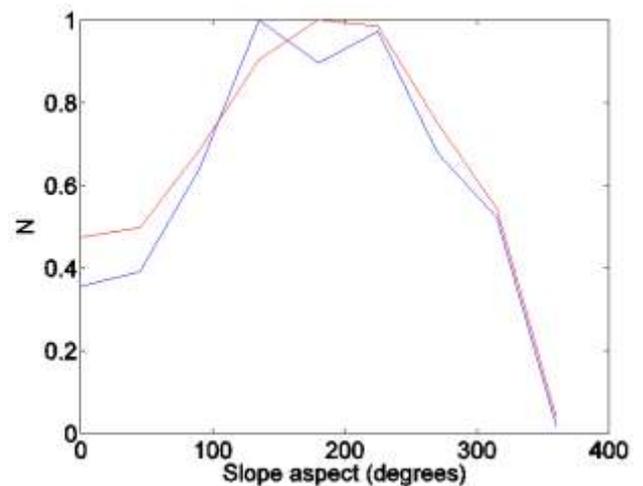
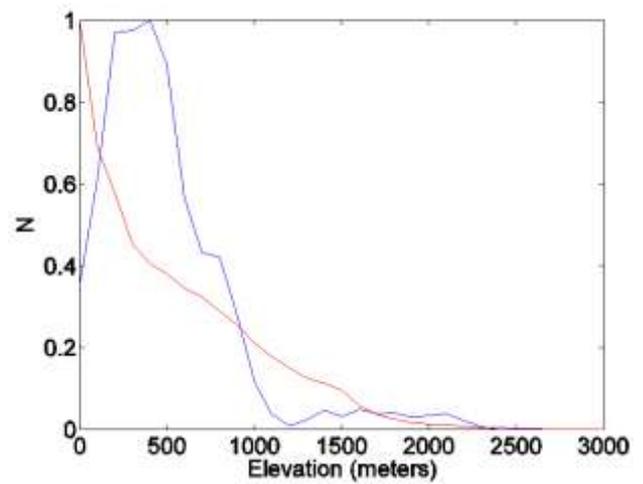
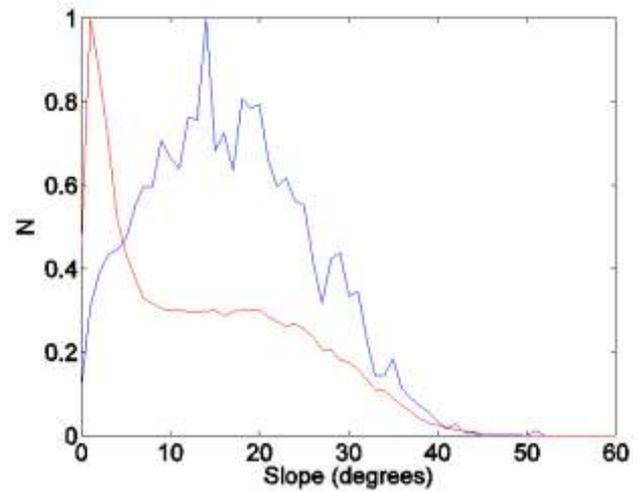


Fig. 4: Comparaciones entre los valores de pendiente (gráfico de la arriba), altitud (gráfico del centro) y orientación de la ladera (gráfico de la abajo) para las caídas de roca (línea azul) y la topografía (línea roja).

indica que la geología, pendiente y la elevación son controles que actúan sobre la ocurrencia de las caídas de roca ya que sus distribuciones son diferentes a la de la topografía. Al contrario, la orientación de las laderas no es un parámetro relevante ya que la distribución es muy similar para las caídas de roca y la topografía.

### Coeficiente de Correlación Lineal entre la Pendiente y la Altitud

Se debe verificar la dependencia entre los parámetros estudiados cuando es relevante. En nuestro ejemplo, los dos parámetros para los cuales se debe verificar la dependencia son la altitud y la pendiente. Se calcula el coeficiente de correlación lineal:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

$\sigma_{xy}$  corresponde a la covarianza entre las variables  $x$  e  $y$ ,  $\sigma_x$  corresponde a la desviación estándar de la variable  $x$  y  $\sigma_y$  corresponde a la desviación estándar de la variable  $y$ . Si  $r$  es cercano a 1 o -1, las variables  $x$  e  $y$  se correlacionan. Si  $r$  es cercano de 0 las variables  $x$  e  $y$  no se correlacionan. La Figura 6 nos indica que la altitud y la pendiente tienen un valor  $r$  igual a 0.63 para la topografía e igual a 0.43 para las caídas de roca. Asimismo se concluye que los valores de pendiente y altitud de las caídas de roca son pocas correlacionadas.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se propone un método para caracterizar las propiedades y la calidad de un inventario de caídas de roca con la intención de elaborar un mapa de susceptibilidad por ese tipo de proceso.

Primero se ha evaluado la exhaustividad del inventario estudiando la distribución de las áreas de las caídas de roca. Sabiendo que el inventario es completo para  $A0 \geq 38 \text{ km}^2$  se ha encontrado que la distribución de las 153 caídas de rocas de Lima Metropolitana y El Callao con un área mayor a  $38 \text{ km}^2$  siguen una ley de potencia con exponente igual a 1.6.

Segundo, se ha calculado  $D$ , la dimensión de correlación, con el fin de caracterizar la distribución espacial de las caídas de roca. Se ha descubierto que  $D \approx 1.3$  así que la distribución espacial de las caídas de roca es más agrupada que una distribución uniforme ( $D=2$ ). Este resultado confirma que es relevante buscar los factores que controlan la ocurrencia espacial de las caídas de roca ya que esa variable no es aleatoria.

Tercero, se ha comparado la distribución de las caídas de roca de cada factor con la topografía. Se ha encontrado que los factores de litología, altitud y pendiente actúan sobre la ocurrencia de las caídas de rocas ya que sus distribuciones

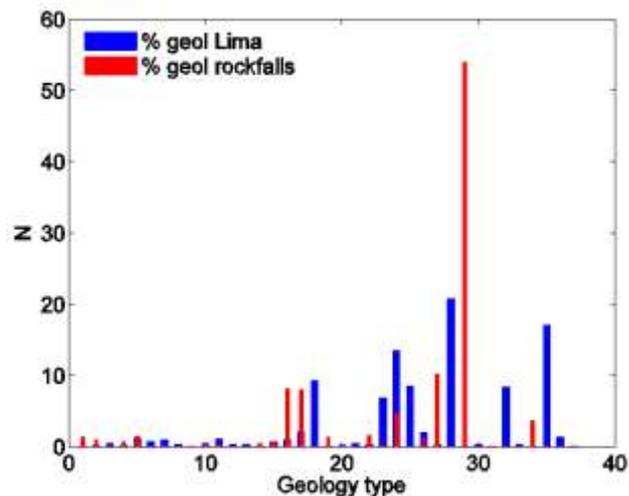


Fig. 5: Geología de las caídas de roca (rojo) y de la topografía (azul). Cada número (1 a 37) corresponde a una formación geológica descrita en la tabla de derecha

1	Js-pp	Grupo Pte Piedra
2	Js-sr	Gpo Pte Piedra, Fm Sta Rosa
3	Js-ve	Gpo Pte Piedra, Fm Ventanilla
4	Ki-an	Sub volcánico andesítico
5	Ki-at	Gpo Lima, Fm Atocongo, calizas
6	Ki-cb	Gpo Pte Piedra, Fm Cerro Blanco
7	Ki-chil	Gpo Casma, Fm Chilca
8	Ki-he	Gpo Morro S00lar, Fm Herradura
9	Ki-lu	Gpo Lima, Fm Lurin
10	Ki-ma	Gpo Morro Solar, Fm Marcavilca
11	Ki-pa	Gpo Lima, Fm Pamplona
12	Ki-pi	Gpo Pte Piedra, Fm Puente Inga
13	Ki-pu	Fm Pucusana
14	Ki-sf	Gpo Morro Solar, Fm Salto del Fraile
15	Ki-va	Gpo Pte Piedra, Fm Puenteo Inga
16	Ki-y	Fm Yangas
17	Kim-h	Fm Huarangal
18	Kis-q/an	Grupo Casma, Fm Quilmana
19	Kis-q/bx	Grupo casma, Fm Quilmana
20	Kms-do	Dolerita o diabasa
21	Ks-je/tgd	Super unidad Jecuan, tonalita, granodiorita
22	Ks-par/tdi	Super Unidad Paraiso, tonalita-diorita
23	Ks-pt/gbdi	Super Unidad Patap, gabrodiorita, diorita
24	Ks-sr/mzgr	Super Unidad Sta Rosa, monzogranito a adamelita
25	Ks-sr/tdi,gd	Super Unidad Sta Rosa, tonalita, diorita, granodiorita
26	Ks-ti/tdi,gd	Super Unidad Tiabaya, tonalita, diorita, granodiorita
27	N-ap	Andesita porfirítica neogena
28	Qh-al	Aluviales del Holoceno
29	Qh-an	Depósitos antrópicos
30	Qh-col	Depósitos coluviales holocénicos
31	Qh-e	Depósitos eólicos holocénicos
32	Qh-e	Depósitos eólicos holocenos
33	Qh-fl	Depósitos fluviales holocenos
34	Qh-lac	Depósitos lacustrinos holocenos
35	Qp-al	Pleistocenos aluviales
36	Qpl-e	Depósitos eólicos pleistocenos

son diferentes a la topografía. El factor de orientación de ladera no es relevante para nuestro estudio ya que su distribución es muy similar entre las caídas de roca y la topografía.

Finalmente se ha calculado la correlación entre la altitud y la pendiente a fin de determinar si esos dos factores son independientes o no. Se ha deducido de los resultados que la altitud y la pendiente de las caídas de roca son independientes y que los dos factores pueden ser investigados por separado.

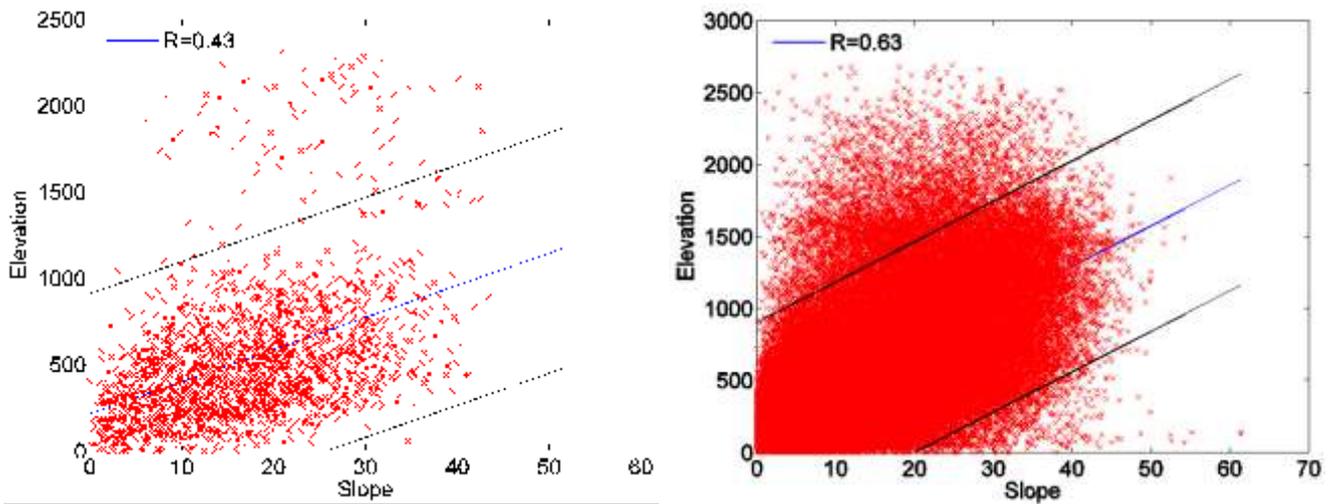


Fig. 6 Correlación entre la altitud y la pendiente para la topografía (gráfico de la izquierda) y las caídas de roca (gráfico de la derecha)

### Referencias:

- Clauset, A.,; Shalizi, C. y Newman, M. (2009). Power-law distributions in empirical data. *SIAM review*, 51(4), 661-703.
- Dussauge, E. Grasso, J. R. y Helmstetter, A. (2003). Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 108(B6)
- Eneva, M. (1996). Effect of limited data sets in evaluating the scaling properties of spatially distributed data: an example from mining-induced seismic activity. *Geophysical Journal International*, 124(3), 773-786.
- Grassberger, P., y Procaccia, I. (1983). Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 9(1), 189-208.
- IMP: Instituto Metropolitano de Planificación (2008). *Atlas Ambiental de Lima Metropolitana*, Lima, Perú. 157p.
- IPU (2010). *Réduction des risques de catastrophes : Un instrument pour la réalisation des objectifs du Millénaire pour le développement. Trousse à outils de plaidoyer pour les parlementaires*. Publicado por IPU con el UNISDR. Geneva, Suiza, septiembre 2010.
- Keefer D. K. (2002) - Investigating landslides caused by earthquakes - a historical review. *Surveys in Geophysics*, 23:573–510.
- Malamud, B., Turcotte, D., Guzzetti, F. y Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(6), 687-711.
- Perfettini, H., Avouac, J.P., Tavera, H.,; Kositsky, Aa., Nocquet, J.M., Bondoux, F., Chlieh, M., Sladen, A., Audin, L., Farber, D.L., (2010) - Seismic and aseismic slip on the Central Peru megathrust. *Nature*, 465(7294).
- Tavera, H., y Bernal, I. (2005) - Distribución espacial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste del Perú. Volumen especial n°6 Alberto Giesecke Matto, *Sociedad Geológica del Perú*, pp. 89-102.
- Villacorta, S., Núñez, S., Úbeda, J., Tatar, L., Pari, W., Fidel, L. (2013) - *Geología, Geomorfología, Peligros Geológicos y Características Ingeniero Geológicas del Área de Lima Metropolitana y la región Callao*. Boletín Serie C. INGEMMET Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico. Inédito.