

Aprendizaje automático en la estimación de la resistencia de los enrocamientos

POR M P ROMO Y S R GARCÍA

Las gravas y enrocamientos constituyen materiales de gran interés en la construcción de presas con cara de concreto o núcleo impermeable y de grandes pedraplenes para carreteras. La evolución en este campo de la mecánica de suelos ha dependido de la observación y evaluación de los sistemas de construcción y, en menor medida, de los progresos en las teorías y pruebas de laboratorio. La condicionante económica ha limitado los avances en los procedimientos de ensaye y las investigaciones se dirigen principalmente a minimizar la incertidumbre en los criterios de interpretación de los comportamientos, y la elaboración de comentarios y recomendaciones prácticas.

La investigación de las propiedades mecánicas de enrocamientos y gravas acusa un desarrollo semejante al de las obras construidas con dichos materiales. A partir de los estudios experimentales desarrollados en la Universidad de Harvard en 1944, los avances en el conocimiento del comportamiento de los materiales granulares han sido promovidos principalmente por la construcción de grandes presas. A pesar de que estas investigaciones han tenido un impacto significativo en la comprensión de la respuesta de los materiales granulares, existen pocos estudios donde se ofrezcan representaciones numéricas de las características físicas de los enrocamientos compactados, los esfuerzos efectivos de confinamiento y sus correspondientes resistencias.

En esta investigación se utilizó la minería de datos, en particular el aprendizaje automático AA con árboles de regresión, para extraer estructuras de comportamiento y criterios de interpretación de respuestas (resistencia) y su asociación con los datos que describen las condiciones que llevan a dichas respuestas (estado de esfuerzos y características físicas).

El punto de partida del AA es la hipótesis de que lo observado puede ser “explicado”, o ha sido generado, por algunas fuentes latentes (variables ocultas) comúnmente de baja dimensión. Estas variables ocultas se infieren a partir de datos que se insertan en un modelo de generación automática donde el conocimiento previo (experiencia) acerca de lo que se considera significativo en las relaciones multivariantes puede ser incorporado como una distribución *a priori* de la variable latente. Aplicar AA al estudio del comportamiento de materiales granulares se traduce como “usar el sentido común”, estrategia simple donde no se requieren sistemas informáticos complejos y no hay necesidad de imponer condiciones matemáticas a la realidad de los materiales y su entorno.

ÁRBOLES DE REGRESIÓN PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA DE LOS ENROCAMIENTOS

Para definir la variación de la resistencia al cortante de los materiales discontinuos, la mayoría de las leyes de variación

del esfuerzo cortante en función del esfuerzo normal son del tipo $\tau = \alpha \sigma_n^\beta$, expresión que no permite relacionar a los parámetros α y β con las características físicas de los materiales. Aplicando AA a la base de datos elaborada por Alberro y Gaziev¹, se encontró que las características físicas que dirigen el comportamiento del esfuerzo efectivo principal mayor σ_1' y el ángulo de fricción a la falla ϕ' de los enrocamientos son la densidad relativa D_r , el coeficiente de uniformidad C_u , el tamaño máximo de partícula d_{max} , la resistencia de sus partículas P_a y los esfuerzos confinantes aplicados σ_3' .

La fig 1 muestra el árbol de regresión $\{\sigma_3', D_r, P_a, C_u, d_{max}\} \Rightarrow (\sigma_1')$. Este árbol se construyó con 133 de los 183 ejemplos incluidos en la base de datos. Los 50 casos separados son usados para la etapa de prueba y ajustes del modelo. El nodo director es σ_3' y los valores de σ_1' en las hojas finales se calculan con modelos lineales MLI. Para usar el árbol debe contestarse la pregunta ¿Qué valor tiene el atributo σ_3' en el ejemplo por clasificar? Las ramas que salen del nodo director corresponden a los posibles valores del atributo. El árbol clasifica al ejemplo filtrándolo de manera descendente hasta encontrar una hoja que corresponde a la clase (o valor numérico) buscada.

La fig 2 muestra la variación de la resistencia al corte con los esfuerzos normales para varios tipos de enrocamientos

to ensayados bajo diferentes niveles de esfuerzo de confinamiento. Las estimaciones con el árbol de regresión, en prueba y operación, son bastante cercanas a las variaciones medidas en laboratorio en todos los niveles de σ_3' .

La fig 2a ilustra el comportamiento de los enrocamientos sometidos a esfuerzos normales efectivos bajos; el árbol reproduce la no-linealidad de las envolventes de falla y logra distinguir las diferencias entre enrocamientos resistentes y débiles. Las figs 2b y 2c exponen el comportamiento de los enrocamientos a niveles de esfuerzo más altos usando los datos de Marsal² y Marachi *et al.*³ apartados para probar el modelo de AA.

Observe que el árbol de regresión describe, bajo esfuerzos normales efectivos elevados, envolventes de falla que se aproximan a la linealidad, lo que coincide con los hallazgos de otras investigaciones experimentales.

Por otro lado, el modelo $\{\sigma_3', D_r, P_a, C_u, d_{max}\} \Rightarrow (\phi')$ (fig 3) tiene una complejidad mayor que la del árbol para σ_1' . Esta complejidad, no del problema sino de la estructuración, permite un mejor “aprendizaje” sobre la relación entre las variables. La fig 4 presenta una comparación entre los valores del ángulo de fricción a la falla medido y estimado con AA.

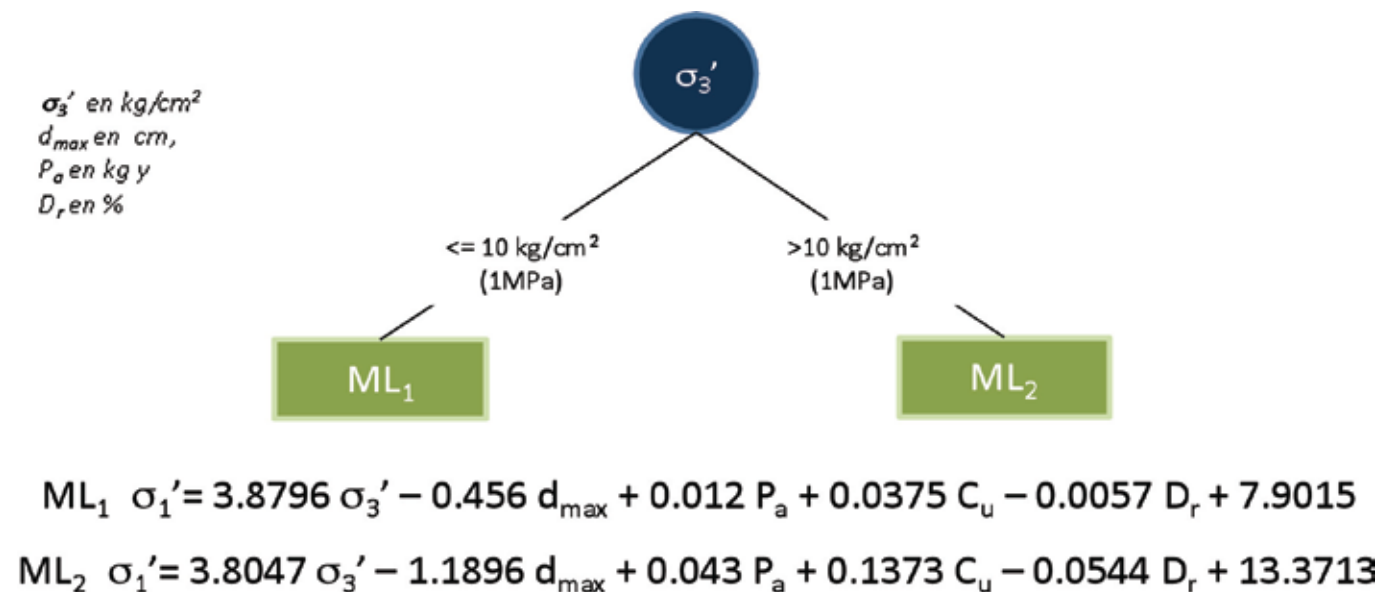


Fig 1. Árbol de regresión para estimar el esfuerzo principal a la falla

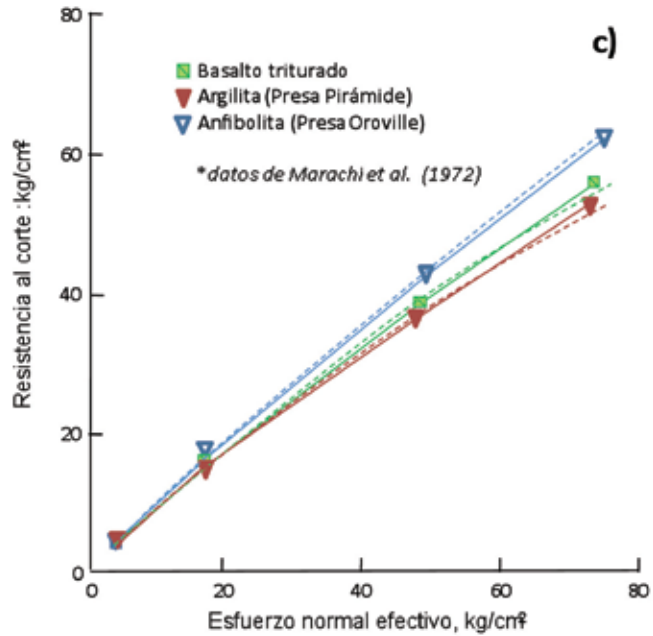
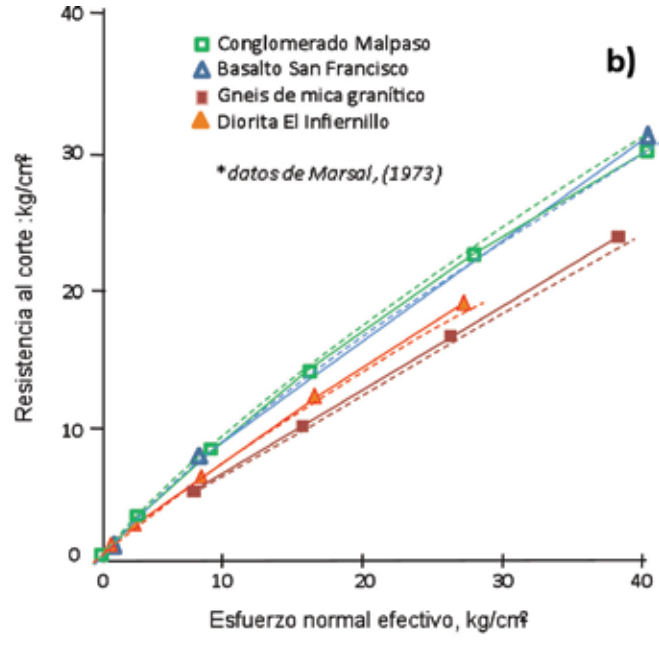
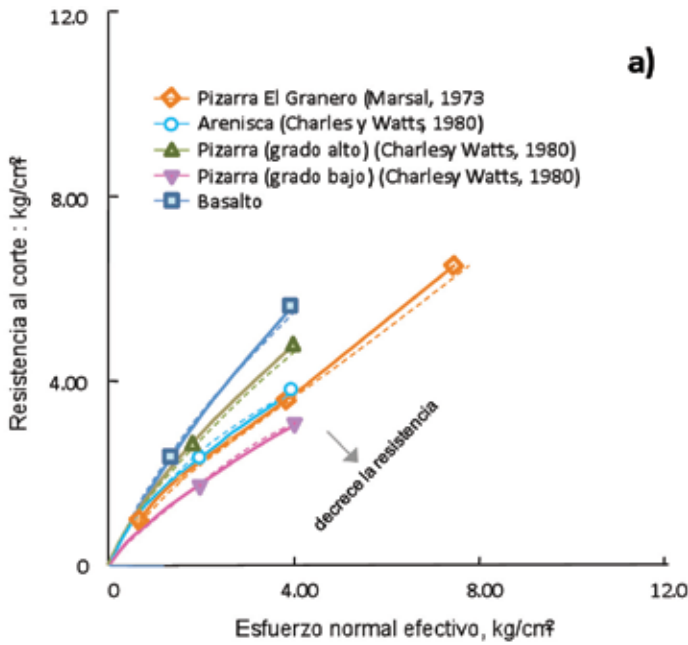


Fig 2. Variación de la resistencia al corte con los esfuerzos normales para varios tipos de enrocamiento: a) intervalo de esfuerzo bajo a medio, b) intervalo de esfuerzo medio a alto y c) intervalo de esfuerzo alto a muy alto (Línea llena: Medido, línea punteada: Estimado)

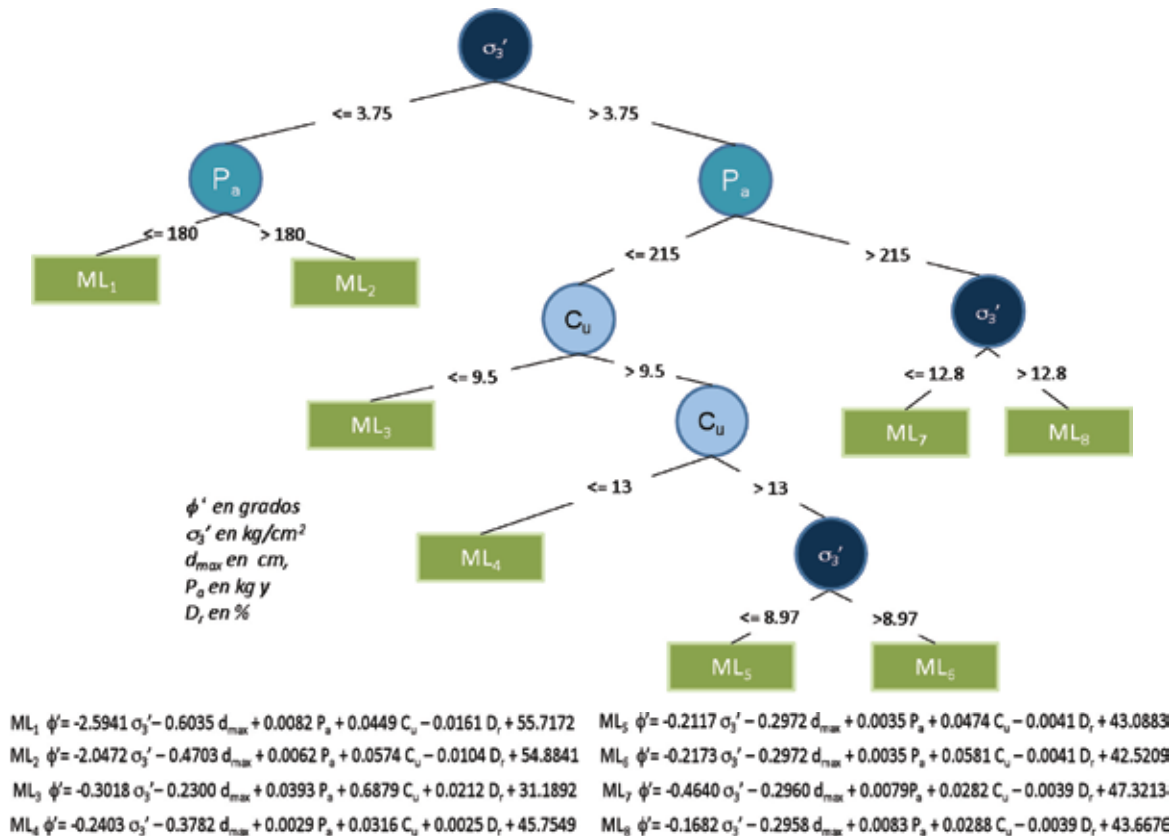


Fig 3. Árbol de regresión para estimar el ángulo de fricción a la falla

El árbol de regresión expone la importancia de los parámetros P_a y C_u y soporta numéricamente las conclusiones enunciadas por otros autores sobre la relación de ϕ' con el tamaño y resistencia de las partículas. El análisis de los nodos y ramas del árbol para el ángulo de fricción permite distinguir que la distribución de los tamaños de partícula es el factor que representa una disyunción (distintos comportamientos) y no el diámetro máximo de partícula ni la densidad relativa. El factor más importante sobre la resistencia de los enrocamientos es el nivel de σ_3' , después la calidad y resistencia individual de las partículas y, posteriormente, la distribución de tamaños de partículas en el enrocamiento.

Estos árboles de regresión se presentan como un ambiente de cálculo donde puede ser estimada y estudiada la resistencia al corte de los enrocamientos (esfuerzo efectivo principal mayor σ_1 y ángulo de fricción a la falla ϕ' a través de las condiciones físicas del material. Los árboles de regresión son una metodología “transparente” y objetiva con la cual se pueden planear y tomar decisiones en las etapas de diseño y análisis de estructuras térrreas.

El impacto de estos estudios en el diseño de estructuras compuestas por enrocamientos es de gran relevancia, ya que permite estimar la resistencia de los materiales a partir de sus características físicas, lo cual significa un avance trascendental en la ingeniería de presas. 🏗️

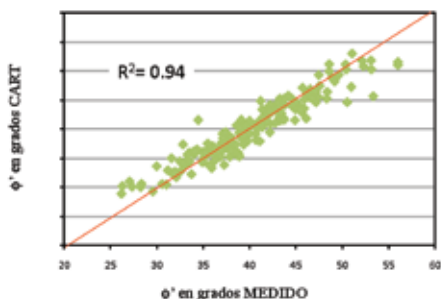


Fig 4. Estimaciones AA para el ángulo de fricción a la falla, casos de entrenamiento y prueba

1. Alberro, J, y Gaziev, E (2000), Resistencia y compresibilidad de los enrocamientos, informe interno, II UNAM, México
2. Marsal, R (1973) Mechanical properties of rockfill; en Embankment dam engineering, Casagrande Volume (eds R C Hirschfel y S J Poulos) John Wiley & Sons, Nueva York, 109-200
3. Marachi, N, Chan, C, y Seed, H (1972), Evaluation of properties of rock materials. J Soil Mech Fdns Div ASCE, 98, SM1, 95-114.