



PREDICCIÓN NUMÉRICA E INFOGRAFÍAS EN LA RECUPERACIÓN AMBIENTAL DE CANTERAS DE MÁRMOL

Numerical prediction and infographics in the environmental recovery of marble quarries

VIRGINIA ALARCÓN MARTÍNEZ, BLANCA TEJERO CLAVER, NEUS GARRIDO SÁEZ
Universidad Internacional de La Rioja, España

KEYWORDS

*Infographics
Numerical methods
Restoration
Abandoned
Marble quarries*

ABSTRACT

In the Spanish geography, there are a large number of abandoned marble quarries in which no restoration plan has been carried out, with the consequent environmental degradation that this entails. This study is based on the use of infographics to assess the environmental recovery of these abandoned marble quarries in a quick and easy way. A linear regression analysis is also carried out to study the soil type of the samples and to make numerical predictions about some of their physicochemical characteristics. The conclusions show the great possibilities offered by the addition of different amendments from an environmental and economic point of view.

PALABRAS CLAVE

*Infografías
Métodos numéricos
Restauración
Abandonadas
Canteras de mármol*

RESUMEN

En la geografía Española, se encuentra un gran número de canteras de mármol abandonadas en las cuales no se han llevado a cabo ningún plan de restauración con la consiguiente degradación del medio que ello conlleva. Este estudio se basa en el uso de infografías para valorar la recuperación ambiental de las referenciadas canteras de mármol abandonadas de forma rápida y fácil. Asimismo, se realiza un análisis de regresión lineal para estudiar el tipo de suelo de las muestras y realizar predicciones numéricas sobre algunas de sus características fisicoquímicas. Las conclusiones permiten constatar las grandes posibilidades que ofrecen la adicción de las diferentes enmiendas desde el punto de vista medioambiental y el económico.

Recibido: 01/ 04 / 2022

Aceptado: 21/ 06 / 2022

1. Introducción

Los minerales constituyen el elemento base de la mayoría de las industrias. En prácticamente todos los países del mundo se realiza algún tipo de explotación minera. Esta actividad tiene importantes repercusiones económicas, ambientales, laborales y sociales, tanto en los países o regiones en que se practica como a escala global.

Para muchos países en desarrollo la minería representa una parte significativa del PIB y, en muchos casos, la partida de entrada de divisas y de inversiones extranjeras más importante.

El impacto de la minería sobre el medio ambiente puede ser considerable y tener consecuencias a largo plazo. Hay muchos ejemplos de buenas y malas prácticas en la gestión y rehabilitación de áreas mineras. El efecto ambiental de las prácticas mineras es una cuestión cada vez más importante para la industria y sus trabajadores.

Así, por ejemplo, el debate sobre el calentamiento global puede repercutir en el empleo del carbón en determinadas zonas, el reciclaje de productos reduce la cantidad de nuevos materiales necesarios y el uso creciente de materiales no minerales como los plásticos está afectando al consumo de metales y minerales por unidad del PIB.

La competencia, la disminución de la calidad de los minerales, el aumento de los costes de producción, la privatización y la reestructuración del mercado están obligando a las empresas mineras a reducir los costes y aumentar la productividad. Las elevadas inversiones que requiere la industria minera obligan a estas empresas a utilizar al máximo sus equipos y aplicar procesos más flexibles y a menudo más intensos.

El empleo está disminuyendo en muchas áreas mineras debido a factores como el aumento de la productividad, la reestructuración radical y la privatización. Estos cambios afectan a los trabajadores despedidos, que se ven obligados a buscar otro empleo, y también a los que permanecen en la industria, que tienen que demostrar mayores habilidades y flexibilidad en el puesto de trabajo.

La búsqueda de un equilibrio entre el deseo de las empresas mineras de reducir costes y el de los trabajadores de mantener sus puestos de trabajo es un tema clave en el mundo de la minería. Las comunidades mineras se están enfrentando a nuevas prácticas, a la reducción del empleo e incluso al cierre de las empresas.

La minería se considera una industria especial con comunidades muy interrelacionadas y trabajadores que realizan un trabajo sucio y peligroso. La minería es también un sector en que muchas de las personas que ocupan los niveles más altos de dirección y muchos trabajadores son ingenieros de minas o antiguos mineros con una amplia experiencia directa en las cuestiones que afectan a la empresa y los trabajadores. Además, los mineros han sido a menudo la élite de los trabajadores industriales y con frecuencia han desempeñado un papel decisivo en la sociedad ante los cambios políticos y sociales.

Cada año se producen cerca de 23 billones de toneladas de minerales. En el caso de los minerales preciosos, la cantidad de residuos generada supera ampliamente la de producto final. Así, por ejemplo, para obtener una onza de oro es necesario tratar unas 12 toneladas de mineral.

Con los minerales de menos valor (arena, grava, arcilla, etc.), que representan la mayor parte del material extraído de las minas, la cantidad de material residual tolerable es mínima. Sin embargo, hay que partir del principio de que las minas deben producir como mínimo el doble de la cantidad final necesaria (excluyendo el material de recubrimiento superficial que es posteriormente reubicado y, por tanto, tratado dos veces).

En la geografía española, existen un gran número de canteras de mármol que se encuentran abandonadas, y en las cuales no se han llevado a cabo ningún plan de restauración.

La minería a cielo abierto elimina los sistemas naturales originales y modifica severamente el paisaje. La reconstrucción de estos espacios tiene como principal problema la obtención de una morfología adecuada para la recuperación de los ecosistemas y el paisaje.

La secuencia de los bancos de explotación en las distintas cotas genera excavaciones de difícil integración, especialmente si no se reconsideran los aspectos técnicos que condicionan la instalación de la vegetación.

Los conocimientos sobre el comportamiento de muchas especies mediterráneas son escasos. Por lo tanto, los resultados de las prácticas de revegetación con especies características de los ecosistemas originales (no alterados) no siempre ofrecen resultados satisfactorios, ya sea por falta de desarrollo de la tecnología específica de siembra o plantación de las especies seleccionadas, o porque no se han cumplido correctamente las especificaciones para su instalación.

Estas limitaciones determinan que, con frecuencia, la revegetación se lleve a cabo con las especies tradicionales, de comportamiento más conocido, con un resultado final que puede ser claramente discordante respecto a su entorno.

El funcionamiento de los ecosistemas en las primeras fases del proyecto de restauración puede condicionar de forma drástica su evolución posterior, y por tanto estas fases son críticas para el éxito final del proyecto. Al mismo tiempo, es en estas fases iniciales cuando administrativa, técnica y económicamente es más viable concentrar el esfuerzo de restauración.

La recuperación de canteras de roca caliza en clima mediterráneo (con precipitaciones irregulares y escasas) es un caso extremadamente difícil de restauración ecológica, tanto desde el punto de vista científico como técnico. Requiere, por lo tanto, un especial esfuerzo de investigación.

El presente artículo de restauración se enfoca hacia un estudio profundo de la viabilidad en la recuperación de la fertilidad del suelo original. Para ello, se precisa cubrir la superficie de la zona seleccionada en la cantera de mármol, con materiales residuales. Estos materiales, realizan la función de enmendante y fertilizante, a consecuencia de ello, cumpliendo el doble objetivo de eliminar un residuo y facilitar la recuperación ambiental.

Hoy en día, la Administración pública se encuentra con este gran número de explotaciones abandonadas, con la consiguiente degradación del medio que ello conlleva. Cabe destacar la problemática, ya que la mayoría de estas son utilizadas como vertederos y con explotaciones en activo que deberían de ser restauradas en un futuro.

2. Objetivos

En esta sección se describe el objetivo general de este trabajo, así como los objetivos específicos necesarios para su cumplimiento.

2.1. Objetivo general

El objetivo general del estudio se basa en utilizar infografías, para valorar a través de la aplicación de técnicas numéricas de predicción la recuperación ambiental de las citadas canteras de mármol abandonadas de forma rápida y fácil.

2.2. Objetivos específicos

1. Estudiar la detección y guiar la observación de los investigadores en las canteras de mármol, mediante una serie de una sucesión de operaciones matemáticas con la finalidad de identificar el estado y la viabilidad.
2. Intentar integrar los espacios degradados en su entorno natural.
3. Estudiar las orientaciones de la restauración: ecológica, para uso agrícola y para uso forestal.

3. Metodología

Desde tiempos ancestrales el papel del ingeniero ha sido básicamente el mismo, tratar de conocer e interpretar los mecanismos de la naturaleza para así poder modificarla al servicio del hombre. Para ello ha utilizado sus conocimientos, intuición, experiencia y los medios naturales a los que en cada momento ha tenido disponibles.

Con el gran poder de cómputo que se tiene en estos días, el ingeniero dispone de grandes ventajas para poder llevar a cabo su misión y abordar cada día retos más ambiciosos en la solución de nuevos problemas, cuyos aspectos políticos, económicos, científicos o tecnológicos pueden tener mayor impacto en la mejora de la calidad de la vida del hombre.

La ciencia y la tecnología describen los fenómenos reales mediante modelos matemáticos. El estudio de estos modelos permite un conocimiento más profundo del fenómeno, así como de su evolución futura.

La matemática aplicada es la rama de las matemáticas que se dedica a buscar y aplicar las herramientas más adecuadas a los problemas basados en estos modelos. Desafortunadamente, no siempre es posible aplicar métodos analíticos clásicos por diferentes razones:

- No se adecúan al modelo concreto.
- Su aplicación resulta excesivamente compleja.
- La solución formal es tan complicada que hace imposible cualquier interpretación posterior.
- Simplemente, no existen métodos analíticos capaces de proporcionar soluciones al problema.

En estos casos son útiles las técnicas numéricas, que mediante una labor de cálculo más o menos intensa, conducen a soluciones aproximadas que son siempre numéricas. El importante esfuerzo de cálculo que implica la mayoría de estos métodos hace que su uso esté íntimamente ligado al empleo de computadores. De hecho, sin el desarrollo que se ha producido en el campo de la informática resultaría difícilmente imaginable el nivel actual de utilización de las técnicas numéricas en ámbitos cada día más diversos.

Los métodos numéricos son técnicas mediante las cuales es posible formular problemas matemáticos de tal forma que puedan resolverse usando operaciones aritméticas. El análisis numérico trata de diseñar métodos para "aproximar" de una manera eficiente las soluciones de problemas expresados matemáticamente. El objetivo principal del análisis numérico es encontrar soluciones "apropiadas" a problemas complejos utilizando sólo las operaciones más simples de la aritmética. Se requiere de una secuencia de operaciones algebraicas y lógicas que producen la aproximación al problema matemático.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la infografía es la disciplina que trata sobre los diagramas visuales complejos, cuyo objetivo es resumir o explicar figurativamente informaciones o textos, empleando más variados medios visuales e incluso auditivos que el mero esquema o diagrama.

En ella existen diversos tipos de gráficos y signos no lingüísticos y lingüísticos (pictogramas, ideogramas, logogramas y croquis) que forman descripciones, secuencias expositivas, argumentativas o narrativas e incluso

interpretaciones. La presentación gráfica figurativa envuelve o glosa los textos concretos y puede o no adoptar la forma de una secuencia animada que hasta puede incluir sonido.

De intención ante todo didáctica, la infografía nació como un medio de transmitir información gráficamente de una forma más dinámica, viva e imaginativa que la meramente tipográfica, pues facilita la memorización rápida del tema en cuestión. A los documentos elaborados con esta técnica se los denomina infogramas.

Modernamente el término se ha extendido para designar diagramas dinámicos o explícitos y animados interactivos que integran imagen generada por computadora u ordenador.

En el entorno bidimensional, su patrón más común y repetido consiste en situar una imagen en el contenido central y, a sus costados, frisos de información con imágenes y textos explicativos dispuestos secuencialmente; con ayuda de un programa informático, esa secuencia puede discurrir y desarrollarse en el tiempo, a manera de presentación, por etapas.

Como ya se ha dicho, la infografía se aplica principalmente en revistas, documentos, periódicos, folletos, portales de Internet, educación, libros, etc. El propósito es que los gráficos llamen la atención de quien los visualiza por los colores, imágenes o diseños. Como su impacto visual es muy elevado, provoca viralidad en la publicación e incrementa en forma exponencial el alcance de esta.

La infografía debe parecerse a una noticia o artículo noticioso y, por tanto, responder a las preguntas qué, quién, cuándo, dónde, cómo y por qué; pero, además, debe mostrar elementos visuales y dirigirse por un criterio periodístico que no solo divulgue, sino profundice y mejore la información de los contextos que aborda en cada momento, teniendo en cuenta que el principal obstáculo que debe afrontar es su ininteligibilidad.

Existen tres grandes grupos de infografías:

- Infografías estáticas. Son composiciones gráficas cuyos elementos se presentan fijos y contienen desde un principio toda la información que se desea incluir.
- Infografías dinámicas. Son las presentadas en formato de vídeo o gif.
- Infografías interactivas. Todas aquellas que nos permiten interactuar con el contenido que se muestra.

Teniendo en cuenta ambos conceptos anteriormente descritos, en el caso concreto del presente artículo, se va a centrar en una infografía interactiva de la aplicación de métodos numéricos para obtener una aproximación matemática de lo que sería una posible recuperación ambiental de canteras de mármol abandonadas.

3.1. Infografía propiedades suelo

La legislación española (Ley 42/1975) define como residuo “aquellas materias derivadas de actividades de producción y consumo que no han conseguido, en el contexto que se da, ningún valor económico.

En el caso de hablar de residuos orgánicos, serán aquellos cuya procedencia y composición sea fundamentalmente biológica. Según Mustin (1987) el material orgánico seco de los seres vivos está entre un 95% y un 99%, y en su composición hallaremos los llamados bioelementos, siendo en su mayor parte, C, H y O, y en menor medida N, P y S.

Figura 1. Propiedades del suelo



Fuente(s): Elaboración propia, 2022.

Así, los residuos procedentes de actividades como la agricultura, ganadería, mataderos, bosques, domésticos, lodos de depuradora o industrias alimenticias pueden ser considerados como productos o residuos orgánicos (Navarro-Pedreño et al., 1994).

Además de los usos agrícolas de los residuos orgánicos, empleados como fertilizantes y enmendantes de determinadas propiedades edáficas en los últimos años, el uso se ha extendido a la reforestación, producción forestal, restauración del paisaje, o a restauración de canteras o áreas degradadas como son las afectadas por incendios forestales (Úbeda, 2005). Se han realizado estudios de recuperación y regeneración de suelos degradados por diferentes causas, obteniendo óptimos resultados con el empleo de residuos frescos y comportados (Pascual, J. A. 1996).

Con respecto a la restauración de canteras, existen varios estudios, e investigaciones llevadas a cabo, pero hasta ahora son escasas las que han utilizado purines y residuos agrícolas como enmendantes.

A nivel nacional se han realizado varios ensayos en campo con lodos de depuradora, para intentar establecer indicadores para la calidad de la restauración en actividades extractivas a cielo abierto (Ortiz- Perpiñá & Alcañiz-Baldellou, 2001).

En general, a nivel internacional también se han llevado estudios en otros países como Francia, sobre la volatilización del amoníaco después de la aplicación de purines y residuos de ganado (Moal et al., 1995)

En Brasil, también se llevaron a cabo estudios para la revegetación de las minas de hierro en el estado de Minas Gerais, Brasil, utilizando restos vegetales procedentes de la poda de jardines residenciales o del corte de céspedes (Toy & Griffith, 2001).

En el presente artículo, se analiza una nueva vía de acceso hacia la implantación de medidas correctoras que intenten corregir el daño producido de acuerdo a los principios de restauración y minimización de los riesgos asociados a los procesos erosivos en zonas mineras abandonadas, así como la reutilización o valoración de residuos y su influencia en el medio físico y biótico. Ello supone, en el campo de la investigación, un importante avance para el conocimiento de la dinámica e interacción entre los agentes enmendantes (purines y residuos agrícolas) y el suelo, agua y vegetación, así como una mejora considerable en la calidad y salud ambiental que este

tipo de industrias de explotación a cielo abierto ha producido, las cuales han supuesto un elemento mermante de la calidad del medio a lo largo de su evolución.

Por ello, entre los objetivos específicos propuestos, tal y como se ha indicado, uno de ellos, es la elaboración de una metodología para la mejora edáfica en restauración de canteras de caliza y mármoles, así como la revalorización y aprovechamiento de residuos agrarios como enmendantes para aumentar la fertilidad física, química y biológica del suelo.

El estado de la parcela inicialmente era un frente de cantera relleno de estériles, de manera muy heterogénea y con una superficie del terreno muy irregular con presencia de badlands, creados por la lluvia.

Para llevar a cabo el referenciado proceso de restauración del suelo, la primera tarea a realizar sería la retirada de todos los materiales no susceptibles de ser utilizados en el acondicionamiento y posterior nivelación de la zona. Posteriormente, sería adecuado un acopio de tierra vegetal. Sería recomendable, antes de realizar el acopio de tierra vegetal encima del relleno, realizar una modelización de la superficie para adaptarla en lo máximo posible a la topografía anterior y en su defecto minimizar en gran medida cualquier diferencia sustancial con el terreno circundante. También en esta fase es necesario tapar los badlands y canalizar las aguas hacia ambos lados de la zona de estudio evitando así el discurrir del agua de un lado a otro por lo que se favorecía el arrastre del material. Así como para disminuir la afección de las aguas superficiales, actuar de manera horizontal, nunca a favor de la pendiente para no favorecer la erosión de la cobertera donde se pretende crear suelo.

El método de explotación aplicado es el de banqueo por bancos altos, con alturas medias de 8 m. Generalmente, el sentido de avance en la extracción es de arriba hacia abajo, dependiendo de la morfología del yacimiento y relieve del terreno en cada punto. En algunos casos, el avance se realiza de forma lateral, aumentando el número de bancos conforme la topografía del terreno se eleva.

En este método de explotación por banqueo el yacimiento se subdivide espacialmente en rebanadas horizontales, según superficies paralelas y equidistantes. Manteniendo unas plazas de dimensiones adecuadas entre los distintos niveles hace posible tener varios bancos horizontales en explotación.

Una vez, llevado a cabo los pasos previos anteriormente descritos, se lleva a cabo el aporte de tierra vegetal en toda la zona de estudio, es recomendable con un espesor de 20 cm aproximadamente proveniente de desmontes realizados en las terrazas aluviales de zona cercanas de cultivo de frutales.

Una vez concluida la fase de recubrimiento de tierra vegetal de la zona de estudio se clasifican distintas parcelas experimentales. Parcelas con enmiendas de: purines, residuos de poda y residuos agrícolas, residuos de depuradoras, con abono orgánico y en blanco sola para control.

Tal y como ya se ha comentado, se realizan cuatro tratamientos con once repeticiones. Se ha realizado la adicción de abono inorgánico N-K-P 15-15-15 a once parcelas en la cantidad de 1 kg por parcela. Se ha realizado la adicción de purines a las once parcelas en la cantidad de 5,4 kg por parcela. Se ha realizado la adicción de residuos de poda a las once parcelas en la cantidad de 60 kg por parcela. Se ha realizado la adicción de compost a las once parcelas en la cantidad de 60 kg por parcela.

Paralelamente a todos estos procesos, se instala en la zona una estación de recogida de datos climáticos para un control de los parámetros de humedad, precipitación, humedad del suelo y temperatura para una mejor caracterización in situ de estos parámetros y que a la hora de sacar conclusiones sean los más reales posible.

Los valores de temperatura y humedad relativa junto con los de lluvia, han sido recogidos con un intervalo de cinco minutos por lo que cada dos meses se van a recoger los datos mediante la descarga a un ordenador portátil

Los valores de humedad del suelo han sido recogidos con un intervalo de cinco minutos y batería recargable mediante placa solar y se realiza la descarga a un ordenador portátil.

En el siguiente apartado se analiza la composición de las muestras para extraer conclusiones y predicciones sobre ésta.

3.2. Predicción numérica de las propiedades del suelo para una posible recuperación ambiental de canteras de mármol abandonadas

A partir de los distintos tratamientos en las parcelas descritos en la sección anterior, a continuación, se realizan predicciones sobre la composición de las muestras con el objetivo de mejorar las propiedades del suelo y favoreciendo de esta forma la posible recuperación ambiental. Para ello, disponemos de los datos proporcionados en las Tablas 1 y 2 sobre la caracterización fisicoquímica de las muestras. En dichas tablas, se ha seleccionado de cada muestra (AS1, AS2, AS3, AS4 y AS5L) tres repeticiones distintas.

En primer lugar, basándonos en la información de la Tabla 1, hacemos una predicción del porcentaje de arena del suelo en base a su humedad, pH real, pH potencial, conductividad eléctrica, carbonato de calcio (CaCO_3) y capacidad de intercambio catiónico. Esto nos permitirá determinar la composición del suelo más apropiada para seleccionar un tratamiento concreto del suelo o con un determinado objetivo. Para realizar esta predicción, utilizaremos un modelo de regresión lineal múltiple con los datos de los cuales se dispone.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de las muestras (I)

Muestra	Humedad (%)	pH real	pH potencial	CE (μ/cm)	CaCO3 (%)	CIC (cmol+/kg)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)
AS1-1	5.5	8.54	7.73	389	71	6.32	32	20	48
AS1-2	4.6	8.69	7.74	258	70	8.07	32	20	48
AS1-3	4.0	8.57	7.7	318	76	7.90	31	21	48
AS2-1	6.1	8.78	7.76	177	85	8.91	30	20	50
AS2-2	4.8	8.87	7.71	151	84	9.95	30	20	50
AS2-3	6.4	8.85	7.75	198	82	10.39	30	20	50
AS3-1	6.0	8.84	7.7	156	83	4.87	31	21	48
AS3-2	4.5	8.9	7.86	131	89	3.15	30	22	48
AS3-3	3.4	8.85	7.69	139	82	4.80	30	20	50
AS4-1	7.2	8.83	7.69	137	83	8.08	32	20	48
AS4-2	6.0	8.84	7.71	125	80	8.55	32	20	48
AS4-3	5.0	8.8	7.69	131	82	9.74	32	20	48
AS5L-1	15.2	9.02	8.75	226	99	0.40	30	30	40
AS5L-2	15.5	9.09	8.72	221	99	0.38	31	29	40
AS5L-3	16.3	9.18	9.03	190	99	0.13	30	30	40

CE: Conductividad Eléctrica; CIC: Capacidad de intercambio catiónico

Fuente(s): Elaboración propia, 2022.

Mediante un análisis de regresión lineal múltiple somos capaces de identificar qué variables independientes (x_1, x_2, \dots, x_n) explican una variable dependiente (Y). La relación entre estas variables se modeliza matemáticamente por medio de una ecuación de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

la cual, además de indicar cómo es esta relación, permite realizar predicciones en base al valor de los coeficientes o pesos $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ obtenidos a partir de los datos de la muestra de forma que se minimice el error cometido.

En el presente estudio, utilizaremos este análisis para predecir el porcentaje de arena (variable dependiente) en función de la caracterización fisicoquímica de la muestra (variables independientes). Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 2** donde se muestra una comparativa entre los valores conocidos de la composición del suelo mostrados en la Tabla 1 (valores reales, en azul) frente a los valores predichos por el modelo de regresión lineal (predicción, en naranja) para las 15 observaciones. Los pesos obtenidos en la predicción son los siguientes:

$$\begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -31.320955 \\ -0.575170 \\ 13.393509 \\ -5.914163 \\ 0.016893 \\ 0.072105 \\ 0.271522 \end{pmatrix}$$

Los valores de los coeficientes en valor absoluto indican la influencia de cada variable independiente con respecto a la variable dependiente (porcentaje de arena). Observamos que el pH real y el pH potencial son las variables que mayor influencia tienen en el modelo debido al valor de sus coeficientes ($\beta_2 = 13.393509$ y $\beta_3 = -5.814163$, respectivamente).

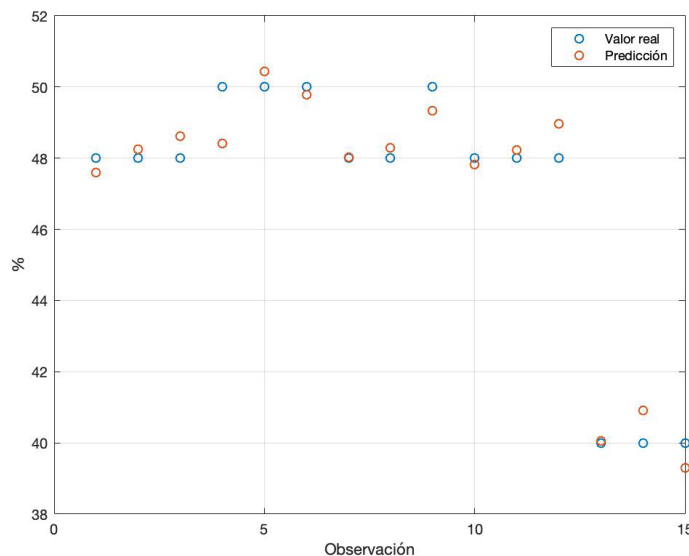
Se observa en la gráfica que los valores que se han predicho se encuentran próximos a los datos reales, hecho que constata la bondad del modelo. Asimismo, para determinar el ajuste del modelo, es decir, comparar el valor que se ha obtenido en la predicción con el valor observado, utilizamos el error cuadrático medio (RMSE) definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

donde y_i denota el valor observado e \hat{y}_i denota el valor predicho por el modelo de regresión lineal con $i = 1, 2, \dots, 15$.

En el ajuste obtenido previamente, para predecir el porcentaje de arena se ha obtenido un valor de $RMSE = 0.645095951163891$. Este valor indica un porcentaje de error muy bajo con el ajuste realizado.

Figura 2. Porcentaje de arena del suelo (valores reales vs. Predichos)



Fuente(s): Elaboración propia, 2022.

Por otro lado, se realiza una predicción con el conjunto de datos que se muestran en la Tabla 2, también utilizando un modelo con las mismas características que el anterior. En la Tabla 2 se han mostrado para las mismas tres repeticiones de las cinco muestras el valor del nitrógeno total, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hierro, cobre y cinc.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de las muestras (II)

Muestra	Nt (g/kg)	P (mg/kg)	Ca (meq/ 100g)	Mg (meq/ 100g)	K (meq/ 100g)	Na (meq/ 100g)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)
AS1-1	0.83	10.43	36	6.20	0.59	8.49	40.23	11.42	2.29
AS1-2	0.86	6.97	38	6.10	0.63	8.42	38.54	10.51	2.44
AS1-3	0.79	4.98	37	5.99	0.58	7.00	44.97	11.64	2.62
AS2-1	0.56	12.08	34	5.16	0.60	9.43	37.54	11.56	4.44
AS2-2	0.42	10.86	39	5.41	0.60	8.56	38.12	11.38	3.51
AS2-3	0.56	11.82	37	5.30	0.56	8.55	31.45	10.43	3.26
AS3-1	0.66	9.55	40	5.26	0.52	6.48	41.37	11.34	2.64
AS3-2	0.56	8.82	36	5.15	0.46	5.59	31.10	10.06	2.38
AS3-3	0.72	9.60	34	1.84	0.50	3.52	42.70	12.01	2.76
AS4-1	0.93	11.42	42	5.82	0.62	7.37	34.01	14.58	3.59
AS4-2	0.76	12.03	38	5.50	0.61	6.05	33.68	14.49	4.24

AS4-3	0.91	13.89	38	5.49	0.50	6.00	31.88	15.27	4.67
AS5L-1	0.11	5.90	22	5.09	0.32	9.07	26.75	6.67	7.86
AS5L-2	0.11	5.96	26	4.81	0.33	8.79	23.32	6.19	6.75
AS5L-3	0.01	3.37	14	4.58	0.33	7.68	24.22	5.99	2.05

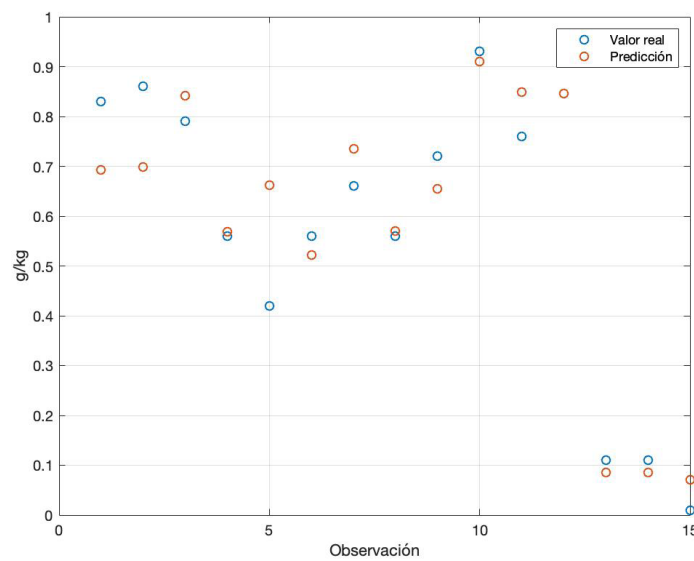
CO: Carbono orgánico; Nt: Nitrógeno total

Fuente(s): Elaboración propia, 2022.

Se realiza un modelo de regresión lineal múltiple donde la variable dependiente o variable a predecir es el nitrógeno total (Nt), siendo las demás características fisicoquímicas de las muestras las variables independientes.

Los resultados obtenidos se muestran en la **Figura 3**. Se observa que los valores predichos se ajustan bastante a los observados con algunas desviaciones un poco mayores en las observaciones 2 y 5.

Figura 3. Nitrógeno total (g/kg) (valores reales vs. Predichos)



Fuente(s): Elaboración propia, 2022.

Tras la aplicación del modelo, los pesos β_i obtenidos correspondientes a las 8 variables independientes son:

$$\begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_4 \\ \beta_5 \\ \beta_6 \\ \beta_7 \\ \beta_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.599182 \\ -0.016648 \\ 0.010123 \\ 0.031046 \\ 0.090915 \\ -0.012861 \\ 0.005248 \\ 0.068774 \\ -0.013844 \end{pmatrix}$$

donde se observa que no existen variables independientes que influyan más que otras de forma más evidente sobre la cantidad de nitrógeno total.

Por último, al igual que la muestra de datos anterior, el valor obtenido del error cuadrático medio ha sido de $RMSE = 0.094552204360794$. Este valor muestra la calidad de la predicción que realiza el modelo.

3.4. Aplicación de las predicciones a través de infografías en la recuperación ambiental de canteras de mármol abandonadas



4. Resultados y Discusión.

Antes de abordar este punto hay que destacar que no se han analizado en su totalidad todos los resultados de las tablas indicadas, debido a que es una primera fase del estudio realizado, ya que es en unos meses, después de los tratamientos será cuando se verán mayores efectos sobre la estructura y textura del suelo junto con su afección a la vegetación en cada una de las parcelas experimentales realizadas.

Una vez realizada esta aclaración, cabe señalar, que se han obtenido resultados satisfactorios con respecto a las posibilidades que ofrecen la adición de las diferentes enmiendas realizadas.

En una primera observación se ha podido constatar las posibilidades que ofrece cada una de ellas en base al estado en el que queda el suelo tras su aplicación, y otra consideración es el bajo coste de alguna de ellas, siendo

muy superior el coste que se debe de destinar al transporte hasta el lugar del estudio con respecto al coste de la materia prima.

En base a la información de la Tabla 1, en la predicción realizada del porcentaje de arena del suelo en base a su humedad, pH real, pH potencial, conductividad eléctrica, carbonato de calcio (CaCO_3) y capacidad de intercambio catiónico, ha permitido determinar la composición del suelo más apropiada para seleccionar un tratamiento concreto del suelo.

Posteriormente, como ya se ha indicado anteriormente en el presente estudio, se ha realizado un análisis para predecir el porcentaje de arena (variable dependiente) en función de la caracterización fisicoquímica de la muestra (variables independientes).

Es fundamental señalar, que tal y como se ha reflejado en la figura 2, se muestra una comparativa entre los valores conocidos de la composición del suelo mostrados en la Tabla 1 (valores reales, en azul) frente a los valores predichos por el modelo de regresión lineal (predicción, en naranja) para las 15 observaciones.

En el ajuste obtenido previamente para predecir el porcentaje de arena se ha obtenido un valor que indica un porcentaje de error muy bajo con el ajuste realizado.

Por otro lado, también se ha realizado una predicción con el conjunto de datos que se muestran en la Tabla 2, también utilizando un modelo con las mismas características que el descrito anteriormente.

En la Tabla 2 se han mostrado para las mismas tres repeticiones de las cinco muestras el valor del nitrógeno total, fósforo, calcio, magnesio, potasio, sodio, hierro, cobre y cinc.

Por último, al igual que la muestra de datos anterior, el valor obtenido del error cuadrático medio muestra la calidad de la predicción que realiza el modelo.

Por ello, cabe destacar que se cumplen todos y cada unos de los objetivos propuestos en el presente estudio, es decir, tanto los objetivos específicos como los objetivos generales.

En el presente estudio, se ha podido constatar que las enmiendas de purines tienen un efecto positivo en la creación del suelo siempre y cuando se eche una cantidad apropiada porque un exceso puede ser muy perjudicial. Por tanto, se ha podido constatar desde el punto de vista medioambiental y el económico las grandes posibilidades que ofrecen la adicción de las diferentes enmiendas.

Los residuos de poda protegen el suelo de la afeción de las lluvias torrenciales y permiten que se retenga más agua para su posterior infiltración.

El abono orgánico aporta nutrientes importantes para el desarrollo de la vegetación.

El compost aporta nutrientes, pero también hay un componente salino y de metales pesados en el suelo donde hemos controlado la cantidad rigurosamente.

Con todo esto se puede deducir que la adicción al suelo de estas enmiendas es muy beneficioso para el desarrollo de la vegetación por lo que su utilización en la restauración de espacios afectados por la explotación de roca ornamental es perfectamente factible.

5. Conclusiones

Cabe destacar que el objetivo principal del artículo era la predicción numérica e Infografías en la recuperación ambiental de canteras de mármol, y que, con la elaboración de este artículo, se considera que se puede realizar, es decir, que, mediante la redacción de este, se ha cumplido con el objetivo general.

Para cumplir dicho objetivo, se han ido abordando diferentes puntos que se han considerado clave para la ejecución de la predicción numérica.

En primer lugar, en los resultados ratificaron la hipótesis inicial. Se ha podido constatar las altas posibilidades que ofrecen la adicción de diferentes enmiendas desde el punto de vista medioambiental y económico. La adicción al suelo de estas enmiendas es muy beneficiosa para el desarrollo de la vegetación por lo que su utilización en la restauración de espacios afectados por la explotación de roca ornamental es perfectamente alcanzable.

Un aspecto de especial importancia es que todos estos procesos han sido controlados por una estación meteorológica para cuantificar los valores de precipitación, humedad relativa, T^a y humedad del suelo. Hay que destacar que una limitación importante ha sido el tiempo ya que hay procesos como los análisis de laboratorio y los de semillas que son laboriosos y necesitan más tiempo y tomar muestras espaciadas en el tiempo tras la adicción.

Por último, asimismo, la posibilidad de realizar predicciones en base a las características fisicoquímicas de las muestras es altamente beneficioso para favorecer la recuperación ambiental.

Se concluye que dichas predicciones pueden ser de gran utilidad para añadir o compensar aquellas componentes que se considere necesarias en el suelo para cumplir con los objetivos requeridos y puede ser un considerado un éxito a todos los niveles.

Referencias

Ley 42/1975, de 19 de noviembre, sobre desechos y residuos sólidos urbanos.

Moal, J. F., Martínez, J., Guiziou, F. & Coste, C.M. (1995). Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. *The Journal of Agricultural Science*, 125 (2), 245– 252.

Mustin, M. (1987) Le compost: gestion de la matière organique. Editions François Dubusc. Paris.

Navarro-Pedreño, J., Sierra, B., Gómez, I. & Mataix, J. (1995). Modificación de las propiedades químicas de un suelo por la adición de residuos de almazara. *Actas V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio*, 403-407. Murcia.

Pascual, J. A. (1996). *Efectividad de los residuos orgánicos en la mejora de la calidad de suelos áridos: aspectos biológicos y bioquímicos*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. Murcia.

Ortiz- Perpiñá, O. & Alcañiz-Baldellou, J.M. (2001). Aplicación del flujo de CO₂ como indicador de la calidad de la restauración en actividades extractivas a cielo abierto. *Edafología*, 8 (3), 71-81.

Spyer, P. (2021). *Orphaned landscapes: violence, visibility, and appearance in Indonesia*. Fordham Universities Libraries.

Toy, T.J. & Griffith, J.J. (2001). Changing surface-mine reclamation practices in Minas Gerais, Brazil. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 15(1), 33-51.

Toy, T.J., Griffith, J.J. & Ribeiro, C.A.A.S. (2001). Planejamento a longo prazo para o fechamento de minas a céu aberto no Brasil. *Revista Árvore*, 25(4).

Úbeda, X. & Sala, M. (2005). Cambios en la física del suelo e incremento de la escorrentía y la erosión tras un incendio forestal. *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 21, 559-572.