



# Mapecto digital de indicadores físicos y químicos de calidad del suelo para el departamento del Cesar y el Magdalena

8 de febrero de 2025

”Al suelo se le ha considerado tradicionalmente un medio inerte capaz de aguantar todas las agresiones pero, en realidad, es un medio fragil, incapaz de asumir tantas amenazas. Las agresiones y las presiones que soporta, en su mayor parte derivadas de la actividad humana, estan acelerando su proceso de degradacion y, si no se pone remedio, las consecuencias pueden ser irreversibles”

---

- Comision Europea, 1998

## **Resumen**

Este trabajo presenta un algoritmo que permite documentar el flujo de trabajo que se realiza en el mapeo digital de suelos, se desarrollara un ejemplo de aplicación de mapeo de suelos para los departamentos de Cesar y Magdalena centrado en la calidad del suelo desde algunas de sus características físicas y químicas. Se desarrollan aplicaciones de análisis espacial mediante el lenguaje Python que permite el uso de librerías que contribuyen al análisis de datos geográficos.

## **Abstract**

This work presents an algorithm that allows documenting the workflow that is performed in digital soil mapping, an example of soil mapping application for the departments of Cesar and Magdalena focused on soil quality from some of its physical and chemical characteristics will be developed. Spatial analysis applications are developed using the Python language that allows the use of libraries that contribute to the analysis of geographic data.

## **El suelo como sustento de la vida**

Los suelos son el teatro de la vida, no solo por la gamma casi infinita de organismos que lo habitan de manera temporal o permanente, sino también por los procesos de edafogénesis que en él se desarrollan y que son vitales para el sostenimiento de la vida en el planeta (Cortes, 2004). En términos generales, el suelo es el sustrato en el cual se localizan y desarrollan múltiples actividades del hombre, razón por la cual se le considera un recurso multifuncional. Los suelos, además, son el sustento de los bosques y la principal fuente de producción de alimentos (Cortés et al.,2020).

El suelo en estado natural está en un equilibrio dinámico con su medio ambiente, interactuando con la biosfera, la macro y microfauna, entre otros. La actividad antrópica altera las propiedades del suelo que conducen a reducir la función de su capacidad. Así, la degradación del suelo conlleva cambios adversos en propiedades y procesos con el tiempo. Esos cambios pueden ser debidos a la remoción y alteración del equilibrio dinámico del suelo con el medio ambiente debido a perturbaciones naturales o antrópicas (Ramírez et al., 2011).

Todo esto, modifica la estructura del suelo y contribuye a la pérdida de diversidad de organismos, que son la maquinaria para su sustentabilidad, provocando su degradación; entendiendo la degradación del suelo, como toda modificación que conduzca a la pérdida de las funciones (Cruz et al. 2004). En este sentido, la calidad del suelo es fundamental en la prevención y estimación de procesos de degradación que disminuyan las características multifuncionales. Aproximadamente el 23 % de la superficie terrestre, tiene hoy algún nivel de degradación, se estiman áreas de 5 a 10 millones de hectáreas, que afectan a unos 1.500 millones de personas en el mundo, esto debido a factores como actividades humanas, variaciones climáticas, cambios o evolución de la naturaleza, el manejo y protección de los mismos entre otras, por lo cual se hace fundamental conocer el estado de salud o calidad del suelo. (Burbano Orjuela 2017).

### **Mapeo digital de suelo: ¿una herramienta novedosa?**

La cartografía de las unidades del suelo junto al conocimiento de la distribución espacial de sus propiedades ha venido avanzando e incursionando nuevas herramientas que brindan a la ciencia del suelo un soporte matemático y estadístico, el cual combinado con el conocimiento del científico de suelos se ha denominado “Pedometría” (McBratney, de Gruijter, y Bryce 2018).

La naturaleza heterogénea del suelo ha representado su mayor obstáculo en el levantamiento de datos y posterior identificación de la distribución espacial de sus propiedades. Los primeros mapas se han elaborado con un enfoque similar a los de hace 50 años atrás usando polígonos que delineaban áreas discretas de tipos o propiedades del suelo, hace 30 años con ayuda de la geoestadística se abordó la cartografía de suelos desde otra perspectiva (McBratney, de Gruijter, y Bryce 2018).

En este sentido, el mapeo digital de suelos o (MDS), como metodología para el mapeo de propiedades de suelo, ha sido ampliamente usado con diversos enfoques, es así como encontramos trabajos como el trabajo realizado por Tian et al. para el año 2024, donde se actualizó el mapa de zonas susceptibles a erosión en China identificando la distribución espacial del factor K que permite medir la susceptibilidad de erosión en los suelos.

Para ello 4262 muestras del estudio de la serie de suelos en la década de 2010 y un modelo de regresión forestal aleatoria para generar un nuevo mapa de factor K para China. Un mapa digital de factor K en la resolución espacial de 250 m fue generado calculando los valores K de los puntos de reconocimiento del suelo como datos de entrenamiento y utilizando la información ambiental como variables predictivas. Los resultados de comparación entre los mapas digitales y convencionales de los factores K, muestran que ha habido una tendencia decreciente en el factor K en las últimas décadas. La disminución del valor de K se atribuyó principalmente a la

actualización de los datos de la encuesta del suelo.

Como ejercicio de actualización de mapas de propiedades de suelo, tenemos el trabajo realizado por Gagkas y Lilly en 2024 en Escocia, donde dadas las ventajas de que ya el suelo está mapeado de forma convencional, con base en estas muestras heredadas se realiza actualización de los mapas de propiedades de suelos para posteriormente realizar una mejor aplicación en la evaluación de tierra. la cuadrícula de 50 m.

En Escocia mediante la conexión a la base de datos de Scottish Soil se recopilaron las muestras, se identificaron las Unidades de Paisaje de características similares de suelo y forma de tierra para el entrenamiento de los modelos de árboles de decisión aleatorios y covariables ambientales, los modelos de entrenamiento de la Serie del Suelo a nivel de Unidad de Paisaje, ayudaron a nivel nacional a limitar tanto la subestimación de estos tipos de suelos minoritarios como la sobreestimación de los dominantes. Además, los resultados de la evaluación de mapas mostraron la utilidad de utilizar las probabilidades condicionales de la serie de suelos generadas para explorar la variabilidad espacial del suelo.

En otro estudio realizado por Balmaseda y Ponce de León realizado en el año 2010, realizado en San Jose de las Lajas Cuba, donde por medio del MDS, se elaboró un modelo conceptual de datos edafológicos identificando los atributos y las asociaciones en el mundo real y que cumplió las especificaciones de las normas: Lenguaje del Esquema Conceptual (ISO 19103, 2001), Reglas para la aplicación del Esquema Conceptual (ISO 19109, 2001) y Esquema Espacial (ISO 107, 2001), expresado mediante un diagrama de clases como estructura estática del lenguaje unificado de modelación (UML, Unified Modeling Language). El modelo obtenido proporcionó una descripción de los datos, permitió definir una estructura y sentó las bases para la conformación de un Sistema Geoespacial de Información Edafológica, haciendo factible aplicar mecanismos automatizados al manejo de la información.

Otra aplicación que ha tenido mucho auge es el uso de MDS para el mapeo de Carbono Orgánico en Suelo, COS, un ejemplo es el realizado por Loayza et al. en el 2020 en el Ecuador, se utilizaron un total de 12.594 muestras de perfiles de suelo tomados a una profundidad de 1 metro, recopilados en los años 1982 a 1985 y 2009-2016, con aproximadamente 32.772 horizontes superficiales pedogenéticos con información que permitió el cálculo del COS en el suelo.

Fueron seleccionadas las siguientes variables como profundidad efectiva, densidad aparente, carbono orgánico, materia orgánica. en cuanto a los resultados que presentaron mayor correlación con el contenido de COS fueron: la temperatura, el tipo de suelos, la altura vertical a los drenajes, presencia de suelos volcánicos (Andisoles) y el índice topográfico de humedad. Para los resultados se encontró que los suelos con mayor contenido de COS se localizaron en tierras con mayores altitudes, climas de bajas temperaturas y zonas húmedas de la Sierra; en tanto que los suelos que presentaron valores medios de COS se ubicaron en las vertientes occidentales y en una parte de la región Amazónica.

También es una característica importante en el MDS, la aplicación a escalas pequeñas como ocurre con la investigación Pacciorett et al. realizado también en el 2020, este trabajo evalúa

el desempeño del método de muestreo denominado hipercubo latino condicionado (cLHS) muy común en el MDS, para identificar sitios convenientes para la obtención de datos de propiedades edáficas, para cada muestra, se estimó la relación entre COS y las propiedades edafoclimáticas del sitio, usando tanto modelos de regresión lineal como el algoritmo random forest de aprendizaje automático.

Se evaluaron los errores de predicción de cada método de muestreo con cada método estadístico usado para la predicción de COS en sitios donde esta variable no fue medida. El método de muestreo impactó la confiabilidad global de las predicciones derivadas de ambos modelos de regresión y los errores de predicción sitio-específicos. El método cLHS fue más eficiente que MAS para identificar sitios con suficiente variabilidad para estimar el modelo de la relación entre COS y propiedades edafo-climáticas, usado para predecir en otros sitios del territorio el valor del COS. El modelo estimado puede ser usado para mapeo digital de COS.

Se evidencia que el MDS ha influenciado de forma global la cartografía de suelos, así como brindar la posibilidad de identificar la distribución de las propiedades de suelos de forma más rápida para que contribuya así a la gestión del suelo.

### Área de estudio

Para este ejercicio práctico se utilizarán datos de los departamentos del Cesar y la Magdalena, donde las distintas ecorregiones se han enfrentado a una situación difícil por la degradación de los recursos naturales, de manera singular en las áreas sobre las que históricamente se ha desarrollado mayor actividad agropecuaria (valle del río Cesar) y las condiciones medioambientales tienden a ser extremas. Se contará con muestras del departamento del Cesar distribuidas como se observa en la figura 1 y que fueron muestreadas mediante muestreo libre (López Duque 2010).

En la ecorregión de la Sierra Nevada de Santa Marta, nacen ríos, quebradas y arroyos importantes que irrigan el Valle del Cesar y tributan hacia el cauce principal que lleva el mismo nombre, el que a su vez fluye hacia el Complejo Cenagoso de Zapatosa y posteriormente al río Magdalena. La ecorregión de la Serranía del Perijá, de la que hacen parte los municipios de Codazzi, San Martín y San Alberto, es una de las más importantes reservas forestales del país, que irriga el valle del Río Magdalena. La ecorregión del Valle del Río Cesar, es un área de alta productividad agrícola y pecuaria y está constituida como uno de los pilares sobre los que se sustenta el potencial económico del Departamento del Cesar (López Duque 2010)

Los suelos de los municipios de Agustín Codazzi y Becerril en general presentan una baja fertilidad y baja a media capacidad de intercambio catiónico, aunque las zonas pertenecientes al conjunto Mizer poseen una alta fertilidad. Las áreas del municipio de Agustín Codazzi donde se han implementado cultivos de arroz, Palma africana y pastos para ganadería, manifiestan una fertilidad moderada del suelo, alto contenido de bases y muy alta capacidad de intercambio catiónico (IGAC, 1982). En el municipio de Río de Oro debido a la existencia de muchos suelos aluviales con excelentes condiciones físicas, de relieve plano, con buen drenaje y fertilidad relativamente alta, localizados en las áreas formadas por depósitos recientes y sub - recientes se desarrollaron sembrados de Palma africana, arroz, algodón, plátano y maíz (IGAC, 1970).

En Valledupar la Palma africana se ha establecido en los suelos planos a plano cóncavos, con texturas moderadamente finas, de fertilidad baja y drenaje imperfecto (IGAC, 1969).



Figura 1: Ubicación muestras de perfiles de suelo

## Objetivos

Estimar la calidad de los suelos del departamento del Cesar y la Magdalena a partir de MDS de sus propiedades físicas y químicas como indicadores de salud de estos suelos.

### Específicos

- Identificar la distribución espacial de las propiedades físicas del suelo.
- Identificar la distribución espacial de las propiedades químicas del suelo.
- Realizar mapa de distribución de la calidad de suelo para el departamento del Cesar.

## Metodología

Para la realización de este ejercicio práctico se tendrá en cuenta la metodología estándar para MDS, que consiste en crear sistemas de información espacial del suelo a partir de modelos numéricos. Para ello, se utilizan técnicas y tecnologías semiautomáticas para adquirir, procesar y visualizar información del suelo, se emplea para ello muestras que cuentan con resultados de los análisis de laboratorio y que brindarán información para determinar el grado de alteración de las propiedades físicas y químicas del suelo. Se aplica método de suavizado para estandarizar variables y posteriormente los métodos de predicción, se determinan variables ambientales que presenten mayor correlación con las propiedades físicas y químicas a determinar y se estima su variabilidad espacial. se sigue el esquema de la figura 2.

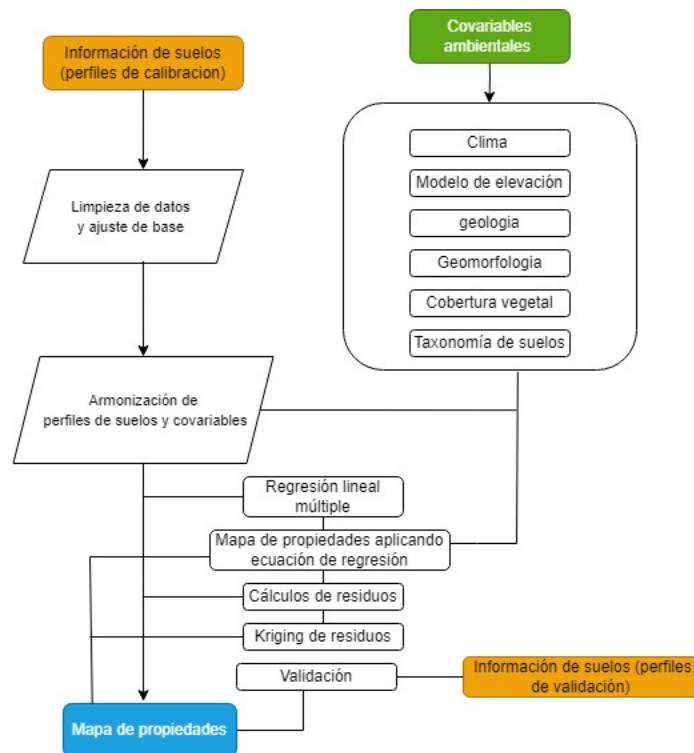


Figura 2: Flujo de trabajo para la metodología

## Implementación de la metodología

Hasta el momento, el desarrollo del algoritmo que nos permita estimar la calidad del suelo y mediante el cual aplicaremos la programación en SIG, ha desarrollado dos grandes momentos:

### 1. Limpieza de datos:

Este proceso es fundamental, ya que en la toma de datos puede ocurrir errores, puede haber información faltante. En esta etapa se aplica un proceso de estandarización de las variables, conocido como spline de suavizado cuadrático de áreas iguales, es un tipo específico de función spline que es utilizada en diversos campos, particularmente en la ciencia del suelo y los estudios ambientales.

**Calidad de los datos:** En este paso se evalúa la calidad y fiabilidad de los datos. Se elimina información que no sea necesaria y se define el sistema de coordenadas que utilizará el proyecto.

Esta función matemática ajusta una curva suave a través de una serie de puntos de datos, conservando al mismo tiempo el área total bajo los datos originales y la curva ajustada. Lo que facilita el análisis y modelamiento en funciones de profundidad continuas, como la variación de las propiedades del suelo (carbono orgánico, pH) u otras variables ambientales a diferentes profundidades.

Al suavizar dichas fluctuaciones de los datos, el spline proporciona una representación más interpretable e informativa de la tendencia subyacente.

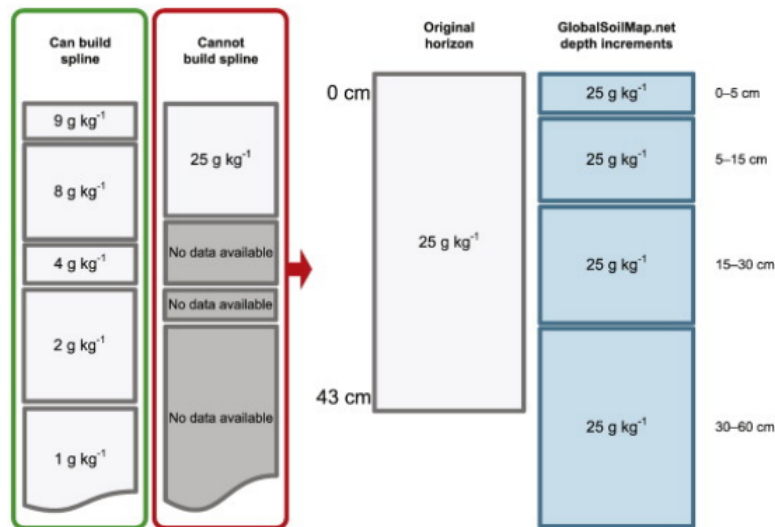


Figura 3: Proceso spline para estandarización de variables de suelo. Tomado de Odgers et al, 2012

En este sentido, en esta etapa también se seleccionaron los perfiles de suelos con datos coherentes y completos en los primeros 30 cm de suelo, que completan la base tabular original con que se continúa el proceso de mapeo digital de suelo.



## 2. Armonización de los perfiles de suelo y estandarización de covariables

Posterior a la limpieza de los datos y armonización de perfiles de suelo mediante la función spline, se entra a recopilar la mayor cantidad de información con la mejor calidad posible. Para esto se verifica que las fuentes sean confiables y que en medida de lo posible contengan información durante un largo periodo de tiempo para que los datos no estén sesgados a fenómenos con poca ocurrencia.

Recopilación de datos: Se obtienen los archivos vectoriales, raster y demás que pertenecen a cada factor formador del suelo. Se recomienda guardarlos de forma ordenada para facilitar el procesamiento.

Al momento de coleccionar las covariables del estudio, es importante tener definido el objetivo del estudio para conocer la zona y la temporalidad de interés. Luego se procede con la búsqueda de la información; para el proceso del Mapeo Digital de Suelos se requiere obtener la información descrita dentro del modelo scorpan:

$S = f(s, c, o, r, p, a, n)$  donde,  
s = suelo,  
c = clima,  
o = organismos,  
r = relieve,  
p = material parental,  
a = edad, el factor tiempo,  
n = datos espaciales de los puntos que se muestreen, distancias referente a otros puntos, etc.

Es importante identificar las fuentes que son útiles en este proceso y realizar la recopilación.

La armonización de covariables se refiere al proceso de estandarización y homogenización de las variables recopiladas para garantizar su compatibilidad y coherencia en el análisis. Esto puede implicar la reconciliación de diferentes formatos de datos, la codificación consistente de categorías, la unificación de unidades de medida y la resolución de discrepancias entre fuentes de datos.

Posteriormente, los datos se empiezan a procesar de forma manual y automática, antes de entrar en los procesos de machine learning. Los datos tabulados deben organizarse y relacionarlos a un dato SIG (Sistema de Información Geográfico) relacionandolo a una geometría; la cartografía digital y las imágenes satelitales se geo-referencian, se corrigen geométricamente y se verifica que todos los archivos geográficos estén en el sistema de coordenadas definido.

Por último, se realizan cambios de formatos en los archivos que lo requieran. Donde todas las covariables deben ser reprojectadas y rasterizadas respecto a los atributos del DEM.



## Referencias

- Abarca O. y M. A. Bernabé Poveda . 2010. Estimación de la capacidad de uso de las tierras en el estado Aragua, Venezuela, mediante regresión logística multinomial. *Agron. Trop.* 60: 397-41
- Balmaseda, Carlos, y Daniel Ponce de León. 2010. «Modelo conceptual para la información edafológica. estudio de caso: mapa nacional de suelos». *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 19(2):44-50.
- Burbano Orjuela, Hernán. 2017. «La calidad y salud del suelo influyen sobre la naturaleza y la sociedad». *Tendencias* 18(1):118-26. doi: 10.22267/rtend.171801.68.
- Cortés, E. J. A., Torres, D. C., Curico, J. P., & Velandia, L. (2020). *Biología De Suelos Amazónicos*.
- Cruz, A. Bautista, J. Etchevers Barra, R. F. del Castillo, y C. Gutiérrez. 2004. «La calidad del suelo y sus indicadores»: *Ecosistemas* 13(2).
- Gagkas, Zisis, y Allan Lilly. 2024. «Spatial disaggregation of a legacy soil map to support digital soil and land evaluation assessments in Scotland». *Geoderma Regional* 38:e00833. doi: 10.1016/j.geodrs.2024.e00833.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI – IGAC. (1969). Estudio semidetallado de suelos para fines agrícolas del sector plano del municipio de Valledupar. En: *Revista Instituto Geográfico Agustín Codazzi* 5 (13). Subdirección Agrológica. Bogotá – Colombia
- . (1970). Subdirección Agrológica. Estudio semidetallado de suelos del sector plano y general del área quebrada de los municipios de Río de Oro y González. En: *Revista Instituto Geográfico Agustín Codazzi* 6 (3). Bogotá – Colombia
- . (1982). Estudio general de suelos de los municipios de Codazzi, Manaure, La Paz, San Diego y Becerril. Subdirección Agrológica. Bogotá – Colombia
- Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., Jiménez, W. 2020. Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas* 29(1):1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.185>
- López Duque, Angie. 2010. «Estimación de conflictos de uso de la tierra por dinámica de cultivos de Palma africana, usando sensores remotos. Caso-Departamento del Cesar».
- Minasny, B., Bandai, T., Ghezzehei, T. A., Huang, Y. C., Ma, Y., McBratney, A. B., ... Widyastuti, M. (2024). Soil Science-Informed Machine Learning. *Geoderma*, 452, 117094.
- McBratney, Alex, Jaap de Gruijter, y Alisa Bryce. 2018. «Pedometrics timeline».
- Tian, Zhiyuan, Yan Zhao, Longxi Cao, Yuan Zhao, y Yin Liang. 2024. «Assessing the declining trend in soil erodibility across China: A comparison of conventional and digital K-factor maps». *International Soil and Water Conservation Research*. doi: 10.1016/j.iswcr.2024.05.005.
- Pacciorett, Pablo Ariel, Franca Giannini Kurina, Monica Graciela Balzarini, Pablo Ariel Pacciorett, Franca Giannini Kurina, y Monica Graciela Balzarini. 2020. «Muestreo de sitios a

escala regional para mapeo digital basado en propiedades de suelo». *Ciencia del suelo* 38(2):310-20.

Ramírez, M. E., Limas, E. A., Ortiz, P. R., & Díaz, A. R. (2011). Degradación de suelos por actividades antrópicas en el norte de Tamaulipas, México. *Papeles de Geografía*, 53-54, Article 53-54.

Silva, Da, Mayesse Aparecida Da Silva, Mayesse Aparecida Da Silva, Mayesse Aparecida Da Silva, Mayesse Aparecida Da Silva, Mayesse Aparecida Da Silva, Mayesse Aparecida Da Silva, Mayesse Aparecida Da Silva, y Mayesse Aparecida Da. s. f. «Manual Práctico: Mapeo Digital De Suelos».