

## **Tema 10**

### **10.2. Cartografía Digital de Suelos: Marco Conceptual y Metodológico**



MINISTERIO  
DE AGRICULTURA  
Y GANADERÍA



PROGRAMA  
**RESILIENCIA  
CLIMÁTICA**  
BOSQUES CAFETALEROS



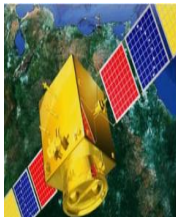
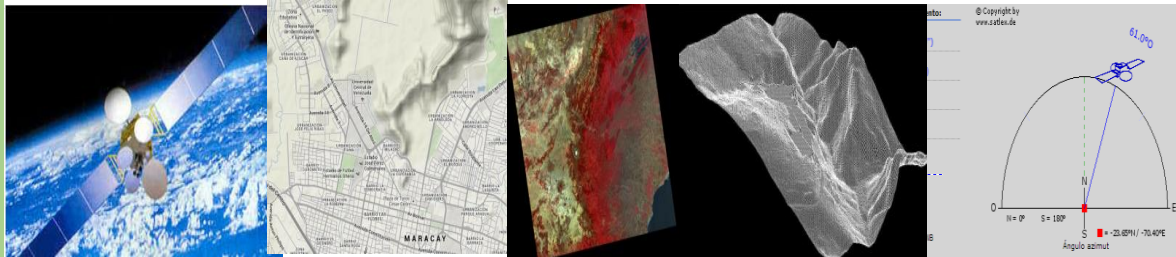
Banco Interamericano  
de Desarrollo

**Dr. Jesús A. Vilorio R.**  
**Universidad Central de Venezuela**  
**Facultad de Agronomía**  
**Postgrado en Ciencia del Suelo**

# CONTENIDO

## Tema 10. Cartografía digital de suelos

- Antecedentes, conceptos básicos.
- Procedimientos:
  - Datos de suelo,
  - Variables ambientales auxiliares,
  - Métodos de inferencia espacial,
  - Validación de resultados.
- Sinergia entre mapeo convencional y digital del suelo.
- Ejemplos



## Introducción

La cartografía digital de suelos (CDS) consiste en la creación y desarrollo de modelos de inferencia espacial de información del suelo, mediante el uso de métodos cuantitativos, a partir de:

- datos de suelo obtenidos en puntos de muestreo y
- datos de variables ambientales auxiliares relacionadas con los factores de formación del suelo.

Produce un modelo predictivo de propiedades individuales o de clases de suelo, a partir de un conjunto de datos de entrenamiento.

Estos últimos son valores de variables de suelo y variables ambientales auxiliares, localizados en un número determinado de puntos con coordenadas conocidas.

## Introduccion

Con los datos de entrenamiento, se ajusta un modelo predictivo de las variables de suelo a partir de las variables auxiliares. Este modelo se extrapola posteriormente a toda el área de estudio.

Adicionalmente, se evalúa la certeza de las predicciones con un conjunto independiente de datos de validación

El mapeo digital del suelo tiene su origen en estudios experimentales realizados desde la década de 1990; pero en el presente, ha pasado de la fase de investigación a la de uso operativo y se ha convertido en un enfoque útil y práctico para el mapeo de suelos

## **Modelo conceptual**

La cartografía digital de suelos, al igual que los métodos convencionales de mapeo de suelos, se basa en la ecuación de Jenny (1941).

$$s = f (cl, o, r, p, t \dots)$$

Esta ecuación sintetiza la relación entre las propiedades del suelo y su entorno, representado por los factores: clima, biota, material parental, relieve y edad del paisaje.

Sin embargo, el levantamiento de suelos tradicional se apoya en modelos cualitativos de relación suelo-paisaje, creados en la mente del edafólogo.

En cambio, la cartografía digital del suelo tiende a usar datos para producir predicciones cuantitativas con niveles estimados de certeza.

Esta diferencia se expresa en el modelo conceptual  
SCORPAN

## Modelo SCORPAN (McBratney et al., 2003)

$$S = f(s, c, o, r, p, a, n)$$

S= atributo del suelo a ser predicho

s= información previa sobre el suelo (perfiles, mapas, conocimiento experto)

c= clima

o= organismos

r= relieve

p= material parental

a= edad (age)

n= localización x, y

El modelo SCORPAN destaca el uso de información de puntos de muestreo de suelos y la necesidad de georeferenciar todos los datos.

### Modelo conceptual

## **Modelo conceptual**

El modelo factorial de Jenny (1941) trata de explicar la influencia de los factores de formación sobre los atributos del suelo.

En cambio, el modelo SCORPAN representa la predicción espacial de propiedades individuales o clases de suelo basada en observaciones reales.

$$S = f(s, c, o, r, p, a, n)$$

Por esto, SCORPAN incluye el factor n relativo a la posición espacial de los sitios con información.

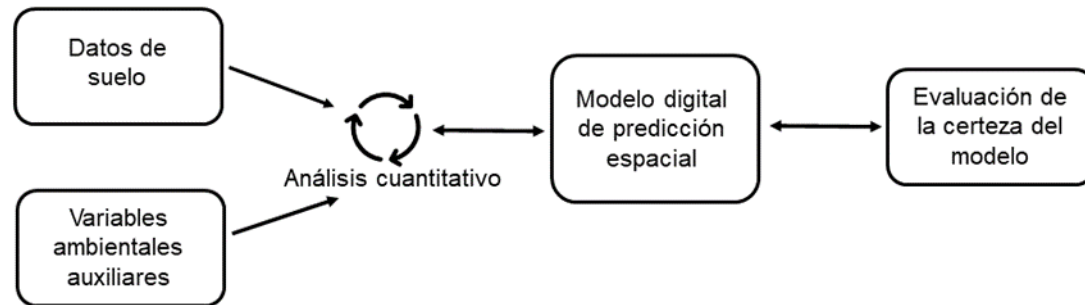
Además, SCORPAN incluye atributos de suelo entre los factores predictores, dado que muchos atributos del suelo están correlacionados y, por lo tanto, se pueden predecir razonablemente entre sí.

Los factores que intervienen en SCORPAN son capas espaciales que se pueden representar en un sistema de información geográfica.

## Procedimiento de mapeo digital de suelos

Para satisfacer las necesidades de información de los usuarios, el edafólogo debe:

1. Caracterizar el suelo en tantos puntos de muestreo como lo permitan los recursos disponibles.
2. Predecir los valores de propiedades relevantes del suelo en sitios no muestreados, a partir de la información obtenida en los puntos de muestreo.





## **Datos de Suelos**

Incluyen datos heredados de estudio previos (perfiles, mapas y diagnósticos de fertilidad de suelos) y datos aportados por nuevos muestreos.

Problemas relacionados con los datos de suelo heredados:

1. El acceso a los datos es difícil si estos se encuentran dispersos y no han sido organizados en sistemas de información.
2. Algunas instituciones imponen restricciones al uso de los datos.
3. Puede haber inconsistencias en los métodos de medición de las propiedades del suelo entre datos que proceden de fuentes diferentes.

## Datos de Suelos

4. La georreferenciación de los sitios de muestreo no es precisa y puede introducir errores importantes en el mapeo digital del suelo.
5. La densidad de muestreo es irregular; puede ser muy alta en algunas áreas e insuficiente en otras.
6. Como la información procede de proyectos diferentes, ejecutados a lo largo de muchos años, se puede dificultar el modelado de propiedades dinámicas del suelo (como carbono orgánico, sales y macronutrientes), así como la integración entre datos heredados y datos nuevos.

Cuando los datos proceden de diagnósticos de fertilidad existen otros problemas:

1. Su georreferenciación es más incierta, porque proceden de una muestra compuesta que representa a una parcela.
2. Su distribución espacial es irregular.
3. Con excepción de %arena, %arcilla y %limo, las propiedades edáficas analizadas pueden ser modificadas por el uso y manejo del suelo.

## **Datos de Suelos**

Cuando los datos se obtienen por medio de nuevos muestreos se debe definir:

1. La densidad de muestreo: no existen estándares preestablecidos.
2. La distribución espacial de los puntos de muestreo.
3. El conjunto mínimo de datos a recopilar en cada punto de muestreo.

Las labores de muestreo y análisis de laboratorio para generar estos datos pueden ser lentas y costosas.

Esto ha aumentado el interés por tecnologías emergentes de adquisición de datos, como inducción electromagnética y sensores proximales

## **Variables Ambientales Auxiliares**

Las variables auxiliares utilizadas representan a factores formadores de suelo.

Las variables auxiliares usadas con más frecuencia son:

- Parámetros calculados a partir de modelos digitales de elevación (MDE).
- Datos de teledetección.
- Mapas convencionales de geología, geomorfología, vegetación, clima y suelos.

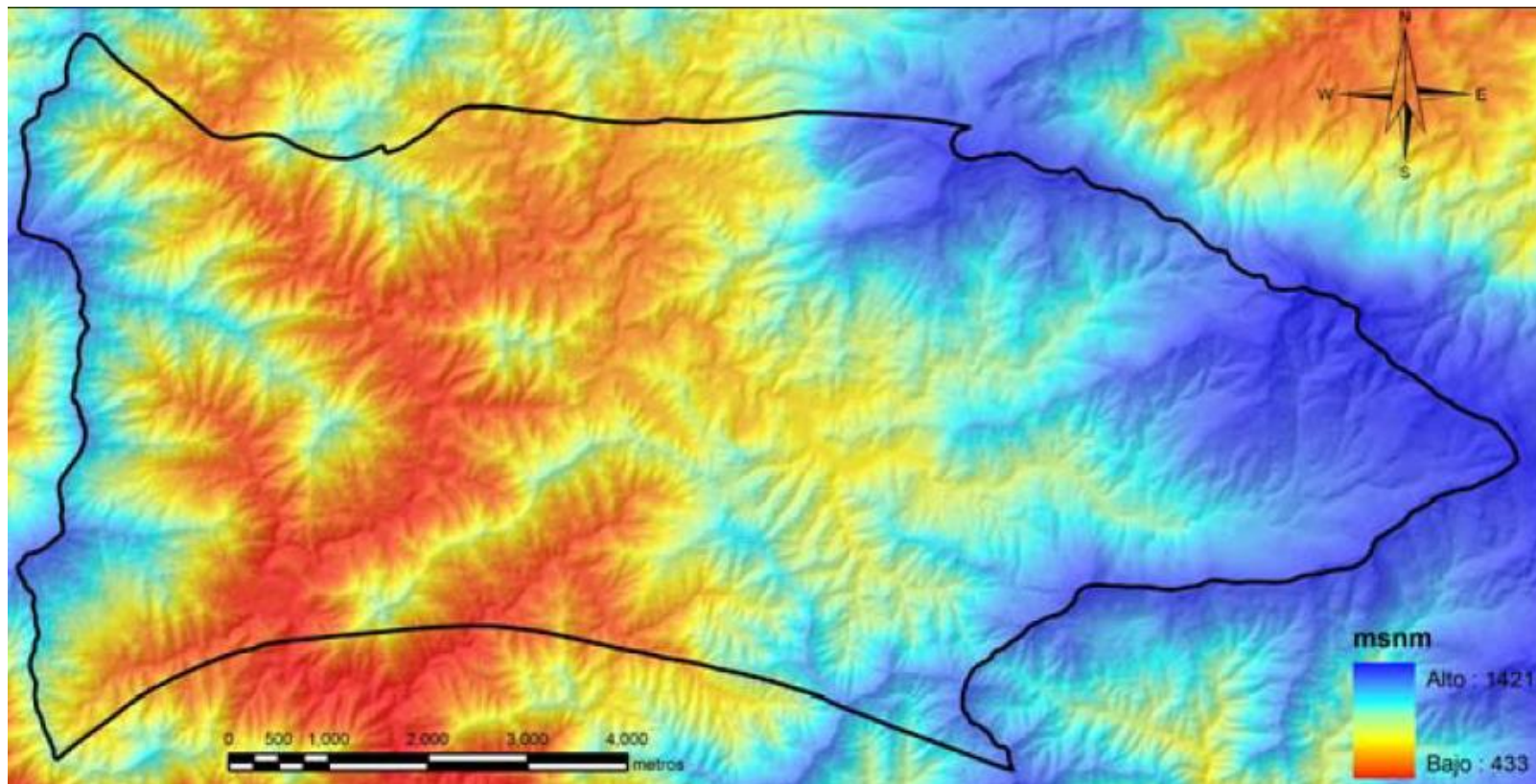
La selección de las variables auxiliares relevantes en un área determinada es crucial.

Puede basarse en la experiencia de expertos sobre relaciones suelo-paisaje; pero la decisión puede ser sesgada o incluso fallar en regiones donde el conocimiento sobre estas relaciones es insuficiente.

## Variables Ambientales Auxiliares

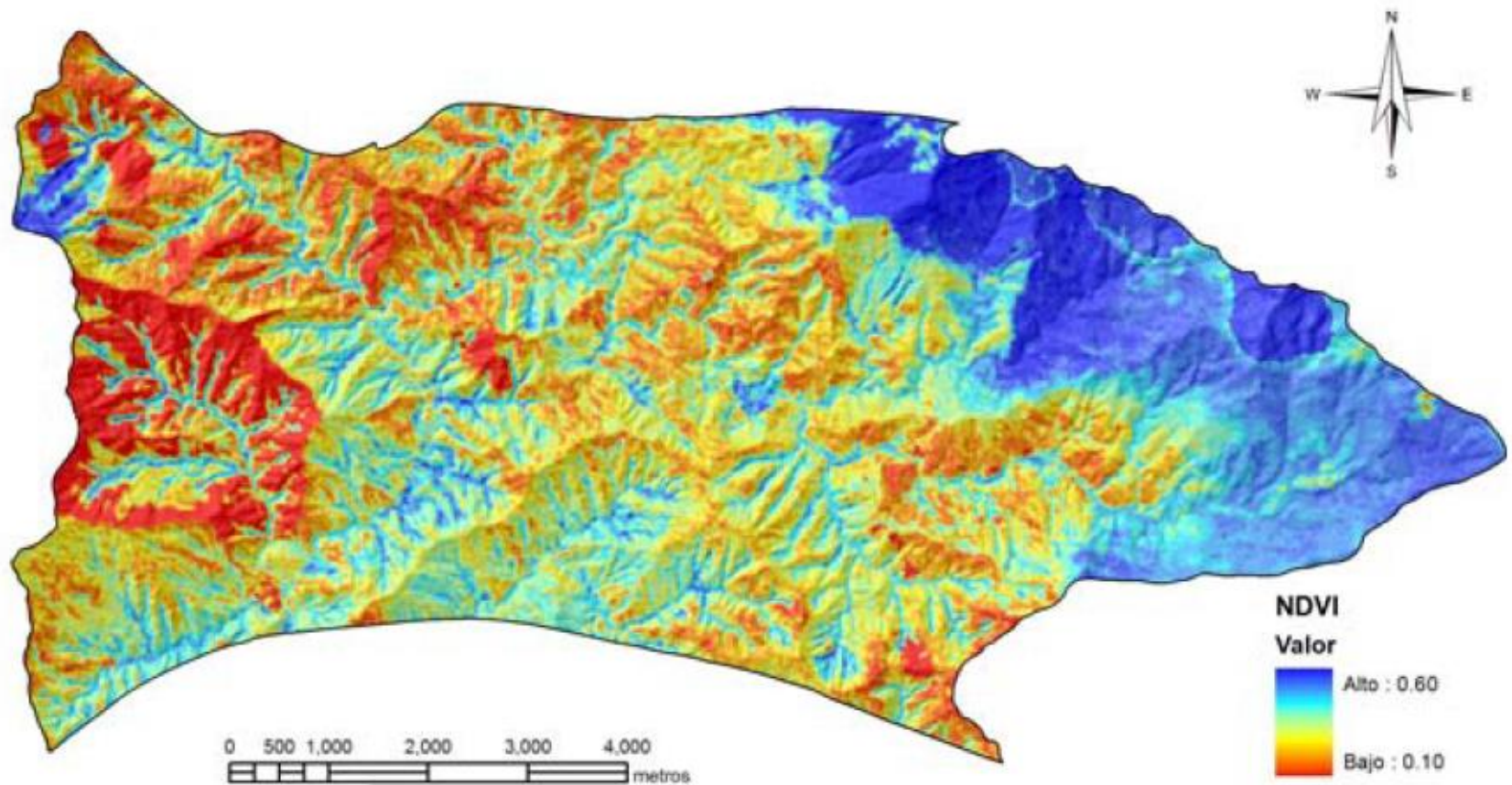
### *Ejemplos de variables auxiliares usadas en el mapeo digital de suelos*

Variable Auxiliar	Descripción
Altitud	Metros sobre el nivel del mar de cada celda del MDE.
Altura relativa	$(\text{Altitud} - \text{Altitud mínima}) / (\text{Altitud máxima} - \text{Altitud mínima})$
Gradiente de la pendiente	Magnitud en m/m del gradiente en la dirección de la pendiente
Orientación de la pendiente	Dirección en radianes hacia donde se inclina la pendiente
Perfil de curvatura	Curvatura en $\text{m/m}^2$ en la dirección de la pendiente
Plano de curvatura	Curvatura en $\text{m/m}^2$ perpendicular a la dirección de la pendiente
Área de captación	Área local, aguas arriba, que drena a través de una celda determinada del MDE
Índice topográfico de humedad	$\text{Ln} (A_s / \tan \beta)$ , donde $A_s$ es el Área de captación y $\beta$ es la pendiente local en grados
Índice normalizado de diferencias de vegetación	NDVI (por Normalized Difference Vegetation Index). Se calcula a partir bandas de imágenes multiespectrales. $\text{NDVI} = (\text{rojo} - \text{infrarrojo cercano}) / (\text{rojo} + \text{infrarrojo cercano})$



*Ejemplo de modelo digital de elevación de un sector de la cuenca alta del río Guárico (Venezuela). La altura del terreno es mayor en los extremos oriental y occidental del área de estudio, particularmente, en la zona montañosa reconocible al Este.*





*Ejemplo de índice de vegetación (NDVI) de un sector de la cuenca alta del río Guárico (Venezuela). La densidad de vegetación disminuye en sentido Este-Oeste.*

## **Variables Ambientales Auxiliares**

Algunos factores de estado, como el material parental y el tiempo, no tienen relación directa con parámetros extraídos de un MDE o de imágenes de percepción remota.

Sin embargo, los cambios en estos factores frecuentemente tienen una expresión externa en el paisaje y se pueden inferir estimaciones indirectas de ellos a partir de la posición relativa y la reflectancia de la superficie del terreno.

Mapas convencionales de geología, geomorfología, vegetación, clima y suelos también se pueden usar como variables auxiliares en el mapeo digital del suelo.

No obstante, la resolución gruesa de estos mapas, en comparación con las variables continuas, puede introducir sesgos en la predicción espacial de los atributos del suelo.

Por esta razón, la utilidad de dichos datos para la cartografía digital del suelo debe ser evaluada caso por caso



## **Variables Ambientales Auxiliares**

Se puede calcular un gran número de parámetros para describir las condiciones topográficas, hidrológicas y de cobertura de la superficie terrestre de un área determinada.

La selección de las variables auxiliares no es un problema trivial, una variable auxiliar seleccionada equivocadamente podría sesgar el modelo de predicción espacial producido para el mapeo digital del suelo.

Una práctica razonable en la selección de variables auxiliares consider tanto el uso de métodos automatizados como la evaluación de los resultados por edafólogos y/o geomorfólogos experimentados.

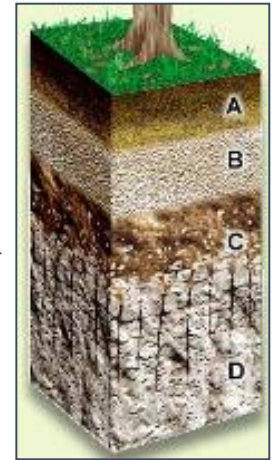
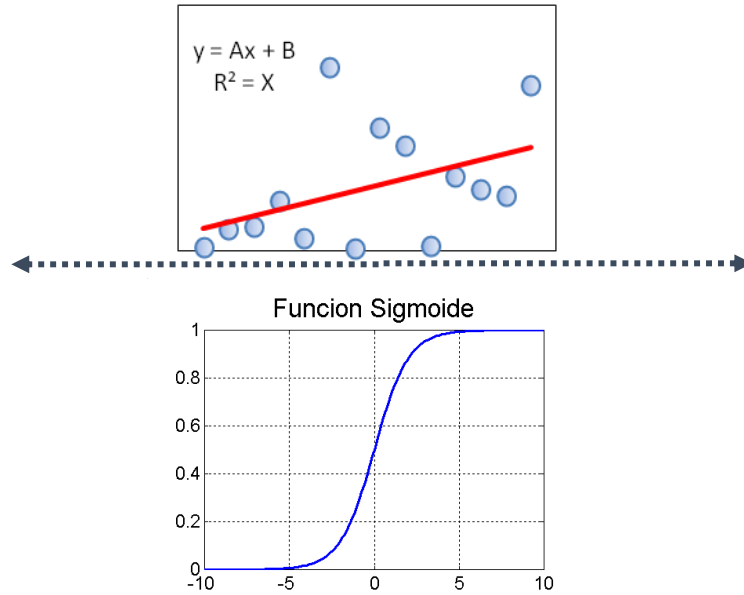
## **Métodos de Inferencia Espacial**

Las primeras aplicaciones de cartografía digital del suelo cubrieron áreas pequeñas, con relaciones relativamente claras entre atributos del suelo y del paisaje.

La regresión lineal fue el método más utilizado, inicialmente, para establecer relaciones cuantitativas entre propiedades del suelo y del paisaje.

Esto obedece a su simplicidad, eficiencia computacional, facilidad de uso e interpretación directa.

Sin embargo, en áreas extensas, los modelos de regresión lineal tienden a producir errores muy altos en la predicción espacial de atributos del suelo.



Las relaciones suelo-paisaje en áreas extensas por lo general no son lineales, sino más bien complejas y dinámicas.

Algunos cambios laterales del suelo son abruptos mientras que otros son graduales e imprecisos.

## **Métodos de Inferencia Espacial**

Modelar las relaciones suelo-paisaje por medio de métodos lineales es una opción factible solo en áreas pequeñas con pendiente suave

En áreas más extensas y complejas se deben usar otros métodos que permitan modelar relaciones no lineales, complejas y con ruido.

Los métodos más usados incluyen:

- Combinación de métodos lineales (Ej. regresión + kriging)
- Redes neuronales
- Conjuntos borrosos (fuzzy sets)
- Métodos de aprendizaje automático (machine learning)

## **Kriging de regresión (Regression kriging)**

Este método de inferencia espacial supone que la variación espacial del suelo incluye

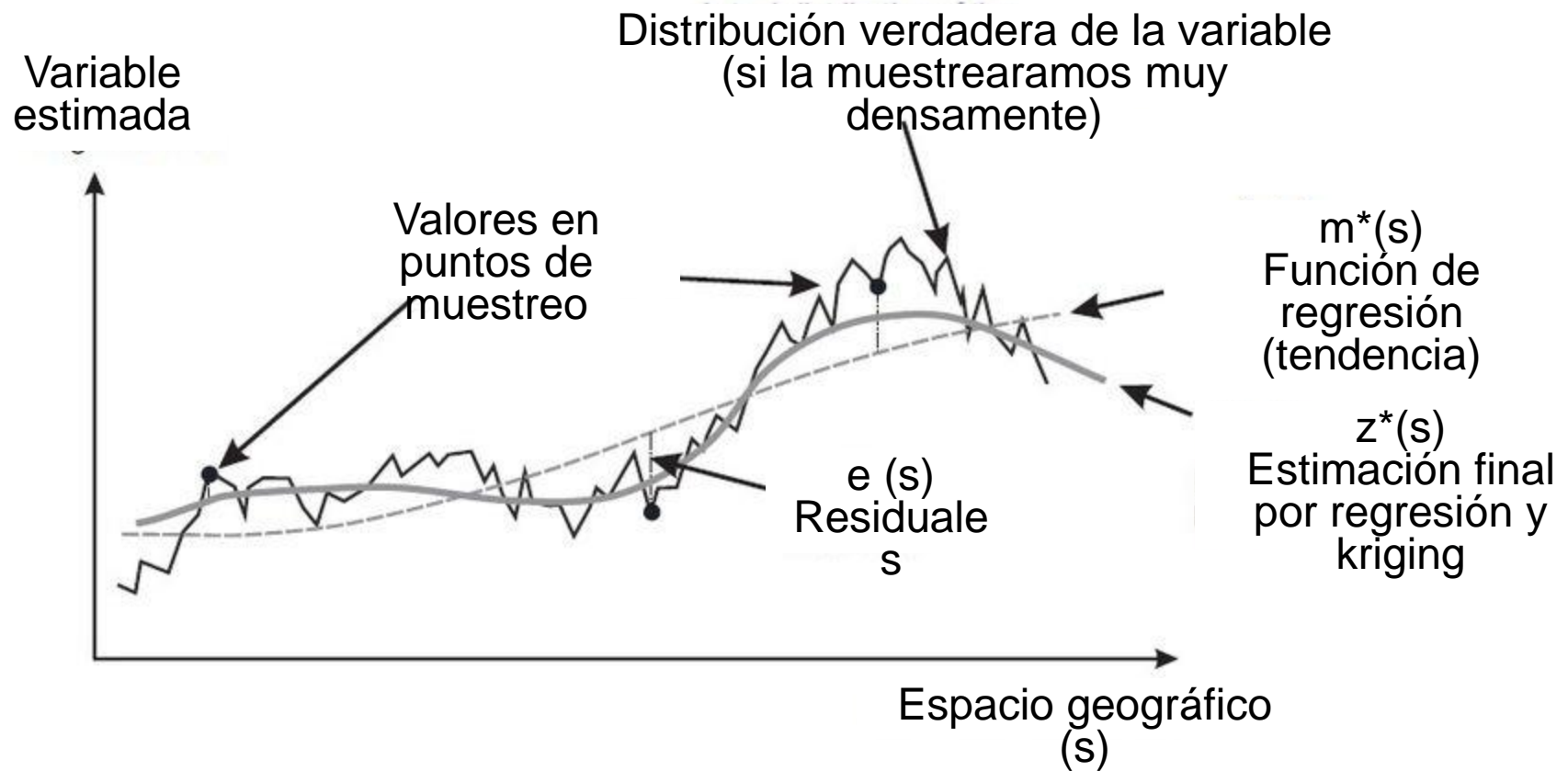
- 1. Una tendencia espacial
- 2. Una variación residual espacialmente dependiente
- 3. Una variación remanente aleatoria

Combina dos métodos lineales de predicción espacial

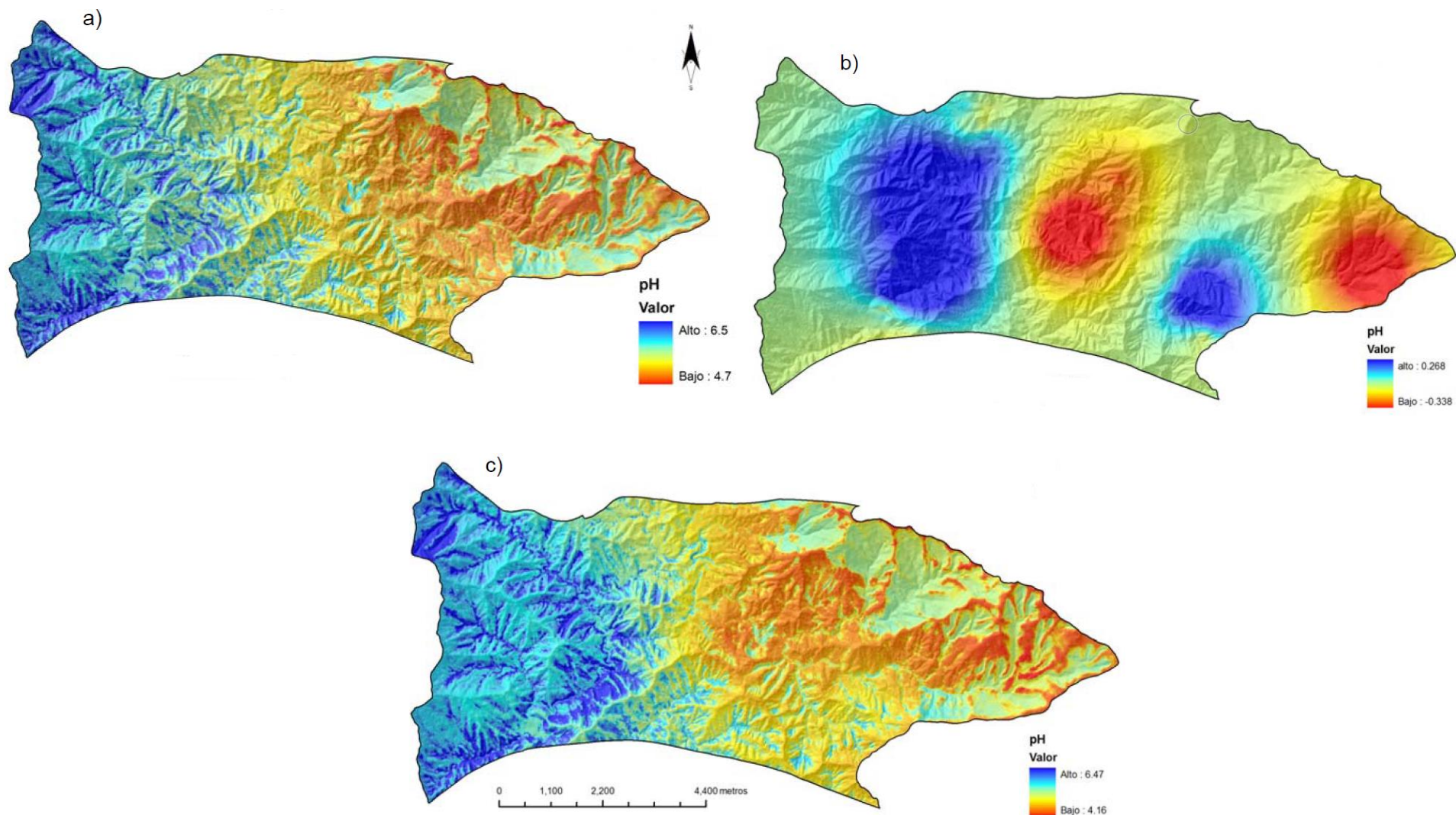
- a. Estimación de la tendencia espacial por regresión
- b. Interpolación por kriging de los residuales de la regresión que muestren dependencia espacial.

$$Z(s) = m(s) + e(s) + e'$$

## Esquema idealizado de Kriging de regresión



$$z^*(s) = m^*(s) + e(s) + e'$$



*Ejemplo de aplicación de kriging de regresión para la predicción espacial del pH de la capa superficial del suelo, en un sector de la cuenca alta del río Guárico, Venezuela.*

a) regresión; b) kriging de residuales; c) mapa final (a + b).

## **Métodos de aprendizaje automático (machine learning)**

- Son algoritmos capaces de aprender de los datos y de mejorar su desempeño automáticamente con la experiencia.
- Permiten modelar procesos complejos no lineales y fenómenos inciertos, imprecisos y con ruido.
- No requieren que los datos se ajusten a la distribución normal.
- No suponen una forma específica de relación entre las variables ambientales y las propiedades del suelo.
- Dada la complejidad de las relaciones suelo-paisaje, estos métodos ofrecen ventajas comparativas para modelar la variación espacial del suelo.
- Ejemplos: redes neuronales artificiales (artificial neural networks), conjuntos borrosos (fuzzy sets), máquinas de vectores de soporte (support vector machine) y bosques aleatorios (random forest).



## **Combinación de métodos**

- Una ventaja adicional de los métodos numéricos de inferencia espacial es la posibilidad de combinarlos en un nuevo método híbrido.
- Esto permite aprovechar las fortalezas de un método para superar las debilidades del otro y viceversa.
- Por ejemplo, kriging de regresión combina un algoritmo de regresión lineal con el de interpolación por kriging.
- La regresión lineal puede ser sustituida, en este método híbrido, por un modelo matemático no lineal como, por ejemplo, un algoritmo de aprendizaje automático.
- Algoritmos de redes neuronales artificiales y de conjuntos borrosos han sido combinados en un nuevo método “neuroborroso” que combina las fortalezas de los algoritmos originales.
- La red neuroborrosa FKCN (Fuzzy Kohonen Clustering Network) resulta de la fusión de un algoritmo de redes neuronales autoorganizado (SOM) y otro de clasificación borrosa (FCM).
- Este modelo fue implementado experimentalmente en la Universidad Central de Venezuela, para su aplicación a la cartografía digital del suelo y el paisaje.

## **Validación de resultados**

- Un mapa digital de suelo es un modelo de predicción espacial de propiedades o clases de suelo. Como todo modelo, el mapa es una representación aproximada de la realidad con cierto grado de error.
- La certeza de las predicciones depende del método de inferencia espacial aplicado y de la cantidad y calidad de los datos utilizados. Si los datos de suelo son escasos y no representativos, la incertidumbre de las predicciones será muy alta.
- La magnitud del error de predicción es la diferencia entre los valores predichos y los observados en un número determinado de puntos de muestreo. Conocer esta magnitud es crucial para juzgar la utilidad del mapa como modelo de predicción espacial.
- En consecuencia, un paso importante en el flujo de trabajo de la cartografía digital del suelo es la estimación cuantitativa del error de predicción del mapa producido. Esta evaluación se puede realizar por validación externa, validación cruzada o ambas.

## Validación de resultados

- La validación externa se realiza con datos independientes. Se dividen aleatoriamente los datos en dos conjuntos: uno de entrenamiento (70% a 80% de los datos) y otro de validación (datos restantes). Con los datos de entrenamiento se genera el modelo y, con los de validación, se evalúa..
- La validación cruzada consiste en dividir al azar el conjunto total de datos en K conjuntos de igual tamaño. En cada división se reserva uno de los conjuntos para validación y se genera una predicción del modelo con los datos de los conjuntos K-1. A partir de esta predicción, se calcula el error de predicción.
- La valoración de cada modelo se realiza por medio de indicadores estadísticos. A manera de ejemplo, se presentan tres de los indicadores más usados.

# Parámetros estadísticos usados frecuentemente para evaluar la capacidad de predicción de modelos digitales de cartografía de suelos

Parámetro	Ecuación	Cálculo e Interpretación
<p>Error medio</p> <p>Em</p>	$Em = \frac{\sum(Z_i - Z^*_i)}{n}$	<p>Sumatoria de las diferencias entre el valor medido (<math>Z_i</math>) y el valor predicho (<math>Z^*_i</math>) en cada punto de validación, dividida entre el número total de estos puntos. Si <math>Em = 0</math>, la predicción es exacta. Cuando es <math>&lt; 0</math> el modelo subestima los valores de la variable objetivo, y cuando es <math>&gt; 0</math> los sobreestima.</p>
<p>Raíz del error medio cuadrático</p> <p>RMSE</p> <p>(por “root mean squared error”)</p>	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Z_i - Z^*_i)^2}{n}}$	<p>Raíz cuadrada de la sumatoria de las diferencias cuadráticas entre los valores medidos (<math>Z_i</math>) y predichos (<math>Z^*_i</math>) en los puntos de validación, dividida entre el número total de estos puntos. Las predicciones son más precisas a medida que RMSE disminuye.</p>
<p>Correlación entre valores medidos y estimados</p> <p>r</p>	<p>r = Coeficiente de correlación de Pearson (<math>Z_i, Z^*_i</math>)</p>	<p>El modelo de predicción es mejor a medida que r se aproxima a 1.</p>

## **Sinergia entre cartografía digital y convencional de suelos**

- La cartografía digital y el mapeo convencional del suelo son metodologías complementarias y sinérgicas, más que enfoques opuestos. Las fortalezas de un método pueden ser aprovechadas para superar las debilidades del otro y viceversa.
- Por un lado, los mapas convencionales de suelo contienen conocimientos sobre las relaciones entre el suelo y el paisaje, que son valiosos como fuentes de datos y como marco conceptual para la cartografía digital.
- Por el otro lado, el mapeo digital del suelo puede contribuir a que los mapas convencionales sean más cuantitativos y reproducibles. A esto se suma que los modelos digitales de predicción espacial de propiedades del suelo son más apropiados para unos fines y los mapas convencionales para otros.

## **Sinergia entre cartografía digital y convencional de suelos**

- Por ejemplo, los modelos digitales de predicción espacial de propiedades del suelo son más apropiados que los mapas tradicionales, como fuente de información para la modelación ambiental y agrícola.
- Sin embargo, su uso como base para la elaboración de planes de ordenamiento del uso de la tierra es limitado porque representan al suelo como una superficie y no como un cuerpo tridimensional. Para este propósito es más útil un mapa convencional porque muestra la distribución espacial de cuerpos de suelo, que difieren en sus características y en su respuesta al uso y manejo.

## **Sinergia entre cartografía digital y convencional de suelos**

En particular, existen varios casos en los cuales la aplicación complementaria de métodos de cartografía convencional y cartografía digital del suelo puede mejorar la calidad de la información producida:

- Mapeo de clases de suelo.
- Actualización de mapas de suelo.
- Interpretación edafogénica para mejorar el mapeo digital del suelo.
- Cartografía digital de geoformas y suelos.

## **Mapeo de clases de suelo**

Una clase de suelos es una entidad de información que representa un conjunto de suelos con propiedades, génesis y comportamiento similares. Cada clase de suelo se identifica con un nombre que permite resumir y recordar las propiedades del conjunto de suelos, e identificar áreas de suelos similares. Además, proporciona un marco de referencia para la colección y organización de información adicional de suelos.

Cada delineación de un mapa convencional de suelo generalmente contiene varias clases de suelo. Comúnmente, el informe adjunto al mapa de suelos indica el porcentaje de cada clase de suelo, en la unidad cartográfica a la cual pertenece la delineación. Sin embargo, la ubicación de cada clase dentro del polígono permanece desconocida. Por medio de la cartografía digital de suelos se pueden desagregar los polígonos de mapas de suelo, para determinar la distribución espacial de las diferentes clases individuales de suelo.



## **Actualización de mapas de suelo**

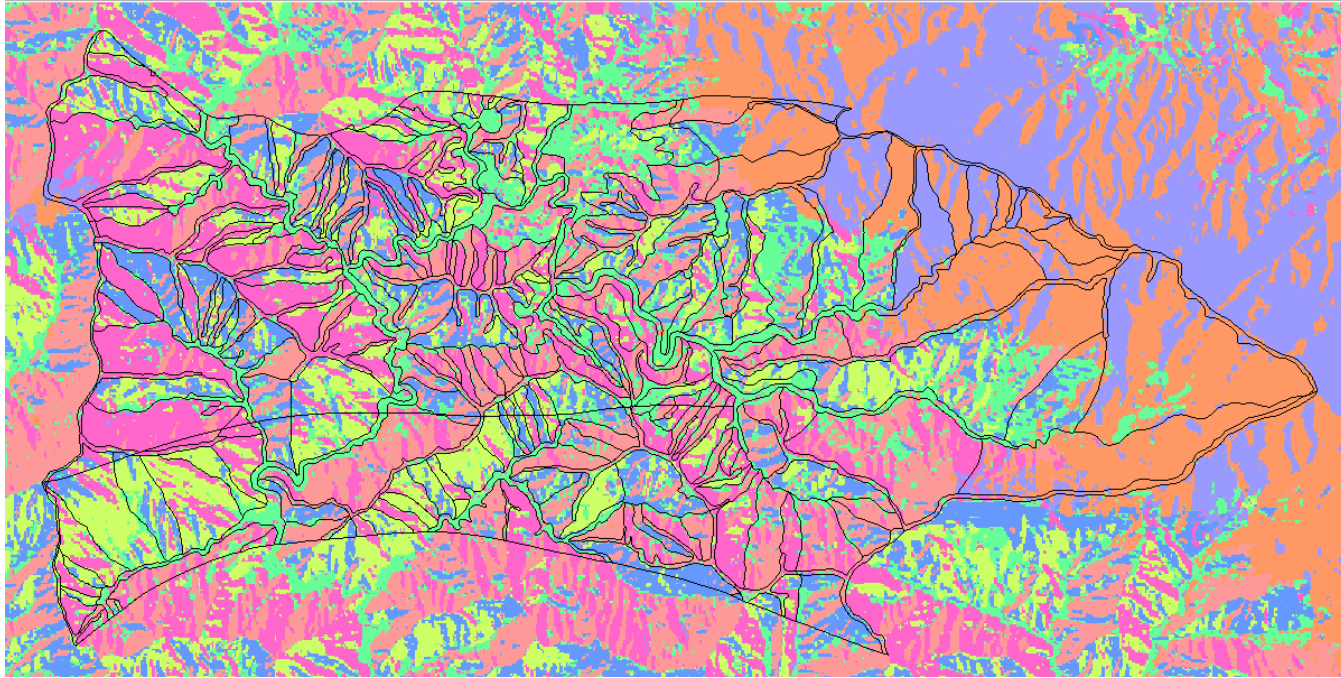
- Las unidades cartográficas de mapas de suelo corresponden a unidades de paisaje (geoformas). En consecuencia, se pueden utilizar técnicas de cartografía digital con datos recientes de variables ambientales auxiliares, para actualizar mapas antiguos de suelo y ampliar las áreas cubiertas por ellos. De igual forma, se pueden aplicar procedimientos de validación para evaluar la certeza de las predicciones basadas en los mapas actualizados de suelo.

## **Cartografía digital y génesis de suelos**

- Los modelos de inferencia usados en la cartografía digital del suelo pueden operar como "cajas negras" en las cuales el conocimiento de génesis de suelos se pierde entre múltiples variables auxiliares utilizadas para hacer las predicciones (Padarian *et al.*, 2019). La incorporación de conocimientos de edafogénesis a estos modelos puede aumentar la eficiencia de la predicción (Walter *et al.*, 2006). Estos conocimientos contribuyen a discernir los procesos que han dado origen a la variación espacial de las propiedades del suelo, y la relación entre estos y los cambios percibidos en los atributos del entorno. Su contribución es esencial para mejorar nuestra comprensión de los factores que controlan la distribución espacial del suelo.

## **Cartografía digital de geoformas y suelos**

- El reconocimiento de que las clases de suelos con características similares ocupan posiciones análogas en el paisaje ha incentivado la aplicación de la geomorfología al levantamiento de suelos.
- Sin embargo, el enfoque convencional de mapeo de geoformas como apoyo al inventario de suelos ha sido criticado, porque se basa en una caracterización cualitativa de la configuración de la superficie terrestre. Esto introduce subjetividad y sesgos en la selección de criterios para la segmentación del paisaje y la localización de los límites de suelos.
- Por otra parte, la cartografía digital también ha sido usada para identificar clases morfométricas de terreno en estudios geomorfológicos). Esto revela que los métodos digitales ofrecen oportunidades y plantean desafíos para modelar las relaciones entre geoformas y propiedades del suelo.
- A continuación, les presento como ejemplo un modelo digital espacial que producimos para representar las relaciones suelo-paisaje de un área montañosa en el centro norte de Venezuela.

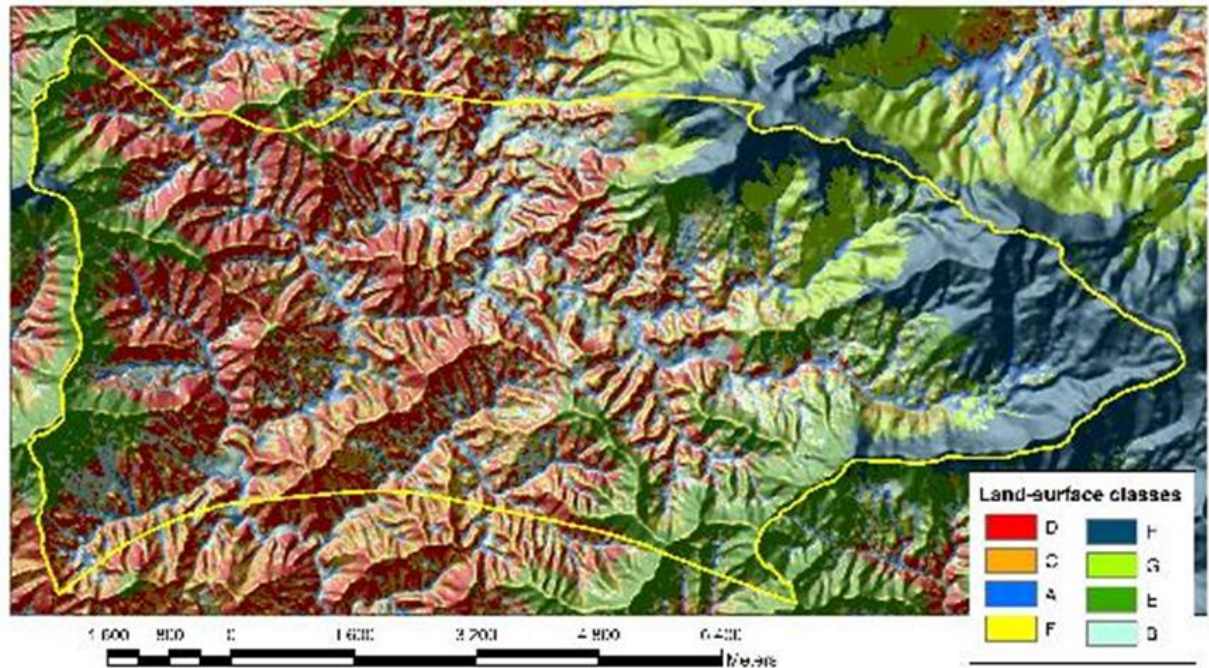


Ejemplo de aplicación de la red FKCN para la identificación de clases de suelo-paisaje, en un sector de la cuenca alta del río Guárico, Venezuela.

Las líneas de color negro de color negro son producto de la fotointerpretación realizada por un experto durante 3 meses de trabajo. Representan cuerpos de suelo.

Los colores representan clases de suelo-paisaje generadas con en algoritmo FKCN durante 1 semana de trabajo.

La coincidencia de los cambios de color con las líneas negras donde ocurren cambios abruptos de relieve revela que la clasificación obtenida con FKCN representa la variación espacial del suelo como un continuo con unidades discretas.



## Consideraciones finales

- Los mapas convencionales de suelo han sido, hasta ahora, la fuente principal de información sobre la distribución espacial de las propiedades edáficas.
- Los programas de inventario de suelos alcanzaron una coyuntura crítica en muchos países en la década de 1990, debido a severas restricciones presupuestarias y al cambio de la demanda de información de suelos.
- Gobiernos locales e inversionistas privados con necesidades específicas, sustituyeron a los gobiernos centrales como los usuarios más frecuentes de información de suelos.
- La demanda de información de suelos, que históricamente había sido impulsada por la necesidad de producción de alimentos y fibras, se diversificó para abordar problemas ambientales tales como la degradación, calidad y salud del suelo, y la capacidad del suelo de secuestrar carbono

En este contexto, el mapeo digital del suelo ha surgido como una alternativa para producir modelos continuos y cuantitativos de predicción espacial de propiedades del suelo, con las siguientes ventajas en comparación con los mapas convencionales del suelo:

1. Proporciona predicciones cuantitativas de los atributos del suelo y estimaciones de la incertidumbre asociada a estas predicciones.
2. Permite cuantificar la importancia de las variables ambientales que controlan la distribución de propiedades relevantes del suelo.
3. Los mapas se pueden producir y actualizar más rápidamente.

- Los primeros estudios de cartografía digital del suelo fueron de carácter experimental, en áreas pequeñas con paisajes relativamente simples, y relaciones suelo-paisaje más o menos lineales.
- La tendencia reciente es a realizar estudios para satisfacer demandas de información en áreas relativamente grandes, con paisajes más complejos, donde la variación espacial del suelo las relaciones suelo-paisaje no son lineales. En consecuencia, los modelos digitales de predicción espacial también se han hecho más complejos.



El mapeo digital del suelo ha experimentado un gran avance, a lo largo del siglo XXI, inducido por la convergencia de varios factores.

1. Un aumento de la demanda de información edáfica, debido al surgimiento de un interés renovado por la agricultura y los problemas ambientales.
2. El acceso libre, a través de internet, a imágenes multiespectrales y de radar, y modelos digitales de elevación con diversos grados de resolución espacial.
3. La existencia actual de computadoras con gran potencia que pueden procesar grandes volúmenes de datos.
4. El desarrollo de software libre (como QGIS, SAGA-GIS y R) y librerías de programas para el análisis de datos espaciales.

- La cartografía digital de suelos reduce drásticamente el tiempo necesario para producir mapas de suelo y permite representar la variación espacial del suelo como un continuo con unidades discretas.
- Sin embargo, no es un método automático de producción de mapas. Es una investigación dirigida a extraer de los datos información relevante, que conduce a proponer modelos realistas de variación espacial del suelo.
- Se debe apoyar en conocimientos de génesis de suelos para crear modelos que representen adecuadamente la variación espacial del suelo. Estos modelos se deben contrastar con datos de campo para determinar su grado de certeza.

- Hoy, la aplicación de técnicas de mapeo digital del suelo se ha hecho más fácil, gracias al libre acceso a fuentes de datos digitales de variables ambientales, y a librerías de software para el manejo y análisis de esos datos.

Sin embargo, existe el riesgo de que se produzcan mapas de muy baja calidad, por razones como las siguientes:

1. Producir mapas digitales basados en insuficientes observaciones de campo,
2. Usar demasiadas variables auxiliares con un número limitado de observaciones de campo,
3. Usar variables auxiliares irrelevantes,
4. Ignorar las técnicas de validación externa o de validación cruzada,
5. No indicar o falsear estimaciones de incertidumbre.

Los métodos de cartografía digital de suelos, usados de manera incorrecta, pueden conducir a cometer graves errores que pueden quedar ocultos tras atractivas presentaciones de mapas.

Por estas razones, es necesario:

- Exigir estándares estadísticos mínimos para todos los productos de cartografía digital del suelo.
- Formar profesionales capacitados en la aplicación de fundamentos científicos y técnicos de este enfoque, como base para utilizar correctamente esta tecnología.