

# El Machine Learning de la Carta Geológica Nacional 50K y la Exploración Minera

Rildo Rodríguez<sup>1</sup>, Luis Coba<sup>1</sup>, Mirian Mamani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - Ingemmet, Av. Canadá # 1470, San Borja, Lima, Perú. (rrodriguez@ingemmet.gob.pe, lcoba@ingemmet.gob.pe, mmamani@ingemmet.gob.pe)

## 1. Abstract

La constante actualización de información que puede ser utilizada para mejorar la Carta Geológica Nacional, obliga a que esta se actualice constantemente y forme la base para el desarrollo socio-económico del país.

Actualmente la implementación de inteligencia artificial está en todos los sectores; en ese sentido, los usuarios de Ingemmet necesitan una Carta Geológica Nacional inteligente que les permita interactuar con los atributos de las bases de datos para obtener mejores resultados. La integración de la Carta Geológica Nacional 50k es el primer paso para crear inteligencia artificial. Por ello, Ingemmet viene implementado el machine learning de la Carta Geológica Nacional integrada a lo largo de todo el territorio.

Las aplicaciones del machine learning de la Carta Geológica Nacional son tangibles y contribuyen a la reactivación económica en diferentes sectores, especialmente en la exploración de depósitos minerales.

## 2. Introducción

La Carta Geológica nacional se ha desarrollado desde 1960, bajo el nombre de Comisión Carta Geológica y actualmente, Ingemmet es la institución encargada de elaborarla con el objetivo de brindar información geológica accesible para los ciudadanos.

La Carta Geológica se realiza en diferentes escalas, siendo las principales 1:100.000, 1:50.000 y 1:1'000.000. La carta a escala 1:100.000 se culminó en el año 1999 y de ello se tuvo una nueva versión del Mapa Geológico del Perú a escala 1:1'000.000.

Los mapas geológicos a escala 1:50,000 se elaboran desde el año 2000 con los mismos estándares de calidad de los mapas a escala 1:100,

000, obteniendo mapas individualizados en un formato que no permite la automatización de procesos al momento de la elaboración y edición de los mismos, haciendo necesario innovar para mejorar nuestros procesos.

A partir del año 2018 se diseñó e implementó una geodatabase geológica en el Software ArcGIS, permitiendo la estandarización de la base de datos y el uso de herramientas de automatización desarrolladas en Python. Esto facilita la edición y administración de la información de manera integral, debido a que permite organizar los datos y añadir herramientas de búsqueda inteligentes, automatizando los procesos en la elaboración de mapas geológicos, hacer consultas más rápidas, y realizar estudios puntuales mediante relaciones con otras bases de datos.

## 3. Estructura de la Geodatabase Geológica

La estructura de la geodatabase geológica está basada en los estándares cartográficos de la Federal Geographic Data Committee Geologic Data Subcommittee (2006) de la USGS, la guía estratigráfica internacional, entre otros manuales de integración de diversos servicios geológicos del mundo como del Servicio Geológico Chino (Li et al., 2016), toda la información fue complementada con los manuales de la Dirección de Geología Regional del Ingemmet. El resultado es una nueva estructura de geodatabase apropiada para el territorio peruano.

La geodatabase fue estructurada en el Software ArcGIS. Contiene 13 feature dataset y 12 tablas (Figura 01). Los feature dataset en conjunto contienen 146 feature class, que representan a grupos de datos del Sistema Geográfico y UTM. Por medio de ellos se representa en el mapa geológico las entidades tipo punto, línea y polígono. A su vez, cada feature class se relaciona con un dominio que contiene un rango de valores alfa numéricos o numéricos de un determinado campo. Las tablas permiten almacenar información no espacial como

soporte de los diversos procesos de automatización.

Esta estructura permite realizar consultas rápidas de la información existente en ella. Su base de datos se puede relacionar con una inmensa cantidad de información, esto es posible por la conexión de campos en común que tengan ambas bases de datos. Mediante la relación e interacción de bases de datos es posible realizar diversos trabajos de investigación relacionados a la exploración minera, tomando como base los mapas geológicos.

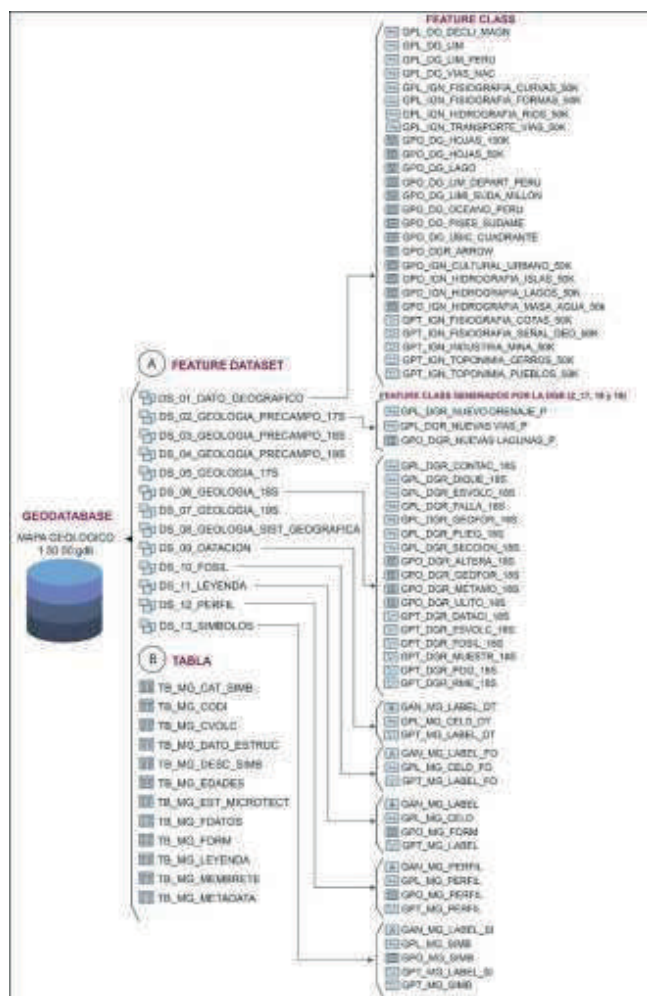


Figura 01.- Estructura de la Geodatabase Geológica.

### 3.1. Estandarización de la información.

Luego del diseño de la geodatabase se realiza la uniformización de terminologías, nomenclaturas, simbologías y colores según estándares Internacionales y del INGEMMET, organizando la información por categorías, nombrando a cada

categoría como un dominio, asignado un código a cada elemento que contenga el dominio. Finalmente se cargó la información a la geodatabase.

## 4. Proceso de integración geológica

### 4.1. Migración de la información a la geodatabase.

La información de los mapas elaborados durante los años 2000 – 2019 fueron migrados a la geodatabase geológica, permitiendo el almacenamiento y administración eficiente de la información de manera centralizada.

Una vez migrada la información a la geodatabase se completó la base de datos, unificando terminologías y nomenclaturas según los estándares del INGEMMET.

### 4.2. Corrección de empalmes

Para lograr que la Carta Geológica Nacional adquiera inteligencia artificial, es necesario que la información migrada a la geodatabase sea estandarizada, es decir que las discrepancias entre los mapas geológicos deben ser corregidos. En ese sentido, se sectorizó al Perú en dominios geológicos que se emplazan de manera similar a los dominios tectónicos del Perú (Figura 2). Los dominios geológicos presentan unidades estratigráficas con características litológicas similares.

El empalme de mapas se realizó utilizando imágenes satelitales, de las cuales es posible extraer información de los diferentes tipos de rocas, contactos litológicos, morfología, estructuras tectónicas, estructuras ígneas, zonas de alteración hidrotermal, etc. Así mismo, se ha consultado bibliografía relevante que ayude a resolver problemas geológicos complejos.

Dado que los problemas de empalmes pueden presentar variada dificultad, se ha registrado un valor que oscila desde simple a complejo, este último debe ser revisado en campo para confirmar la calidad de la información.

### 4.3. Validación de la Información.

Luego de la corrección de empalmes se realiza la validación de la información. Para ello, se hace uso

de diferentes herramientas de automatización que identifican algunos errores topológicos y en la base de datos.

La información validada ya está lista para ser utilizada en estudios puntuales, como la exploración minera y su aprovechamiento será optimizada al relacionarla con otras bases de datos.

## 5. Aplicaciones a la exploración minera

Las aplicaciones directas del machine learning se llevan en diferentes sectores, debido a que se pueden interrelacionar con otras geodatabases y mientras más información se tenga la inteligencia artificial será mayor. Por ejemplo, en el campo de la agricultura se puede aprovechar con la composición de suelos.

En el caso específico, para la exploración minera, como un ejemplo sencillo, podemos extraer en cuestión de minutos las fallas regionales relacionadas a los metalotectos sedimentarios por edades y composición litológica (Figura 3), lo cual permite definir la prospección de depósitos. En efecto podemos generar un mapa de tipo de caliza que al relacionarla con tipo de rocas ígneas permite ver explícitamente las posibilidades de exploración.

El uso de machine learning de la Carta Geológica permitirá precisar mejor los blancos exploratorios cuando interactúe con información del usuario. Así pues, la combinación de información entre litología fallas y ocurrencia mineral permite definir bloques exploratorios, en donde actualmente no hay depósitos minerales grandes, lo cual, complementado con otros campos de la geodatabase como medios paleogeográficos, arcos magmáticos, dominio tectónico, entre otros permite realizar exploraciones a partir de fundamentos teóricos para búsqueda de depósitos minerales ocultos. Un ejemplo, comprobado es el que se encuentra en la deflexión de Cajamarca. La combinación de litología, estructuras, ocurrencias minerales y análisis de la cuenca sedimentaria del Cretácico realizado por Wilson et al. (2000) muestra claramente corredores mineralizados en el borde de la subcuenca Cajamarca del Cretácico (Figura 4).

Las perspectivas para aumentar la inteligencia artificial de la Carta Geológica Nacional se basan en el incremento de toda la información pública del territorio nacional, así como bases de datos de

depósitos minerales, hidrogeología, con el fin de que la Carta Geológica sea el resultado del conocimiento geológico en todas sus ramas. Por lo tanto, la máxima expresión del estado del conocimiento geológico actual.

## 6. Conclusiones

El Desarrollo de la Carta Geológica Nacional siempre tendrá problemas de empalme por el tiempo que demora su ejecución, esto es debido a que es realizada por diferentes geólogos con diferentes condiciones de trabajo y herramientas, las cuales varían en tiempo muy corto.

La integración del conocimiento geológico ha generado nuevas formas de trabajo y que permiten agilizar la elaboración de los mapas con mayor cantidad de información. Estos análisis serían casi imposibles de realizarlos de otra manera. Sin embargo, las herramientas como el machine learning, no reemplazan al geólogo, solo es una ayuda y el geólogo es quien toma la decisión en base a la calidad de la información que utiliza.

El robustecimiento de la inteligencia artificial es dinámico y los resultados son interpretaciones válidas para un determinado tiempo. El incremento de información validada permitirá definir nuevas interpretaciones más cercanas a la realidad, las mismas que abren nuevas posibilidades exploratorias.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a todo el equipo de la Dirección de Geología Regional de Ingemmet por sus aportes de acuerdo al conocimiento de los Andes.

## Referencias

- LI Chaoling, LI Fengdan, LIU Chan, LIU Yuanyuan, LÜ Xia & Li Chaoling, 2016. Digital Geological Survey System Operation Manual – Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization: Reston, Va., Federal Geographic Data Committee Document Number FGDC-STD-013-2006, 290 p., 2 plates.
- WILSON, 2000 Structural development of the northern Andes of Peru - Lima Sociedad Geológica del Perú 2000 - p. 331-341

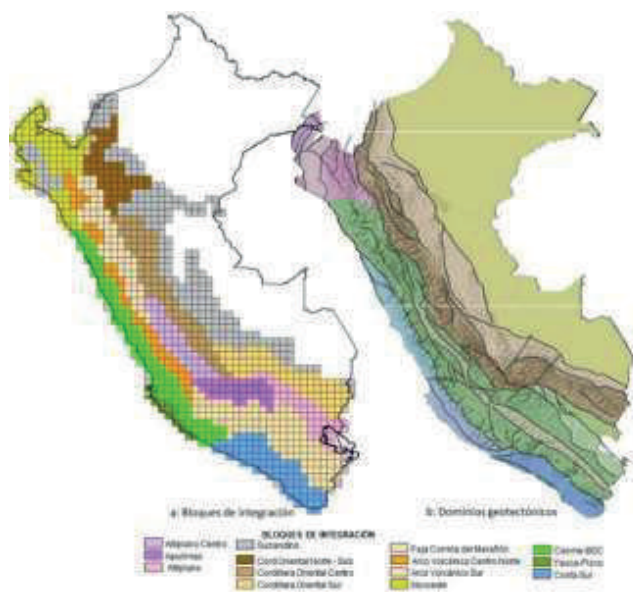


Figura 2: División de dominios geológicos (a) comparado con los dominios tectónicos del Perú.

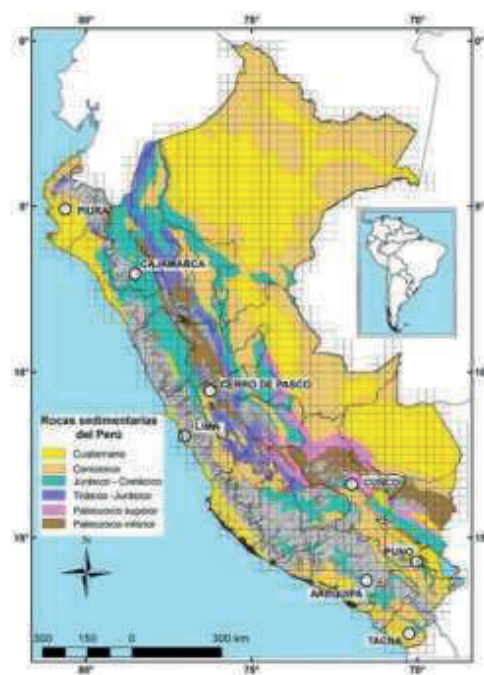


Figura 3. Representación esquemática de las virtudes del machine learning de la Carta Geológica a escala 1:50000. Se muestra la distribución de rocas sedimentarias por edades en el Perú.

Tabla de atributos de las unidades litoestratigráficas

Nombre	Descripción	Edad	Grado	Clase	Forma	Color	Patrón	Simbología	Uso
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Nombre	Descripción	Edad	Grado	Clase	Forma	Color	Patrón	Simbología	Uso
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

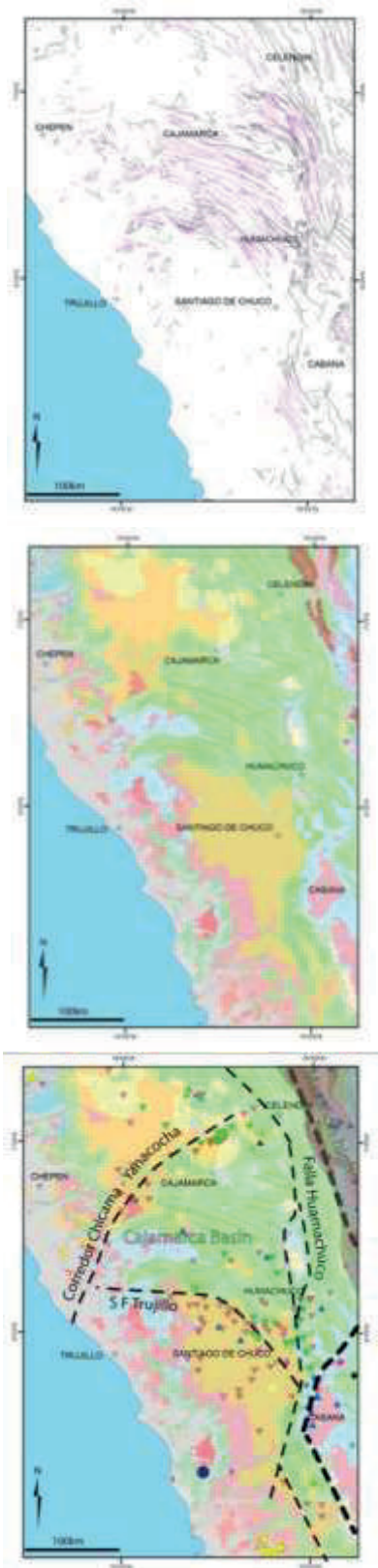


Figura 4: Ejemplo de aplicación del machine learning de la Carta Geológica Nacional a la exploración minera. Arriba: Líneas magenta son pliegues; líneas negras, fallas. En el centro: Tonalidades de color celeste indican rocas del Jurásico; verdes, el Cretácico; amarillos, el Cenozoico y rojos, intrusivos. Abajo: Líneas negras son corredores de mineralización, los puntos rojos verde y azul son ocurrencias minerales.