

Preparando un monitoreo más sistemático del volcán Pico de Orizaba usando herramientas modernas de redes neuronales e Inteligencia Artificial

Preparing a more systematic monitoring of the Pico de Orizaba volcano using modern tools of neural networks and Artificial Intelligence

Silvano Ulices Que Salinas ^a | Katrin Sieron ^b | Francisco Córdoba-Montiel ^c
Rafael Torres-Orozco ^d | Sergio Francisco Juárez Cerrillo ^e | Oscar Castro-Artola ^f
Raúl Arambula ^g |

Recibido: 13 de septiembre de 2022.

Aceptado: 18 de octubre de 2022.

^a Universidad Veracruzana, Centro de Ciencias de la Tierra, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV). Xalapa, México. Contacto: feanorkdt@gmail.com

^b Universidad Veracruzana, Centro de Ciencias de la Tierra, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV). Xalapa, México. Contacto: ksieron@uv.mx

^c Universidad Veracruzana, Centro de Ciencias de la Tierra, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV). Xalapa, México. Contacto: fcordoba@uv.mx *Autor para correspondencia.

^d Universidad Veracruzana, Centro de Ciencias de la Tierra, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV). Xalapa, México. Contacto: raftorres@uv.mx

^e Universidad Veracruzana, Facultad de Estadística, Universidad Veracruzana. Xalapa, México. Contacto: sejuarez@uv.mx

^f Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático. México. Contacto: oscar.cas.art@gmail.com

^g Universidad de Colima, Centro Universitario de Estudios e Investigaciones de Vulcanología (CUEIV), Colima, México. Correo: raul_arambula@ucol.mx

Resumen: El monitoreo de volcanes que muestran actividad eruptiva de cualquier naturaleza es muy importante para anticipar una erupción inminente y, en consecuencia, alertar oportunamente a las autoridades encargadas de la protección de la población potencialmente expuesta. Sin embargo, los volcanes en estado de quietud o reposo deben monitorearse de igual forma, con una red básica de instrumentos. Las razones para ello son múltiples: 1) conocer la actividad del volcán dormido o en reposo para reconocer eventuales cambios en el mismo que pueden indicar una reactivación; 2) el registro de actividad “secundaria” en medio de fases de actividad como son los procesos de remoción en masa, flujos de lodo o detrito (lahares), derrumbes (caída de rocas), deslizamientos, entre otros; 3) crear consciencia en la población y en autoridades de que la “montaña” es un volcán activo que puede representar un peligro para la población en su cercanía durante un proceso de reactivación y también en cualquier momento (procesos inter-eruptivos); 4) disponer de datos (de años) que permitan caracterizar al volcán. El Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV) está en el proceso de crear un sistema de monitoreo semiautomatizado del volcán Pico de Orizaba, con apoyo del CENAPRED, UNAM-Juriquilla, y otros observatorios de volcanes con más experiencia como el Observatorio Vulcanológico de la Universidad de Colima y Centro de Monitoreo Vulcanológico y Sismológico (CMVS).

Palabras clave: Volcán; monitoreo; inteligencia artificial; red neuronal; algoritmo.

Abstract: *The monitoring of volcanoes, which show eruptive activity of any type, is very important in order to anticipate an imminent eruption and thus be able to notify the authorities in charge of protecting the potentially exposed population. However, dormant volcanoes should be monitored in the same way, albeit with less equipment. The reasons for this are multiple: 1) to know the activity of the dormant or resting volcano in order to be able to recognize possible changes that may indicate a reactivation 2) the record of "secondary" activity in between phases of activity, such as mass movement processes, such as mud or debris flows (lahars), landslides (rock falls), landslides, among others 3) create awareness in the population and in authorities that the "mountain" is an active volcano that can represent a hazard for the population in its vicinity during a reactivation and also at any time (inter-eruptive processes) 4) to have data (over years) that allow characterizing the volcano. The Seismological and Volcanological Observatory of Veracruz (OSV) is in the process of creating a semi-automated monitoring system for Pico de Orizaba volcano, with the support of CENAPRED, UNAM-Juriquilla, and other more experienced volcano observatories such as the Volcanological Observatory of the University of Colima and the Volcanological Monitoring Center and Seismological (CMVS).*

Keywords: *Volcano; Monitoring; Artificial Intelligence; Neuronal Network; Algorithm.*

Introducción

El vulcanismo activo en México se concentra a lo largo del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, cruzando el territorio desde la costa del Pacífico hasta el Golfo de México, en dirección Oeste a Este (**Figura 1**). La condición que origina al vulcanismo activo, se relaciona con el proceso de subducción de las placas Rivera y Cocos debajo de la Norteamericana. En el mundo, la mayoría de los volcanes se concentra justamente cerca de los límites de placas tectónicas, “fragmentos” de la corteza (litósfera) terrestre; aunque también existen algunos en medio de placas tectónicas relacionados con anomalías denominadas “puntos calientes” o “hotspots”.

Mientras continúe el proceso de subducción de las placas oceánicas debajo de la placa Norteamericana, seguirá habiendo erupciones volcánicas en el país. Sin embargo, la actividad volcánica no se distribuye de forma constante en el tiempo y los grandes edificios volcánicos superan por mucho una vida humana, ya que existen durante miles y hasta cientos de miles de años. Como consecuencia, en la conciencia de la población prácticamente no existe una noción del peligro latente relacionado a la mayoría de los volcanes en México. Las erupciones de un volcán muchas veces se concentran o acumulan en ciertos tiempos, intercalados con tiempos de calma o reposo. Por ende, suele ser común que la población perciba a un volcán en reposo como ya extinto o incluso, no tener conocimiento siquiera que se trata de un volcán. Esto va en conjunto con la percepción de que “es más seguro” acercarse a un volcán que lleva ya mucho tiempo inactivo, que a uno que tuvo recientemente una erupción (Smith et al., 2009). Sin embargo, justamente estos volcanes que “despiertan de forma sorpresiva” han causado –y causan– el mayor daño a la población, porque estas erupciones después de largas pausas suelen ser más explosivas. Como comentan Gilbert et al. (1997), de las 16 erupciones de los siglos XIX y XX, 12 de ellas se asocian a volcanes que no habían tenido actividad histórica reconocida. Un ejemplo de una de estas reactivaciones “sorpresivas” que persiste en la memoria de la población es la erupción de 1982 del volcán Chichonal en Chiapas, con cuantiosos daños materiales y pérdidas humanas.

El Pico de Orizaba o Citlaltépetl es un volcán en estado de quietud o reposo, que sí ha tenido erupciones históricas de pequeña magnitud. Sin embargo, a lo largo de su historia eruptiva completa, que se remonta a más de medio millón de años (Carrasco-Núñez, 1997), ha tenido tanto erupciones efusivas, de flujos de lava, como erupciones explosivas de gran magnitud y muy violentas. Así, por ejemplo, hace alrededor de 9,000 años experimentó una erupción Pliniana, la cual es un tipo de erupción volcánica que en la población mundial es reconocida por la erupción del Vesubio en Italia y la consecuente destrucción de la ciudad de Pompeya. Además, en el Citlaltépetl existe evidencia del colapso de domos y de la formación de flujos piroclásticos conocidos como nubes ardientes (*nuées ardentes*), e incluso de colapsos de parte del edificio volcánico, resultando en afectaciones en cientos de kilómetros cuadrados.

Dependiendo de la magnitud de una erupción de un volcán, sería afectada un área menor o mayor alrededor del mismo. En las cercanías del Pico de Orizaba habitan más de un millón de personas, incluyendo las que viven en los pueblos que se ubican sobre las faldas del volcán, en altitudes por encima de los 3,000 m (**Figura 2**).

La manera de evitar de ser “sorprendido” por un volcán dormido o “en reposo” que entra en una nueva fase de actividad, es el monitoreo a largo plazo por especialistas. Por este motivo justamente, la vigilancia de un volcán se debe realizar desde un tiempo considerablemente anterior a que el volcán comience a presentar algún incremento en su actividad, para así reconocer las características de la fase de reposo (actividad base) y con ello detectar eventuales cambios.

Figura 1

Estaciones sísmicas a lo largo del estado de Veracruz, el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) y las ubicaciones de los dos volcanes monitoreados por el OSV (triángulos rojos)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2

El pueblo Jacal en las faldas del volcán Pico de Orizaba a 3,000 metros de altitud sobre el nivel del mar



Foto: Katrin Sieron, 2019

1. Monitoreo volcánico

La reactivación de un volcán, o más bien el inicio de una nueva erupción, se asocia al ascenso de magma (roca fundida) que atraviesa la corteza terrestre –por medio del conducto del aparato volcánico–, hasta llegar a la superficie. Justamente este ascenso de magma a través de roca es parte de lo que puede registrarse con instrumentos sensibles a “vibraciones” en la Tierra: los sismómetros, debido a que el magma ascendente causa la formación de micro-fisuras en la roca durante su transporte.

Los volcanes que se encuentran en fases de reposo se monitorean con menos equipo que aquellos volcanes que ya han entrado en una fase de reactivación; pero un mínimo de tres sensores sísmicos alrededor del edificio estratégicamente distribuidos permite un monitoreo sísmico eficiente.

Los registros de sismicidad que son captados por los instrumentos situados en los flancos del volcán, se envían a un Centro de Monitoreo vía satélite o enlaces de radio, donde tradicionalmente se observan y analizan “en tiempo real” por personal especializado durante las 24 horas del día, a fin de detectar cambios en el volcán que anticipen una erupción inminente. Esta vigilancia solamente se realiza de esta forma en un volcán entrando a una etapa activa. Sin embargo, aún en volcanes en estado de reposo, como el Pico de Orizaba, se deben analizar las señales sísmicas registradas para que, de igual forma, se detecten cambios eventuales y con ello se caracterice la actividad “base” del volcán en cuestión, con el objetivo de discernir e identificar los cambios en dicha actividad.

El monitoreo sísmico se puede acompañar por otras formas de monitoreo como por ejemplo, la detección de cambios en la superficie del edificio volcánico que indiquen una deformación del mismo. Esto se realiza comúnmente con GPS de alta precisión o información satelital. Además, se puede revisar de forma rutinaria el sistema hidrológico del volcán, con especial atención en los manantiales que se originan en sus flancos, ya que hay ciertos elementos químicos que son indicativos de una reactivación. El monitoreo visual a partir de cámaras instaladas en las cercanías del edificio volcánico también es muy importante.

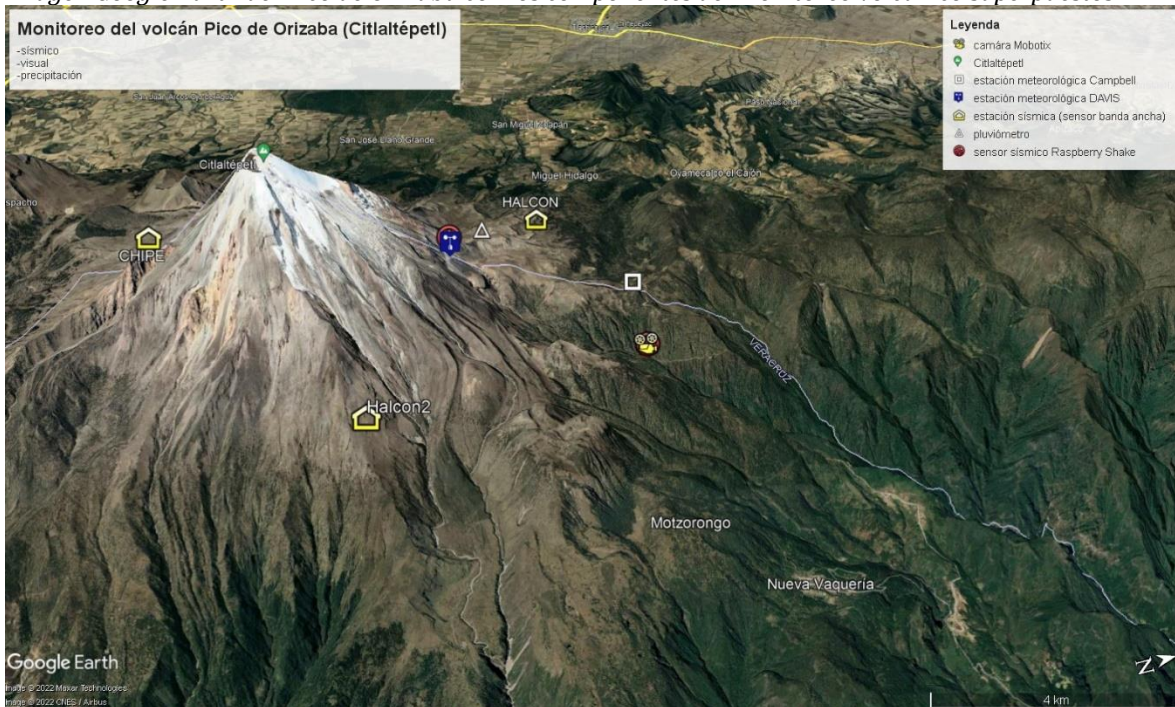
En México, la institución encargada de la supervisión de volcanes es el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Desde que el volcán Popocatepetl ha entrado en una fase de mayor actividad, el CENAPRED ha buscado la colaboración con centros locales de observación de volcanes potencialmente activos, que se localicen próximos al volcán bajo vigilancia. Muchos de ellos residen en universidades. Un observatorio de larga trayectoria en México, y bien establecido, es el del volcán de Colima. Otro, de más reciente creación, es el Centro de Monitoreo Vulcanológico y Sismológico (CMVS) adscrito al Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH). El CMVS es el encargado de monitorear la actividad de los volcanes Tacaná y El Chichón empleando cámaras, sensores sismológicos y a través de monitoreo geoquímico de gases y agua.

El Observatorio Sismológico y Vulcanológico de Veracruz (OSV), de igual forma, se creó recientemente, en el año 2014. La meta es el monitoreo efectivo del Pico de Orizaba y del volcán San Martín Tuxtla (**Figura 2**), en colaboración con el CENAPRED, así como con otros observatorios ya mencionados. En un futuro, se pretende realizar también el monitoreo de los Campos Volcánicos de Los Tuxtlas (CVLT) y de Xalapa (CVX) que tienen un vulcanismo distribuido, es decir, que consisten en concentraciones de volcanes de pequeño volumen en ciertas áreas. Sin embargo, el monitoreo de

estos campos volcánicos requiere un mayor número de sensores o al menos, la puesta en operación de instrumentos de medición en áreas estratégicas previamente establecidas.

Actualmente, se recibe en tiempo real vía radio la señal de una estación sísmica (sismómetro vertical de periodo corto) del Pico de Orizaba ubicada en la cara norte del volcán (POHV). Los datos de otra estación sísmica de banda ancha que se localiza en el flanco sur, Chipec (POC), se reciben por intervalos. Una tercera estación se instalará próximamente en el flanco sureste del volcán con apoyo del Centro de Geociencias de la UNAM (Juriquilla). Además, se lleva a cabo el monitoreo visual con cámaras instaladas en puntos estratégicos (**Figura 3**). Aunado a lo anterior, se monitorean las precipitaciones en la alta montaña que pueden detonar eventos que son independientes de una reactivación del volcán, pero igualmente peligrosos; por ejemplo, los flujos de lodo y de detritos (lahares). En este momento, los datos del monitoreo visual y de precipitación no se reciben “en tiempo real”, pero se está trabajando en su recepción mediante la transmisión a través de un sistema de telemetría.

Figura 3
 Imagen Google Earth del Pico de Orizaba con los componentes del monitoreo volcánico superpuestos



Fuente: Elaboración propia.

2. Inteligencia artificial y redes neuronales y su aplicación en el monitoreo volcánico

El monitoreo volcánico de carácter prioritario en México se concentra en los volcanes que ya muestran actividad eruptiva (como el Popocatépetl y el Colima); estos deben vigilarse de forma permanente para poder anticipar eventos con suficiente antelación y con ello, activar mecanismos de prevención.

En el Pico de Orizaba, la red básica instalada por el CENAPRED, en conjunto con la Universidad Veracruzana, está siendo actualizada y complementada. Sin embargo, existen problemas con la

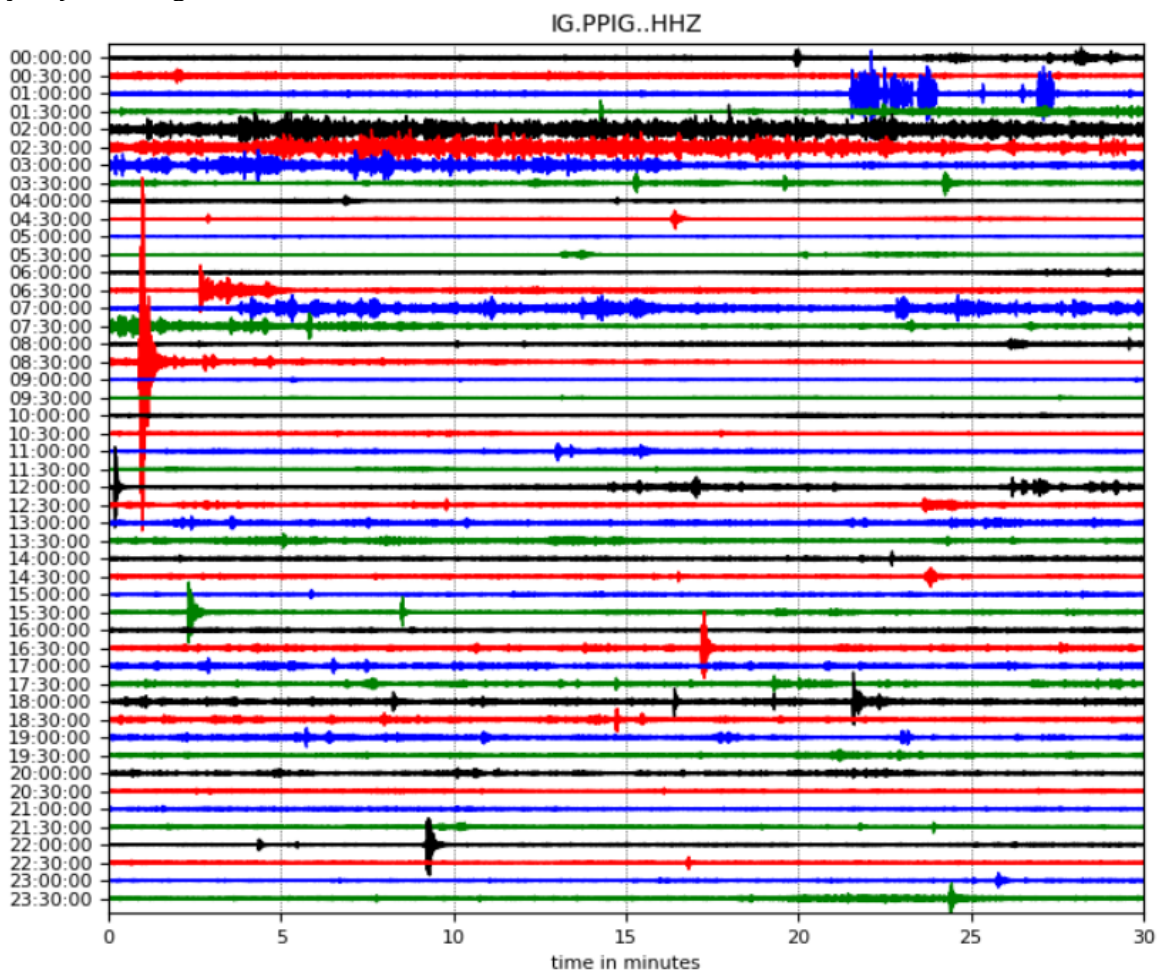
transmisión de datos y no hay personal especializado suficiente para el desarrollo de todas las actividades que implica el monitoreo permanente de volcanes.

La implementación de un monitoreo semiautomático representaría la solución a este problema. La inteligencia artificial puede emplearse para reconocer de forma automática señales sísmicas de diferente origen. En las estaciones de monitoreo que se ubican en volcanes se pueden registrar tanto los eventos sísmicos que se generan en y/o cerca del edificio volcánico, y que por ende se relacionan con la actividad volcánica, como también los eventos sísmicos que se generan a muchos kilómetros de distancia y que se originan por procesos tectónicos. También se registran otros tipos de eventos superficiales que producen vibraciones del suelo por ejemplo, cualquier proceso de remoción en masa como los derrumbes o caída de roca, flujos de lodo, deslizamientos, entre otros.

El ojo entrenado de un especialista en el monitoreo de volcanes, puede distinguir entre todas estas señales y atribuirles a diferentes tipos de eventos (**Figura 4**).

Figura 4

Ejemplo de registro sísmico de una serie eventos

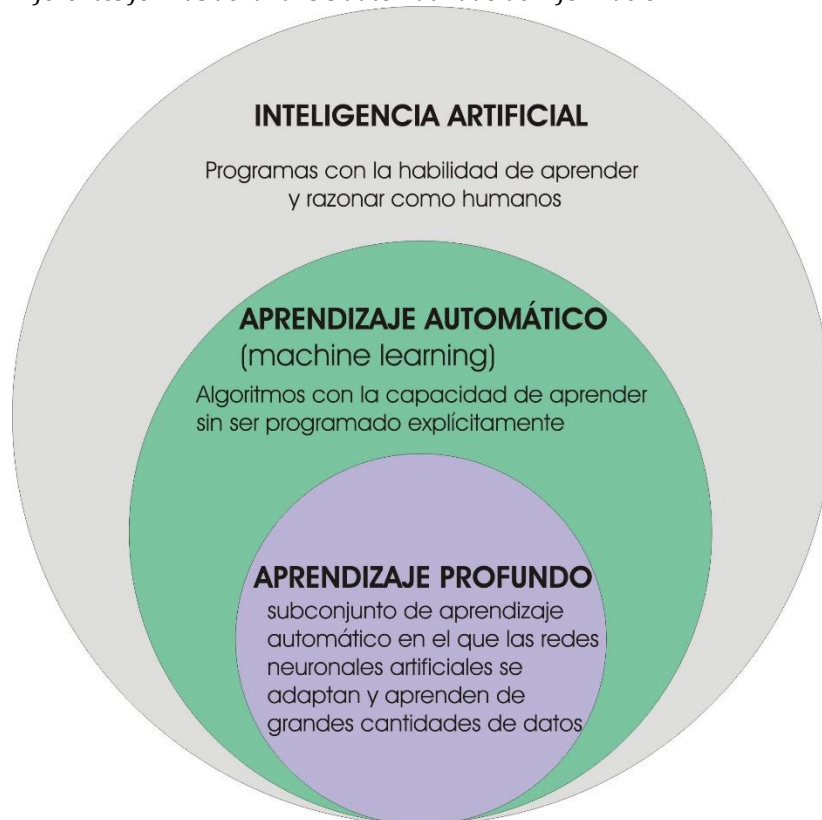


Fuente: Elaboración propia.

La idea de una red neuronal artificial como herramienta de inteligencia artificial para el monitoreo volcánico es realizar justamente esa distinción entre eventos a partir de los registros sísmicos.

Como introducción al tema de la inteligencia artificial, se puede distinguir entre Inteligencia Artificial (IA), aprendizaje automático y aprendizaje profundo (**Figura 5**). La IA se refiere a sistemas (o máquinas) que imitan la inteligencia humana para realizar tareas y pueden mejorar iterativamente a partir de la información que recopilan. El aprendizaje automatizado o aprendizaje máquina es una parte de la inteligencia artificial y refiere a todos los sistemas o máquinas que pueden aprender de manera automática y autónoma. Finalmente, el aprendizaje profundo es una sub-rama del aprendizaje automático que emplea redes neuronales artificiales (ANN, pos sus siglas en inglés) con una arquitectura compleja que permite aprender a profundidad grandes cantidad de datos.

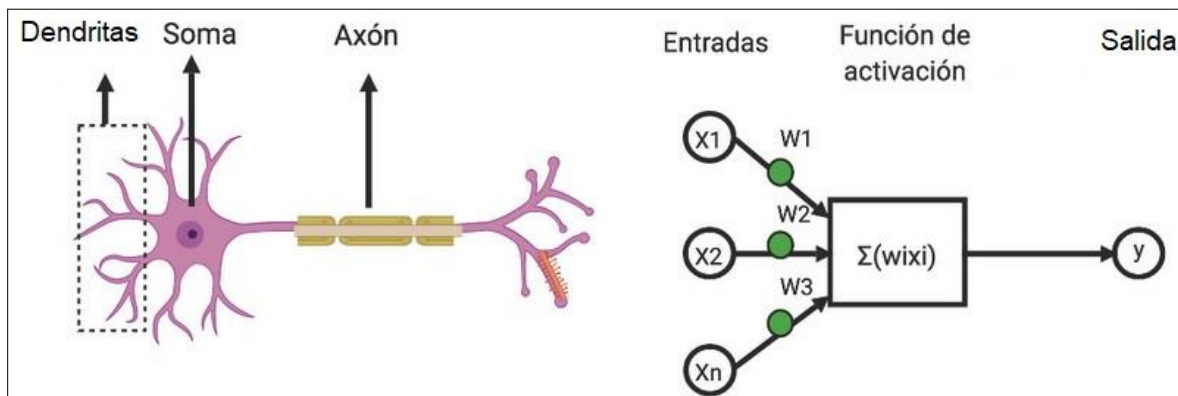
Figura 5
 Diferentes formas del análisis automatizado de información



Nota: Modificado de la fuente:
<https://www.pngwing.com/es/free-png-tgvpc>

Las redes neuronales artificiales recibieron este nombre porque su estructura asemeja la red neuronal de los humanos. Los “nodos” de la red artificial corresponderían a las neuronas del cerebro humano (**Figura 6**). Tanto las neuronas, como los nodos, son conectados entre sí y transmiten información (señales). De igual forma, hay una entrada de estas señales y una salida en ambos.

Figura 6
 Comparación entre una red neuronal natural y artificial



Fuente: Ulises García,
<https://futurelab.mx/redes%20neuronales/inteligencia%20artificial/2019/06/25/intro-a-redes-neuronales-pt-1> 25-06-2019

Un nodo determinado toma la suma ponderada de sus entradas y la hace pasar por una función de activación no lineal. Esta es la salida del nodo, que se convierte en la entrada de otro nodo en la siguiente capa. La señal fluye de izquierda a derecha y la salida final se calcula realizando este procedimiento para todos los nodos. Entrenar esta red neuronal significa aprender los pesos asociados a todas las aristas que unen los nodos. La arquitectura de las redes neuronales artificiales se construye al definir la estructura de las capas de las neuronas que las conforman, así como todos los parámetros relacionados al funcionamiento de la misma.

Las redes neuronales artificiales pueden confeccionarse mediante cualquier lenguaje de programación existente, considerando que, para un correcto funcionamiento con grandes bases de datos, el algoritmo debe ser optimizado mediante el cómputo en paralelo, preferentemente con tarjetas gráficas.

Después de su construcción, las redes neuronales artificiales se “entrenan”, alimentándolas con datos previamente clasificados por el humano (mediante un proceso exhaustivo de ensayo y error). Este proceso se repite tantas veces hasta que la red obtenga resultados aceptables. En la práctica, se detiene el código cuando la precisión de la ANN ha alcanzado un nivel confiable respecto a la función de costos y métricas asociadas; o bien, que se busca que la función de costos alcance un cierto valor que minimice el error. Después se alimenta con los datos a analizar. La eficiencia de la ANN habrá de verificarse mediante predicciones realizadas con datos que no conoce. Para esto, los resultados se analizarán mediante métricas que establezcan la precisión de las predicciones realizadas.

3. Primeros resultados

En el caso de monitoreo del volcán Pico de Orizaba, se ha avanzado en la construcción de una ANN que pueda alimentarse con trazas sísmicas (como en la **Figura 4**) que corresponden a los eventos sísmicos de interés (que provienen del volcán Pico de Orizaba mismo).

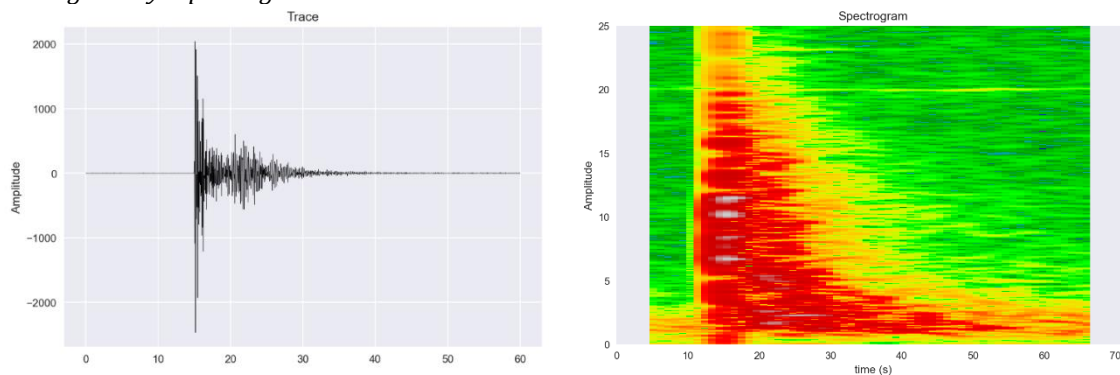
Las series de tiempo o trazas correspondientes a estos eventos pasan por proceso de remoción para eliminar la media y la tendencia, quedando presente el contenido de frecuencias de interés. Posteriormente se les aplica un algoritmo de detección STA/LTA, a través del cual se recorta el segmento de la serie de tiempo en el cual se encuentra un evento registrado. Estos eventos conforman la base de datos sobre la que aplica la ANN.

La ANN construida se entrenó primeramente con datos del volcán Popocatepetl (estación de banda ancha PPIG del Servicio Sismológico Nacional; SSN, 2022). Después de que la tasa de una identificación positiva de la red alcanzara nivel aceptable, esta misma ANN se está alimentando de datos propios del Pico de Orizaba. Una vez funcional, la ANN se complementará con otra basada en el análisis de los espectrogramas de estos mismos eventos (**Figura 7**).

Una vez que la transmisión en tiempo real de datos del volcán opere adecuadamente, estos datos llegarán directo a la red neuronal para que se realice una primera clasificación del tipo de evento que ocurre en ese mismo momento en el Pico de Orizaba. De igual forma, se puede adaptar un sistema que alerte a los especialistas en el caso de un cambio significativo en el tipo o la frecuencia de la actividad sísmica del volcán.

Figura 7

Sismograma y espectrograma de un evento vulcano-tectónico en el Pico de Orizaba



Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

Herramientas modernas, como son la IA y las ANN aplicadas al monitoreo volcánico, permiten un monitoreo semiautomático de bajo costo y alta eficiencia en el desarrollo de las actividades rutinarias de los observatorios vulcanológicos, particularmente en el caso de aquellos de reciente creación donde el personal especializado no es suficiente para realizar el seguimiento puntual de la actividad presente en un volcán. El beneficio de un sistema de estas características tiene un impacto evidente sobre la población civil y en el estudio y caracterización de volcanes activos.

Referencias

- Carrasco-Núñez, G.** (1997). Lava flow growth inferred from morphometric parameters: a case study of Citlaltépetl volcano, Mexico. *Geological Magazine*, 134(2), 151-162.
- Gilbert, J.** (1997). Simkin, T. & Siebert, L. 1994. Volcanoes of the World, xi+ 349 pp. Tucson: Geoscience Press for the Smithsonian Institution. *Geological Magazine*, 134(1), 121-142.
- Smith, J.G., Dehn, J., Hoblitt, R.P., LaHusen, R.G., Lowenstern, J.B., Moran, S.C., McClelland, L., McGee, K.A., Nathenson, M., Okubo, P.G., Pallister, J.S., Poland, M.P., Power, J.A., Schneider, D.J., and Sisson, T.W.,** 2009, Volcano monitoring, in Young, R., and Norby, L., Geological Monitoring: Boulder, Colorado, Geological Society of America, p. 273–305, doi:10.1130/2009.monitoring(12).
- SSN (2022):** Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Servicio Sismológico Nacional, México. Dirección electrónica: <http://www.ssn.unam.mx>