

Diseño de un sistema de procesamiento de imágenes hiperespectrales SPIH-X, para determinar el tipo de actividad volcánica del Popocatepetl: Carga útil del CubeSat “Gxiba”

Héctor S. Vargas Martínez, Alvaro U. Bravo Rosales, Charles Galindo Jr, José Francisco Romero Aguilar

Facultad de Electrónica, Decanato de Ingenierías UPAEP, 21 Sur 1103 CP-72410, Puebla, Pue., México,
[\[hectorsimon.vargas,charles.galindojr,josefrancisco.romero,alvaroulises.bravo\]@upaep.edu.mx](mailto:{hectorsimon.vargas,charles.galindojr,josefrancisco.romero,alvaroulises.bravo}@upaep.edu.mx)

Resumen

Los dos elementos que integrarán la carga útil del CubeSat Gxiba son: una cámara hiperespectral y la capacidad de procesamiento de imágenes para determinar el tipo de actividad volcánica del Popocatepetl o de cualquier otro volcán. En el presente trabajo se describe el diseño de un sistema de procesamiento de imágenes hiperespectrales, en el cual se utilizan varias herramientas o algoritmos de imágenes, aprendizaje de máquinas y ciencia de datos, para determinar el tipo de actividad volcánica del Popocatepetl. El diseño del sistema SPIH-X consiste en tres partes principales: 1. análisis de datos o imágenes hiperespectrales, 2. segmentación o agrupamiento de imágenes en las regiones del espectro de acuerdo al tipo de molécula ubicada en una franja del espectro, y 3. clasificación de los grupos generados que determinarán la actividad volcánica, los cuales estarán en tres clases que corresponderán al semáforo de alerta volcánica propuesto por CENAPRED. El sistema de procesamiento SPIH-X estará en el CubeSat “Gxiba”, antes de su puesta en órbita se entrenará con un conjunto de imágenes hiperespectrales obtenidas de diferentes satélites y bases de datos públicas y privadas, después de su liberación en su órbita correspondiente el SPIH-X enviará a tierra el reporte del tipo de actividad volcánica observada, y este resultado será agregado en una base de datos ampliada (datos generados por CENAPRED y MEVA-UPAEP) y se realiza el procesamiento correspondiente de ciencia de datos para obtener un resultado que será evaluado por CENAPRED y decidir cómo cambiará el semáforo de alerta volcánica. Cabe resaltar que el proyecto está en el marco de los Programas Nacionales Estratégicos del CONACYT, representa una contribución al área de “Agentes tóxicos y procesos contaminantes” debido al carácter de identificación y cuantificación de gases emitidos por el volcán Popocatepetl.

Keywords: Imagen Hiperespectral, actividad volcánica, satélite Gxiba, redes neuronales convolucionales.

Índice

1.	Introducción	1
2.	Planteamiento y Justificación	2
2.1.	Planteamiento	2
2.2.	Justificación.....	2
2.3.	Objetivos	3
3.	Desarrollo de Software	3
3.1.	Metodología	3
3.2.	Ciclo de Vida.....	3
3.3.	Herramientas de Desarrollo.....	4
3.4.	Origen de Datos	4
4.	Diseño	4
4.1.	Arquitectura.....	4
4.2.	Desarrollo y evolución	6
5.	Pruebas	6
5.1.	Plan de pruebas.....	6
5.2.	Diseño de casos de prueba	6
6.	Conclusiones	7
7.	Referencias	7

1. Introducción

La misión Gxiba da seguimiento al programa de desarrollo de aplicaciones satelitales de la UPAEP,

posterior a la primera misión en la cual participó la institución, el AzTechSat-1. Este se trata de un CubeSat soportado por la AEM, la NASA, CONACYT, CONCYTEP y UPAEP como proyecto universitario, desarrollado y construido en esta última y liberado desde la Estación Espacial Internacional en febrero de 2020, completando exitosamente su misión de comunicarse con la constelación de satélites de Globalstar para mejorar el tránsito de datos hacia tierra (Vargas y otros, 2020)

Dado que en México existe una necesidad de monitoreo constante de la situación de los volcanes en el territorio nacional, y especialmente del Popocatepetl, se plantea la idea de desarrollar la capacidad de monitoreo de la actividad volcánica, utilizando imágenes satelitales hiperespectrales, lo cual permite obtener información de los compuestos moleculares contenidos en exhalaciones volcánicas. El uso de dichas imágenes, presenta un reto debido a que los tiempos de comunicación entre la estación terrestre y el satélite se encuentran limitados, por lo que se propone reducir el volumen de información a transmitir mediante la realización del procesamiento de imágenes requerido para la identificación y estimación del volumen presente en las exhalaciones, así como la

identificación del tipo de actividad volcánica presentada, directamente en la computadora de a bordo del satélite mediante el uso de herramientas de aprendizaje automático, en las siguientes páginas se describen los módulos, su funcionamiento y la arquitectura propuesta, así como las herramientas propuestas para la implementación y gestión del proyecto, pero también, para el aseguramiento de calidad de las partes individuales y su funcionamiento en conjunto.

2. Planteamiento y Justificación

Es de gran importancia para la sociedad el monitoreo constante de la situación de riesgo frente a desastres naturales. En el caso de México, la actividad sísmica y volcánica ha presentado históricamente un riesgo latente a los habitantes de ciertas regiones del país. Debido a esto existe una labor permanente por parte de entidades gubernamentales y civiles que permita prevenir pérdidas humanas y materiales ocasionadas por los desastres naturales que se presentan en el país. El presente trabajo describe el desarrollo de una herramienta que facilite la labor de estas organizaciones.

2.1. Planteamiento

México es un país rico en actividad volcánica, mayoritariamente causada por la interacción entre las placas tectónicas de Rivera y Cocos y la Placa Norteamericana. Se estima que existen más de 2000 volcanes distribuidos en toda la República Mexicana, la mayoría ubicados en la Faja Volcánica Mexicana (de la Cruz Reyna, 2021). Una de las estructuras volcánicas de mayor interés en el país es el Popocatepetl, ubicado en los límites de los estados de Puebla, México y Morelos. A partir de su explosión el 21 de diciembre de 1994, después de 67 años de inactividad, el volcán se ha encontrado activo constantemente, llegando a presentar más de 100 exhalaciones de baja intensidad diariamente, por lo que su monitoreo y estudio resulta de interés para la comunidad científica. (Ramos Aguilar, y otros, 2018), así como sociedad en general, debido a las poblaciones que se encuentran en zonas de riesgo ante la erupción del volcán (Mendoza Rosas & De la Cruz Reyna, 2019). De acuerdo con el último censo nacional realizado en 2020, se contabilizan 34.757 millones de habitantes distribuidos entre los estados de Puebla, México, Ciudad de México y Morelos, (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) quienes se encuentran mayoritariamente en la zona de riesgo bajo ante actividad del Popocatepetl. Sin embargo, un estimado de 80,000 personas habita en zonas de alto riesgo y cerca de un millón de personas en zonas de riesgo moderado (Mendoza Rosas & De la Cruz Reyna, 2019).

Existe un trabajo permanente de monitoreo del volcán por parte del Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED], incluyendo información del número de exhalaciones diarias, sismos volcanotectónicos, temores y explosiones (2021). Asimismo, hay esfuerzos de

estudio del volcán por otras instituciones e individuos, principalmente de sus exhalaciones. Por ejemplo: Ramos-Agilar y otros (2018) utilizaron fotografías satelitales y videos de monitoreo del Popocatepetl para categorizar los tipos de fumarola, su orientación y altura durante 2016; y Taquet y otros (2019) estudiaron la variabilidad en la composición de gases de las exhalaciones de forma remota, utilizando espectrómetros FTIR entre 2012 y 2016, para identificar diferentes ratios moleculares.

Por otra parte, se han utilizado hiper-espectrómetros para realizar mediciones remotas de contenidos moleculares en exhalaciones de volcanes como el MT Etna en Italia (Huret, y otros, 2019), facilitando la documentación y análisis de los procesos volcánicos. Mientras que, en aplicaciones satelitales, la espectrometría fue utilizada para la medición de gases atmosféricos desde el espacio por primera vez en 1983 (Timofeeva, y otros, 2020). Siendo actualmente utilizadas cámaras hiperespectrales aplicadas para esta misma labor; por ejemplo, para el monitoreo de regiones polares en un amplio número de bandas mediante el uso de nano-satélites (Piro, y otros, 2017). Sin embargo, el aumento en la capacidad de captación de información por parte de cámaras hiperespectrales, ha traído consigo otro tipo de retos, debido a las limitaciones en la capacidad de descarga de información desde el satélite.

2.2. Justificación

En el marco de los Programas Nacionales Estratégicos del CONACYT, el presente proyecto representa una contribución al área de “Agentes tóxicos y procesos contaminantes” debido al desarrollo de la capacidad de identificación y cuantificación de gases emitidos por el exhalaciones y erupciones volcánicas, entre los cuales se encuentran HF (ácido fluorhídrico), HCl (ácido clorhídrico), SO₂ (dióxido de azufre), SiF₄ (tetrafluoruro de silicio) y HBr (ácido bromhídrico) (Taquet, y otros, 2019). Aunque el riesgo de contacto directo con estos gases es mínimo, su interacción con el ambiente puede contribuir a la presencia de lluvia ácida, la cual puede ocasionar irritación en la piel y contaminación de fuentes de agua y alimentos, representando un riesgo de intoxicación para humanos y animales (Narváez Porras & Cano Valle, 2004).

Por otra parte, presenta una aportación al área de “Seguridad humana” debido a su contribución a la protección civil frente a desastres naturales gracias al desarrollo de una herramienta que contribuya a la identificación temprana de riesgos para la población por parte de expertos del CENAPRED, pudiendo permitir la asistencia en la prevención de pérdidas humanas y materiales ocasionadas por explosiones y exhalaciones del volcán.

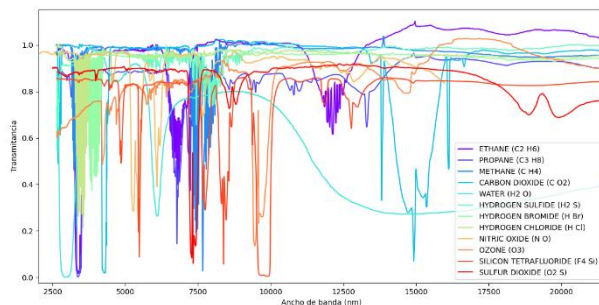


Figura 1: Transmitancia en el Infrarrojo de gases presentes en atmosfera y exhalaciones volcánicas

Finalmente, resulta de suma importancia entender la complejidad que presenta el análisis de imágenes hiperespectrales para identificar gases presentes en las exhalaciones volcánicas mediante métodos de segmentación de imágenes tradicionales. Tal como puede observarse en la Figura 1, la interacción que ocurre entre los diversos gases presentes tanto atmosféricos, como aquellos originados en exhalaciones volcánicas, no ocurre en bandas independientes, sino que diversos compuestos interactúan en las mismas regiones del espectro. Debido a esto, la segmentación de imágenes hiperespectrales de acuerdo con los gases identificados por métodos tradicionales resultaría sumamente complicado. Por lo que el uso de algoritmos de aprendizaje, tal como redes neuronales convolucionales, representa una herramienta para simplificar el proceso de segmentación de imágenes. De manera similar, el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la clasificación del tipo de actividad volcánica puede llegar a permitir identificar patrones no aparentes mediante el uso de métodos tradicionales, en la actividad del Popocatepetl.

2.3. Objetivos

El objetivo central del proyecto consiste en desarrollar la capacidad de determinar el tipo de actividad volcánica presentada por el Popocatepetl y su nivel de riesgo mediante el análisis de imágenes hiperespectrales. Para esto, es necesario en primer lugar encontrar los mejores algoritmos de aprendizaje automático para llevar a cabo cada uno de los procesos requeridos por el proyecto: identificación de moléculas en el espectro electromagnético, segmentación de imágenes hiperespectrales, y clasificación del tipo de actividad volcánica presentada por el volcán de acuerdo con la información obtenida del proceso de segmentación.

3. Desarrollo de Software

Para poder cumplir con los objetivos planteados, es necesario desarrollar los diferentes módulos que constituirán el proyecto y permitan cumplir con cada uno de los requisitos específicos de la misión. Para ello es necesario primero establecer metodologías y ciclos de

vida, seleccionar las herramientas adecuadas para el desarrollo y obtener los datos necesarios para garantizar el éxito de la misión.

3.1. Metodología

El presente trabajo presenta la integración de diversos campos del conocimiento, entre ellos cabe resaltar, la utilización de técnicas de Ciencia de Datos e Ingeniería de Software. Por dicha razón es necesario hacer uso de metodologías que permitan integrar estas áreas, así como también, faciliten un desarrollo rápido y admitan cambios en los requisitos y necesidades del software. Por todo esto, se hará uso de una ágil, en este caso KDD, la cual consiste en llevar a cabo los procesos de selección, preprocesamiento, transformación, minado de datos, interpretación y evaluación para obtener la información necesaria en cada uno de los pasos del proyecto. (Azevedo y Santos, 2008).



Figura 2: Metodología KDD

El uso de esta metodología permite desarrollar las herramientas requeridas para llevar a cabo las tareas objetivo del proyecto, ya que admite entrenar algoritmos de aprendizaje automático de manera estructurada, repitiendo los procesos desde cualquier del modelo que se considere necesario de acuerdo con las conclusiones encontradas al final de cada iteración.

3.2. Ciclo de Vida

Como parte del proyecto de lanzamiento del satélite Gxiba, el presente sub-proyecto se encuentra enfocado en el desarrollo del software necesario para cumplir con las tareas de la misión orientadas al monitoreo de la actividad volcánica del Popocatepetl. Debido a su importancia para la misión, resulta crítico el desarrollo de las capacidades de segmentación de imágenes hiperespectrales del volcán y la clasificación de actividad volcánica para garantizar la posibilidad de llevar a cabo exitosamente la misión.

Para el desarrollo del software, se utilizará por lo tanto un ciclo de vida del modelo-V (Fosberg y Mooz, 1998), debido a la facilidad de iteración que otorga el modelo en las diferentes etapas de desarrollo, permitiendo entregar como producto final software que cumpla con los requisitos definidos inicialmente, y permitir desarrollar nuevas capacidades en iteraciones siguientes una vez que nuevos requerimientos sean encontrados durante la misión del satélite Gxiba.



Figura 3: Modelo en V

3.3. Herramientas de Desarrollo

La plataforma principal utilizada para el desarrollo del proyecto se tratará de GitHub, por la facilidad de integrar y gestionar código desarrollado por terceros en desarrollos propios, por las herramientas internas de gestión de proyectos de desarrollo del software tales como gestión de cambios y versiones, por la capacidad de acceso al software desde cualquier lugar y la facilidad de contribución de cambios, pero también por la capacidad de integración con un gran número de herramientas externas.

Para el desarrollo del proyecto se utilizará el sistema operativo Ubuntu 20.04 LTS debido a que se trata de la última versión de soporte a largo plazo de Ubuntu y presenta diversas ventajas para el desarrollo de software frente a sistemas operativos no basados en Linux. Existe también la posibilidad de utilizar Windows 11 para realizar ciertas tareas en software diseñado para Windows, que resulten más sencillas de este modo.

El lenguaje de programación primario se trata de Python, debido a la existencia de librerías ampliamente documentadas de análisis de imágenes hiperespectrales (Spectral Python), Ciencia de datos (ScyPy), Aprendizaje automático (TensorFlow) y otras herramientas nativas que facilitan el acceso a archivos y bases de datos de manera eficiente. De igual manera, se utilizará SQL para en conjunto con una base de datos MySQL almacenar resultados y facilitar el acceso a estos.

Finalmente, se utilizará Atom y Visual Studio Community 2019 como entorno de desarrollo debido al gran número de herramientas disponibles para la gestión de software y su integración directa con GitHub.

3.4. Origen de Datos

Adicional a la base de datos MySQL que utilizará el software para almacenar resultados tal como se menciona en el punto 3.3; gracias al convenio con la AEM-Atacomulco, será posible aprovechar las instalaciones del laboratorio de procesamiento de imágenes y observación de la tierra de esta institución. Asimismo,

gracias a este convenio, es posible tener acceso a las imágenes satelitales hiperespectrales del Popocatepetl obtenidas por la Agencia Espacial Mexicana. Por otra parte, en la UPAEP se generará un servidor que permita almacenar tanto imágenes hiperespectrales obtenidas de repositorios públicos (por ejemplo, EarthExplorer del USGS), como también aquellas imágenes obtenidas del pre-procesamiento. Finalmente, se considera la capacidad de acceder al servidor de resultados del monitoreo del Popocatepetl.

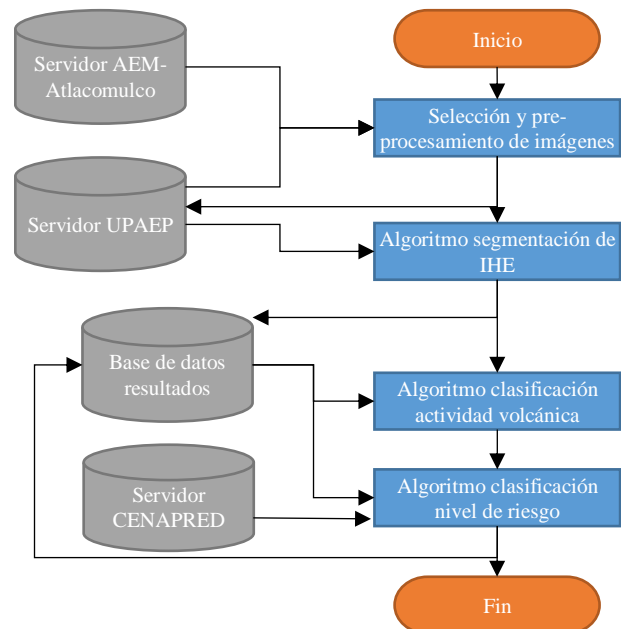


Figura 4: Diagrama de flujo de secciones del proyecto y requisitos de acceso a servidores y bases de datos

4. Diseño

El presente proyecto considera la necesidad de crear diversos modelos y estructuras que permitan la resolver las necesidades individuales de cada una de las etapas del proyecto, así como acceder de manera secuencial a dichos modelos y utilizar sus resultados para alimentar etapas posteriores del proceso. A continuación, se describe la arquitectura inicialmente definida para cumplir con los requisitos establecidos.

4.1. Arquitectura

Dado que la fuente de datos primaria para clasificar el tipo de actividad volcánica y su nivel de riesgo se trata de imágenes hiperespectrales, cuyas características de formato cambian significativamente dependiendo de la misión que generó los datos y del formato utilizado para su almacenamiento, es necesario en primer lugar, llevar a cabo un proceso de normalización de las imágenes y de extracción de características tal como se puede observar en la **Figura 5**, una vez que se cuenta con una base de

datos de imágenes normalizadas, es posible entonces utilizar estas para entrenar una CNN que permita segmentar las imágenes hiperespectrales, tal como se muestra en la **Figura 6**, de esta manera pudiendo identificar y cuantificar las concentraciones de gases emitidas por el volcán.

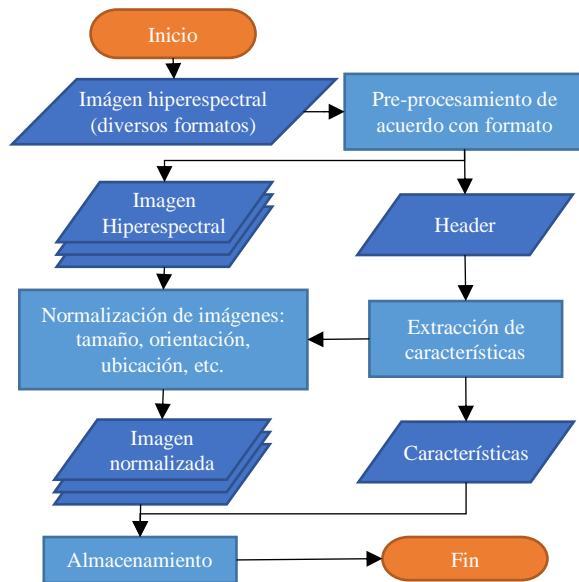


Figura 5: Diagrama de flujo pre-procesamiento de imágenes

Una vez que se ha extraído esta información de las imágenes hiperespectrales, es entonces posible utilizar estos datos para detectar patrones y generar una clasificación de la actividad volcánica presentada por el Popocatepetl. En la **Figura 7**, es posible observar el procesamiento de entrenamiento y evaluación de dicho modelo. Finalmente, al utilizar la información obtenida en los procesos anteriores en conjunto con el conjunto de datos de mediciones en estaciones de monitoreo del volcán y del semáforo de riesgo del CENAPRED, es posible entrenar un algoritmo de aprendizaje automático capaz de clasificar la actividad volcánica en función al riesgo que representa el volcán tal como se muestra en la **Figura 8**.

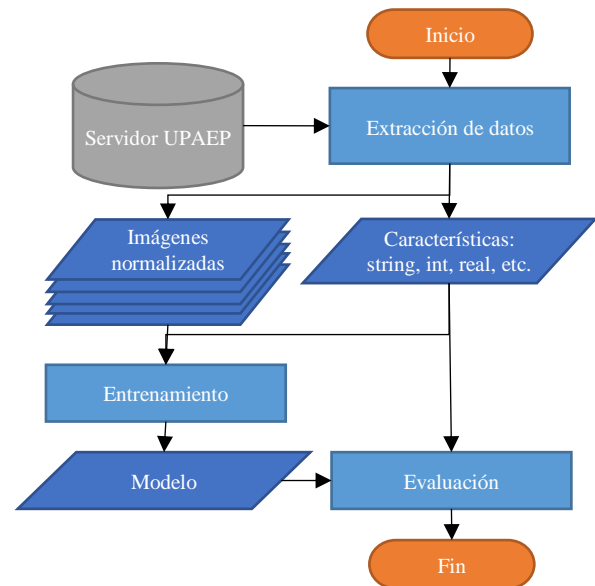


Figura 6: Diagrama de flujo obtención de un modelo para segmentación de Imágenes Hiperespectrales

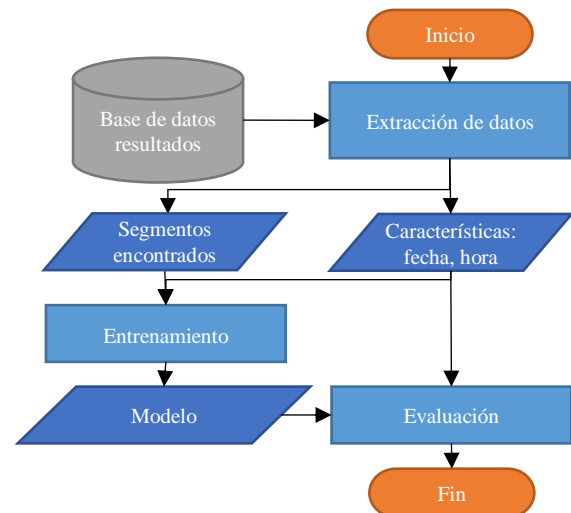


Figura 7: Diagrama de flujo obtención de un modelo para clasificación de actividad volcánica

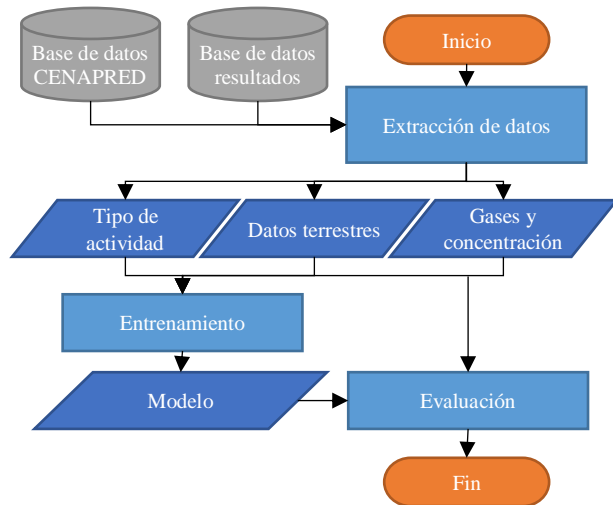


Figura 8: Diagrama de flujo de obtención de un modelo para clasificación de nivel de riesgo

4.2. Desarrollo y evolución

El proceso de gestión de versiones y validaciones de calidad del software está sometido a las iteraciones del modelo en V. Por dicha razón cada versión está sometida al cumplimiento de los requisitos definidos en cada repetición del modelo. El diseño propuesto en el presente está sometido a un conjunto de requisitos limitado al conocimiento actual de la misión de lanzamiento del satélite Gxiba, que permita la clasificación de actividad volcánica del Popocatepetl directamente en la computadora de abordo para reducir la cantidad de descarga de información desde el satélite, permitiendo el monitoreo del nivel de riesgo presentado por el volcán en el momento de la medición con un mínimo de datos. Dicho esto, cada versión de software incluirá los nuevos requisitos definidos por el avance de la misión.

5. Pruebas

Debido a la imposibilidad de realizar cambios en el hardware y arquitectura del satélite una vez que la misión haya sido lanzada; y el riesgo de incapacitar el satélite debido pérdidas de energía y de comunicación durante la realización de cambios en el firmware y software del satélite, resulta crítico asegurar el correcto funcionamiento a lo largo de las etapas de desarrollo y aseguramiento de calidad del proyecto.

5.1. Plan de pruebas

La primera parte del plan de pruebas consiste en las **pruebas unitarias**, enfocadas en garantizar el correcto funcionamiento y cumplimiento de las especificaciones del proyecto. Los módulos que estarán sometidos a estas pruebas son los que se encuentran propuestos en la sección 4.1 y el proceso de prueba se llevará a cabo por el equipo de desarrollo del software. Cada módulo cuenta con requerimientos específicos a cumplir para garantizar

el éxito de la misión. Por ejemplo, durante la etapa de pre-procesamiento de imágenes, este módulo deberá de poder cumplir con las siguientes especificaciones:

- Capacidad de manipular archivos (abrir, escribir, cerrar).
- Capacidad de identificar correctamente el formato de archivos de imágenes hiperespectrales.
- De acuerdo con el formato identificado, extraer la información de headers e imágenes correspondientes.
- Identificar errores en la información durante el proceso de extracción.
- Publicar los resultados para su utilización en otros módulos.

Debido a que el presente proyecto involucra diversos módulos de aplicación de algoritmos de aprendizaje automático, las pruebas unitarias incluyen la comparación del rendimiento entre arquitecturas y parámetros para la selección de un modelo que cumpla con las especificaciones de cada sección.

Posterior al proceso de prueba de los módulos individuales, es crítico garantizar la comunicación y correcto funcionamiento de estos en conjunto. Para ello durante el proceso de **pruebas de integración**, se asegurará la capacidad de los módulos de publicar y acceder a los datos requeridos para su correcto funcionamiento, así como manejar y responder correctamente a posibles fallas y permitir reestablecerse automáticamente. Esta etapa de pruebas se llevará a cabo entre el equipo de desarrollo de software y el de aseguramiento de calidad de la misión.

Posteriormente, durante la etapa de **pruebas de misión**, realizada por el equipo de aseguramiento de calidad, se probará el funcionamiento total del equipo una vez que se ha integrado completamente en el CubeSat y finalmente, el desarrollo de **pruebas de ambiente**, someterá al CubeSat a situaciones ambientales similares a las cuales puede encontrarse durante el tiempo de vida de la misión, tales como análisis de estrés mecánico frente a las fuerzas G y vibraciones presentes en el lanzamiento, cambios de temperatura, vacío, entre otros, para garantizar el funcionamiento posterior al lanzamiento y durante su operación a lo largo del tiempo de vida esperado del satélite. Estas últimas dos etapas de pruebas se llevarán a cabo en conjunto entre el área de aseguramiento de calidad del satélite y agentes especializados externos.

De acuerdo con los resultados encontrados en cada una de las etapas de pruebas, es posible continuar a etapas posteriores o regresar a las etapas de diseño y desarrollo de acuerdo con el modelo V descrito en la sección 3.2 - **Ciclo de Vida**.

5.2. Diseño de casos de prueba

Para poder asegurar el cumplimiento de las especificaciones descritas en el punto anterior, el software deberá someterse a diversos casos específicos a cada una de las áreas del plan de pruebas. Tanto las pruebas unitarias, como las de integración pueden realizarse utilizando datos de imágenes hiperspectrales obtenidas de diversos satélites de observación de la tierra y/o datos históricos del CENAPRED. Para las pruebas de misión y de ambiente, resulta importante comprobar el correcto funcionamiento e integración del Software y Hardware, para lo cual será necesario obtener imágenes hiperspectrales directamente con la cámara de abordo o generar datos y simular su conexión para la realización de dichas pruebas.

6. Conclusiones

Hasta el momento ha sido posible validar que existe la infraestructura, herramientas y datos suficientes para desarrollar la capacidad de monitoreo del Popocatepetl mediante imágenes satelitales hiperspectrales y clasificar el tipo de actividad volcánica mediante su análisis. La implementación de este proyecto representa la posibilidad de facilitar la labor de prevención de pérdidas humanas y materiales realizada por el CENAPRED y de continuar desarrollando en el país la capacidad de desarrollo de aplicaciones satelitales y de aplicaciones de ciencia de datos, tal como el uso de algoritmos de aprendizaje automático como redes neuronales, para resolver problemas de alta complejidad de análisis de información.

7. Referencias

- Vargas, H., Martínez, A., Rodríguez, L., Limón, M., Flores, J. (2020). Plataforma Híbrida de Software de Vuelo para Satélites Pequeños, caso de éxito “AzTechSat-1”. Congreso Nacional de Actividades Espaciales 2020.
- O'Reagan, G. (2017). Concise Guide to Software Engineering. Springer.
- Forsperg, K., Mooz, H. (1996). The Relationship of System Engineering to the Project Cycle. Center for Systems Management.
- Azevedo, A., & Santos, M. F. (2008). KDD, SEMMA AND CRISP-DM: A PARALLEL OVERVIEW. IADS-DM. Obtenido de <https://bit.ly/2WcCjvn>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (22 de Junio de 2021). Reporte del monitoreo de CENAPRED al volcán Popocatepetl. Recuperado el 2021 de Junio de 22, de CENAPRED: <https://bit.ly/2SogUh8>
- de la Cruz Reyna, S. (2021). Volcanes: Peligro y Riesgo Volcánico en México (1 ed.). Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Obtenido de <https://bit.ly/3xAwsNu>
- Huret, N., Segonne, C., Payan, S., Salerno, G., Catoire, V., Ferrec, Y., Caltabiano, T. (2019). Infrared Hyperspectral and Ultraviolet Remote Measurements of Volcanic Gas Plume at MT Etna during IMAGETNA Campaign. Remote Sensing, 11(1175), 1-23. doi:10.3390/rs1101175
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (s.f.). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado el 21 de 06 de 2021, de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Mendoza Rosas, A., & De la Cruz Reyna, S. (2019). Hazard assessment of the ongoing lava dome eruption at Popocatepetl volcano from the statistical analysis of significant explosive events in the period of 1997 to 2016. Geofísica Internacional, 58(1), 33-48. Obtenido de <https://bit.ly/3vMRDdZ>
- Narváez Porras, O., & Cano Valle, F. (2004). Cenizas volcánicas: Contaminación ambiental. Revista del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias, 17(3), 232-238. Obtenido de <https://bit.ly/3qS8Thf>
- Piro, A., Casella, D., Di Ciolo, L., Pinori, S., Cappelletti, C., Battistini, S., & Graziani, F. (2017). HYBRIS: An Earth Observation Hyperspectral CubeSat Mission in Synergy with ESA Sentinels Missions. ResearchNet, 07(2), 200-215. Obtenido de <https://bit.ly/2TEBn1n>
- Ramos Aguilar, R., Máximo Romero, P., Sánchez Hernández, A., Vázquez García, M. C., Martínez Ortiz, A. G., Reyes Parada, M., . . . Benítez Ramírez, D. M. (2018). Seguimiento fotogramétrico de exhalaciones del volcán Popocatepetl, en México, durante el año 2016. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, 26(73), 37-48.
- Sahoo, A. K., Pradhan, C., & Das, H. (2019). Performance Evaluation of Different Machine Learning Methods and Deep-Learning Based Convolutional Neural Network for Health Decision Making. En Nature Inspired Computing for Data Science (págs. 201-212). Springer. doi:10.1007/978-3-030-33820-6_8
- Sharma, N., Jain, V., & Mishra, A. (2018). An Analysis Of Convolutional Neural Networks For Image Classification. Procedia Computer Science, 132, 377-384. doi:10.1016/j.procs.2018.05.198
- Taquet, N., Stremme, W., Grutter, M., Baylón, J., Bezanilla, A., Schiavo, B., Hase, F. (2019). Variability in the Gas Composition of the Popocatepetl Volcanic Plume. Frontiers in Earth Science, 7(114). doi:10.3389/feart.2019.00114
- Timofeeva, Y. M., Polyakova, A. V., Döhlerb, W., Oertelc, D., & Spänkuch, D. (2020). First Satellite Measurements of Carbon Dioxide in the Earth's Atmosphere (From the SI-1 Spectrometer Aboard the Meteor Satellite in 1979). Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 56(4), 401-404. doi:10.1134/S000143382004009X