



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2024,
Volumen 8, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1

**EVALUACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A
INCENDIOS FORESTALES EN LA RESERVA
GEOBOTÁNICA PULULAHUA DEL CANTÓN
QUITO, UTILIZANDO IMÁGENES
ECOSTRESS**

**EVALUATION OF AREAS VULNERABLE TO FOREST FIRES
IN THE PULULAHUA GEOBOTANICAL RESERVE OF THE
QUITO CANTON, USING ECOSTRESS IMAGES**

Lic. Cristian Patricio Logaña Hayo
Universidad Estatal de Bolívar
Ecuador

Ing. Marcelo Cando Jácome, PhD.
Universidad de Salamanca

Evaluación de áreas Vulnerables a Incendios Forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua del Cantón Quito, Utilizando Imágenes Ecostress

Lic. Cristian Patricio Logaña Hayo ¹

cristianlogana@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-1589-7367>

Universidad Estatal de Bolívar

Ecuador

Ing. Marcelo Cando Jácome, PhD

id00709713@usal.es

Universidad de Salamanca

RESUMEN

Como un mecanismo de previsión para la reducción de incendios forestales dentro de la Reserva Geobotánica Pululahua RGP en épocas de verano, esta investigación utilizó una metodología combinada de Geomática Aplicada Avanzada, mediante el análisis de imágenes Ecostress/ECO2LST-Sentinel 3, para determinar la temperatura del suelo y el Modelo Morfométrico basado en el Índice de Humedad Topográfica y el Índice de Efecto del Viento para delimitar pequeños tránsitos de flujos de convección de calor para la propagación del fuego a través de las geoformas bajas hasta las altas. La combinación de estos métodos determino 4 zonas susceptibles a incendios forestales cuyas temperaturas varían desde - 4.15°C y mayores a 24 °C, con índices de emisividad térmica que varían desde 16.386 hasta 19.273 (w/m²) en microcuencas geomorfológicamente cerradas las que tienen concentraciones importantes de biomasa. Estas zonas incluyen los sectores de Niebli de Monjas, Chaupizacha, Hacienda la Playa, San José de Neblí, entre otros sectores cercanos a la reserva.

Palabras clave: amenaza, incendios forestales, microcuenca hidrográfica, ecostress, ITW

¹ Autor principal

Correspondencia: cristianlogana@gmail.com

Evaluation of areas vulnerable to forest fires in the Pululahua Geobotanical Reserve of the Quito canton, using Ecostress images

ABSTRACT

As a forecast mechanism for the reduction of forest fires within the Pululahua RGP Geobotanical Reserve in summer, this research used a combined methodology of Advanced Applied Geomatics, through the analysis of EcoStress/ECO2LST-Sentinel 3 images, to determine the temperature of the soil and the Morphometric Model based on the Topographic Humidity Index and the Wind Effect Index to delimit small transits of heat convection flows for the spread of fire through the low to the high landforms. The combination of these methods determined 4 zones susceptible to forest fires whose temperatures vary from -4.15°C and greater than 24°C , with thermal emissivity indices that vary from 16,386 to 19,273 (w/m^2) in geomorphologically closed microbasins that have important concentrations of biomass. These areas include the sectors of Niebli de Monjas, Chaupizacha, Hacienda la Playa, San José de Neblí, among other sectors close to the reserve.

Keywords: hazard forest fires, hydrographic micro-basin, ecostress, ITW

Artículo recibido 14 diciembre 2023
Aceptado para publicación: 20 enero 2023



INTRODUCCIÓN

Según la Comisión Nacional Forestal mexicana, 2010 [1], los procesos vitales que se producen en las diversas zonas forestales relacionados con los ciclos de producción, purificación del aire o distribución del agua, entre otros, se pueden ver amenazados por múltiples factores que son producto, en gran parte de los casos, de las actividades del hombre incluyendo la generación de incendios forestales provocados y no controlados.

Los incendios forestales en la Reserva Geobotánica Pululahua-RGP han sido provocados por la quema de vegetación para limpiar tierras con propósitos de cultivarlas, la negligencia de personas que visitan la Reserva o incluso el vandalismo. Estos incendios han causado pérdidas y daños de los bosques y en la biodiversidad de la Reserva.

Las consecuencias que provoca un incendio forestal en la RGP, trasciende la estabilidad ambiental de los paisajes naturales, pues no sólo acaba con la vida silvestre, altera la biodiversidad y los ciclos naturales, sino que genera una profunda crisis social y económica en las localidades, incrementando de alta manera los costos de reconstrucción de los paisajes tras este tipo de desastres que son difíciles de cubrir. Además este tipo de eventos generan importantes impactos en la salud de las personas y alteran o colapsan los sistemas de salud [2].

Ante esta situación, en esta investigación se presenta una metodología combinada para la previsión y reducción de este tipo de amenazas por medio de herramientas informatizadas de Geomática Aplicada que es una ciencia relativamente nueva, la misma que utilizó Teledetección, Sistemas de Información Geográfica y Modelación Numérica para detectar, aislar y georeferenciar las áreas susceptibles por incendios forestales como también áreas en donde han ocurrido este tipo de amenazas.

La metodología aplicada utilizó información de uso público de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio de Estados Unidos-NASA y de la Agencia Espacial Europea ESA[3]. Información utilizada para la detección, monitoreo y reducción de incendios forestales a través del uso de imágenes Ecostress y Sentinel 3, más Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución Espacial obtenidos de forma gratuita del proyecto Alaska Satellite Facility-ASF de la NASA. Con la información mencionada, se realizó un análisis de la temperatura del suelo, índice de luminosidad y estrés de la cobertura vegetal, sobre los que se adicionó geográficamente los denominados “tubos



morfológicos iniciadorespropagadores de incendios forestales” obtenidos de índices morfológicos clave como el Índice Topográfico de Humedad TWI y el Índice de Efecto del Viento IEV, índices morfológicos extraídos del Modelo Digital de Elevaciones MED de 12.5 m de resolución espacial, considerando al factor topográfico como el medio sobre el cual se propagan los incendios forestales.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

Los materiales utilizados para el desarrollo de esta propuesta, fueron imágenes Ecstress de varias fechas antes y después de los incendios del 2019 y actuales. Estas imágenes se obtuvieron del

<https://search.earthdata.nasa.gov/search> , y son las siguientes:

ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2023213033735_aid0001.tif

ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2023216142523_aid0001.tif

ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2023220124822_aid0001.tif

ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2023163112817_aid0001.tif

ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2023163323033_aid0001.tif

ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2019220144345_aid0001.tif

ECO2LSTE.001_SDS_LST_doy2019239071707_aid0001.tif

ECOSTRESS_L2_LSTE_06181_021_20190808T144345_0601_02.h5

Las imágenes Sentinel 3 fueron obtenidas del Proyecto Copernicus obtenidas del sitio <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. La imagen Sentinel 3 y el subset o área de estudio fueron los siguientes:

Imagen de partida:

S3A_SL_2_LST____20230613T144313_20230613T144613_20230613T163704_0179_100_039_288
0_PS1_O_NR_004

Área de estudio/subset:

subset_0_of_S3A_SL_2_LST____20230613T144313_20230613T144613_20230613T163704_0179_
100_0

39_2880_PS1_O_NR_004.data

subset_1_of_subset_0_of_S3A_SL_2_LST____20230613T144313_20230613T144613_20230613T1
63704_0179_100_039_2880_PS1_O_NR_004.data

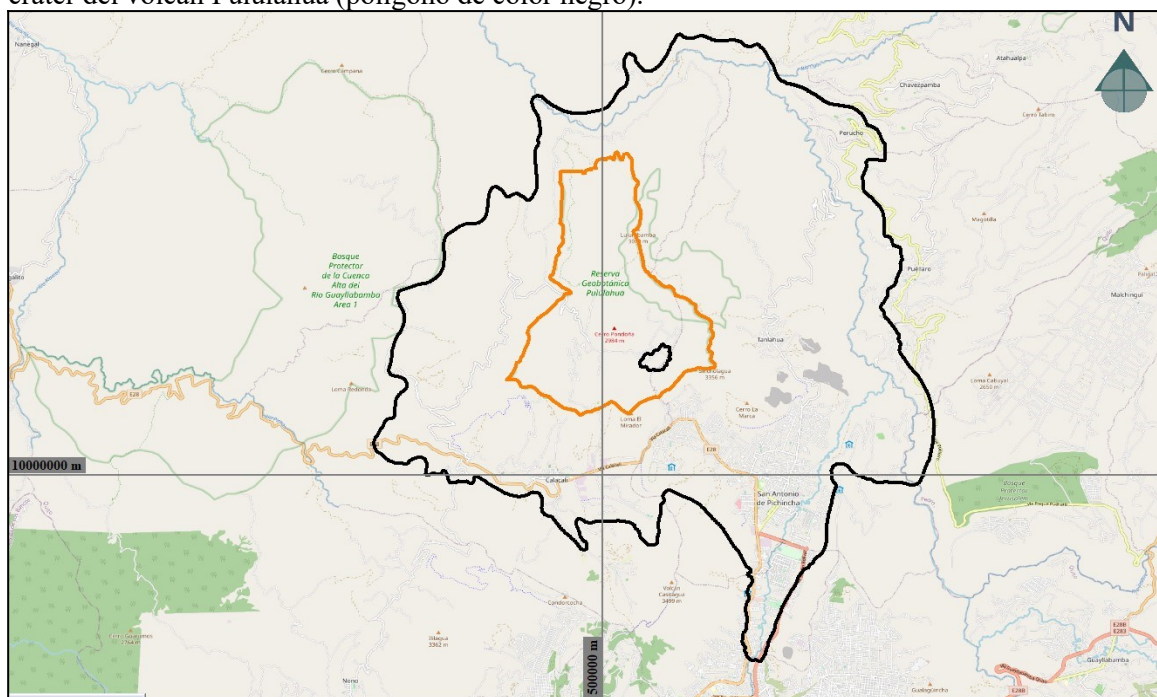
El Modelo Digital de Elevaciones de 12.5 m de resolución espacial, fue obtenido de la página AlaskaVertex: <https://search.asf.alaska.edu/#/>

AP_02670_FBS_F7180_RT1

La información planimétrica y de otras coberturas fue proporcionado por el Cuerpo de Bomberos del DMQ en un sistema de coordenadas WGS 84, Zona 17 Sur.

El presente estudio se realiza sobre un enfoque cuantitativo de previsión que parte de la información del incendio forestal en la Reserva Geobotánica Pululhua ocurrido en agosto-septiembre del año 2019, incendio con una afectación total de 85.52 ha. La ubicación de RGP dentro del Distrito Metropolitano de Quito y del cráter del volcán Pululhua se puede ver en la Figura 1.

Figura 1. Ubicación de la Reserva Geobotánica Pululhua (polígono de color naranja) RGP dentro del cráter del volcán Pululhua (polígono de color negro).



Fuente propia.

La aplicación de las imágenes Ecostress (Experimento de Radiómetro Térmico Espacial Ecosystem de la Estación Espacial Internacional ISS) e imágenes Sentinel 3, permitió valorar la intensidad de la temperatura de la vegetación-suelo y relacionarla con segmentos morfométricos del relieve como quebradas, quebradillas y guías de agua, para determinar el origen-propagación de incendios forestales. La respuesta de esta valoración permitió comparar los resultados de susceptibilidad ante incendios forestales con el mapa de incendios forestales obtenidos con la metodología del Ministerio del Ambiente.

El procedimiento utilizado en esta investigación se describe en el flujo de procesos de la Figura 2.

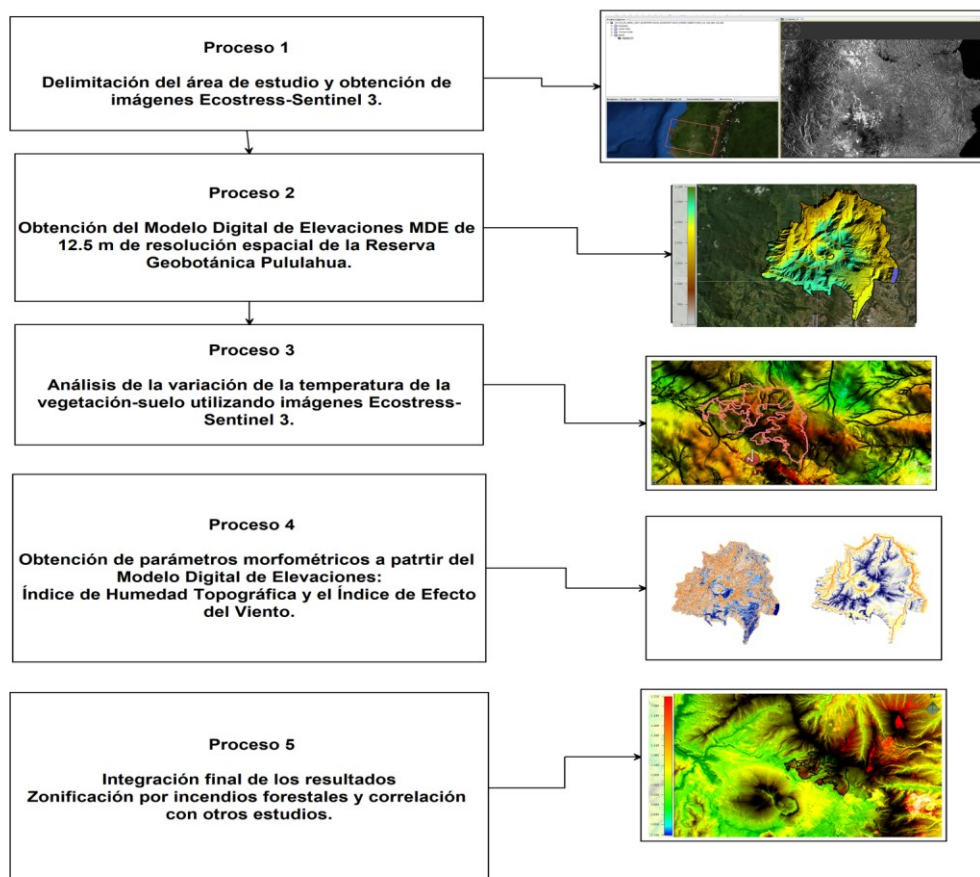


Figura 2. Flujo de procesos, susceptibilidad de incendios forestales RGP.

Proceso 1.- Delimitación del área de estudio y obtención de Imágenes Ecostress-Sentinel 3.

En este proceso se delimitó el área de estudio de acuerdo con el polígono de amenazas volcánicas obtenidas del Instituto Geofísico de la escuela Politécnica Nacional que se puede encontrar en la siguiente dirección y ajustado al límite de la RGP como se puede ver en el polígono de color naranja de la Figura 1.

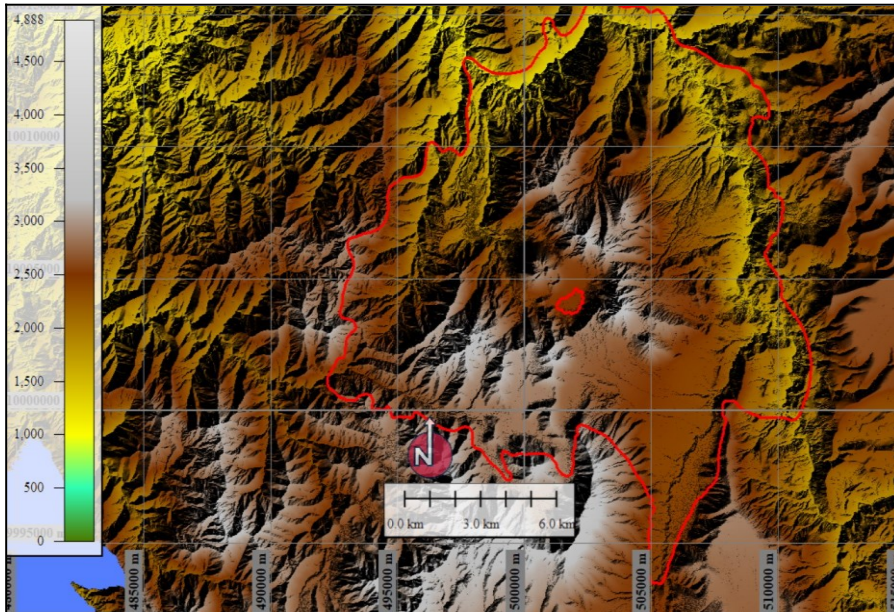
Para obtener las imágenes Ecostress y Sentinel 3, se accedió a la página del Proyecto Arset de la NASA ([Applied Remote Sensing Training Program | NASA Applied Sciences](#)) y del Proyecto Copernicus de la NASA-ESA ([scihub.copernicus.eu/dhus/](#)), respectivamente.

Proceso 2.- Obtención del Modelo Digital de Elevaciones MDE de 12.5m de resolución espacial de la Reserva Geobotánica Pululahua.

La obtención del Modelo Digital de Elevaciones de 12.5 metros de resolución espacial, se obtuvo del Proyecto Alaska-Vertex desarrollado por el Centro de Archivo Activo, distribuido por la plataforma de Instalación de Satélites de Alaska (ASF DAAC) de la NASA que en general, es una interfaz gráfica de

búsqueda para encontrar datos de Radar de Apertura Sintética (SAR). El Modelo Digital de Elevaciones de 12.5 m de resolución espacial se puede ver en la Figura 3.

Figura 3. Modelo Digital de Elevaciones de 12.5 m de resolución espacial obtenido del Proyecto AlaskaVertex de la NASA.



Proceso 3.- Análisis de variación de la temperatura de vegetación-suelo utilizando imágenes Ecostress y Sentinel 3.

De acuerdo con el proveedor de las imágenes del sitio [LP DAAC - ECOSTRESS Descripción general \(usgs.gov\)](https://lpdaac.usgs.gov/), el experimento ECOSystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station (ECOSTRESS) está a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS) y mide la temperatura de las plantas para comprender mejor cuánta agua necesitan y cómo responden al estrés o déficit de agua.

ECOSTRESS fue lanzado desde la estación Espacial Internacional-ISS el 29 de junio de 2018. El sensor tiene un ancho de franja de observación de alrededor de 384 km y ve la superficie de la Tierra desde 53.6° N de latitud a 53.6° S de latitud con tiempos de revisita variables, dependiendo de la órbita de la ISS. Las imágenes se adquieren en los Estados Unidos por medio del Continental U.S. (CONUS), imágenes de biomasa de todo el mundo, en zonas agrícolas europeas, del sur de Asia y sitios seleccionados de validación del estrés hídrico [3]. ECOSTRESS utiliza un radiómetro infrarrojo térmico multiespectral para capturar la radiación de la superficie de la Tierra en cinco bandas espectrales con una banda infrarroja de onda corta, y adquiere datos a 70 m de resolución espacial. Obtiene la temperatura haciendo una relación entre la energía emitida por la superficie y la energía recibida por los

sensores satelitales. Si no hay atmósfera, basta con conocer el flujo emitido en la tierra para saber su temperatura, porque la radiación emitida por un objeto es una función de su temperatura, de acuerdo con la ley de Planck[4] que determina la proporción de energía que emite un objeto a una determinada temperatura, en diferentes colores con diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, ley establecida para los emisores perfectos o cuerpos negros. El sensor calcular la temperatura evitando el efecto de la atmósfera, luego estima la relación entre la radiancia o potencia radiada por unidad de una superficie determinada y la generada dentro de un cuerpo.

El primer paso en el cálculo de la temperatura es convertir los Niveles Digitales de Energía-ND a radiancias o flujo de energía reflejado por las superficies terrestres. Una vez calculada la radiancia (ecuación 1), puede estimarse la temperatura de brillo a partir de la inversión de la ecuación de Planck[4].

$$L = a_0 + a_1 \cdot ND \quad (\text{ecuación 1})$$

donde L corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en una banda (en $\text{W m}^2 \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$), a_0 y a_1 son los coeficientes de calibración para esa banda (incluidos en la cabecera de la imagen) y ND es el nivel digital del pixel en esa banda.

Los algoritmos de cálculo desarrollados y aplicado por la Agencia Espacial Europea ESA permiten, integrando datos de varios sensores, obtener los siguientes productos del sistema Land Processes Distributed Active Archive Center LP DAAC, que distribuye los datos de ECOSTRESS en los siguientes niveles de procesamiento:

- Nivel-1: Productos de actitud, geolocalización y luminosidad
- Nivel 2: Datos de temperatura y emisividad de la superficie terrestre recuperados de los datos de radiación de nivel 1 y productos de máscara de nubes
- Nivel-3: Productos de evapotranspiración derivados de datos de nivel 2
- Nivel-4: Índice de estrés evaporativo y productos de eficiencia en el uso del agua derivados de datos de Nivel 3

En esta investigación, se ha utilizado el Nivel 2 de datos de temperatura y emisividad de la superficie terrestre para analizar la temperatura del suelo y estrés hídrico de las plantas.

Descripción del procesamiento ECOSTRESS/Sentinel 3.



La misión ECOSTRESS [5] genera productos de datos distribuibles en franjas, cuadrículas y mosaicos. Los productos representan los cuatro niveles de procesamiento de datos mencionados, con gránulos de datos definidos como una escena de imagen. Cada escena de imagen de franja y cuadrícula consta de 44 escaneos, cada escaneo toma aproximadamente 1.181 segundos y cada escena de imagen toma aproximadamente 52 segundos. Cada órbita se define como el cruce ecuatorial de una órbita ascendente de la estación ISS. El ECOSTRESS Science Data Systems (SDS) adquiere, captura y almacena la carga útil ECOSTRESS y los archivos auxiliares de telemetría de instrumentos y accesorios a través de sus interfaces con la otra instrumentación activa de la red telemétrica terrestre. Estos datos se almacenan durante la vida útil de la misión y se utilizan para la generación de productos científicos a través de todos los niveles. La SDS genera productos de datos de Nivel 1 a Nivel 2, así como productos de datos de Nivel 3 y Nivel 4 utilizando el algoritmo del laboratorio PresleyTaylor-JPL, que es un modelo ampliamente utilizado para simular operativamente la Evapotranspiración en grandes áreas terrestres[4]. Según la descripción que realiza el proyecto Copernicus en su página oficial [6], el objetivo principal de la misión del instrumento Land Surface Temperature and Sea Surface Temperature-SLSTR a bordo de Sentinel-3 es proporcionar un conjunto de datos de referencia sobre la temperatura de la superficie terrestre y la temperatura de la superficie del mar para registros de datos climáticos. El instrumento ha sido diseñado para cumplir otro objetivo de esta misión que es la obtención de imágenes Sentinel-3/SLSTR 3, para detectar incendios forestales mediante dos bandas espectrales dedicadas a la observación del fuego activo, que permite parametrizar el fuego en una gran variedad de condiciones no afectadas por la saturación del sensor. Específicamente, y, para los objetivos de esta investigación, se refiere a que el instrumento proporcionó la temperatura de la superficie terrestre dentro de la RGP, midiendo la temperatura de la superficie y observación de incendios forestales en la superficie terrestre dos veces al día, con una resolución espacial de 70 metros, resolución ideal para rastrear este tipo de incendios.

En este artículo, se utilizaron los datos ECOSTRESS-Sentinel 3 como parte de una metodología combinada que puede implementarse para el Cuerpo de Bomberos del DMQ, además de rastrear el frente de fuego pirata e identificar su proximidad a la infraestructura estratégica de la RGP, basado en



las relaciones entre la intensidad de un incendio forestal, el estrés hídrico, la exposición al viento y la cantidad de agua que puede acumular el relieve topográfico.

Comparando los datos de ECOSTRESS-Sentinel 3 con diferentes imágenes satelitales después de los incendios forestales, varios investigadores descubrieron que la velocidad con la que las plantas liberan agua al “sudar” por medio del proceso de evapotranspiración, así como la eficiencia con la que utilizan el agua para la fotosíntesis, pueden ayudar a predecir si los incendios forestales posteriores pueden ser más o menos intensos [7]. Ambas medidas indican si una comunidad vegetal recibe suficiente agua o está bajo estrés por falta de ella y son combustibles óptimos para iniciar-propagar un incendio forestal. Esta intensidad está ligada directamente con el Índice de Humedad Topográfica TWI en relación con la cantidad de agua que puede almacenar una geoforma como se verá posteriormente.

La cantidad suficiente de agua en las plantas y en el suelo sirve para entender por qué algunas áreas están muy quemadas y otras no luego de ocurrir un incendio forestal. Los resultados muestran lo importante que es el estrés hídrico para definir zonas de menor Índice de Humedad Topográfica TWI, zonas que pueden ayudar a predecir qué áreas se queman más y por qué es importante monitorear la vegetación en estas regiones.

El uso de imágenes Sentinel 3 sirvió para detectar posibles incendios activos localizándolos por medio de anomalías térmicas que producen estos incendios. Los algoritmos comparan la temperatura de un posible incendio con la temperatura de la superficie terrestre que lo rodea. Si la diferencia de temperatura está por encima de un umbral determinado, el incendio potencial se confirma como un incendio activo o "punto caliente"[8]. Estas anomalías térmicas también se correlacionaron con zonas de bajo Índice de Humedad Topográfica para predecir iniciadores-propagadores de incendios desde acumuladores de biomasa en quebradas, quebradillas y guías de agua que se los ha denominado como “tubos morfológicos de inicio-propagación de incendios forestales”.

El sensor de Sentinel 3, SLSTR (Radiómetro de temperatura de la superficie del mar y de la tierra), determina las temperaturas globales de estas superficies con una precisión mejor que 0.3 K (0.3 °C; 0.5 °F). Mide las temperaturas en nueve canales espectrales y dos bandas adicionales optimizadas para el monitoreo de incendios. Las primeras seis bandas espectrales cubren el espectro visible e infrarrojo cercano (VNIR), así como el espectro infrarrojo de onda corta (SWIR). VNIR para las bandas 1 a 3 y



SWIR para las bandas 4 a 6. Estas 6 bandas tienen una resolución espacial de 500 metros, mientras que las bandas 7 a 9, así como las dos bandas adicionales tienen una resolución espacial de 1 kilómetro [9]. Cuando ocurre un incendio forestal, a las plantas se les dificulta realizar sus funciones por tener demasiado calor y es el proceso de evapotranspiración el que ayuda a las plantas a regular su temperatura. La evapotranspiración combina la velocidad con la que las plantas pierden agua a medida que esta se evapora del suelo y por transpiración en las plantas, en la que liberan agua a través de las estomas. Para evitar perder demasiada agua, las plantas empiezan a cerrar sus estomas si se secan demasiado, como resultado, las plantas comienzan a calentarse porque ya no tienen la ventaja de transpirar, según el sitio <https://ciencia.nasa.gov/>

Mediante el análisis de las imágenes ECOSTRESS-SENTINEL 3, se pueden observar cambios pequeños en la temperatura de la vegetación, en base de los cambios en la evapotranspiración y la eficiencia en el uso del agua por las plantas. En general, una evapotranspiración más lenta y un menor valor de eficiencia indican que las plantas están sometidas a estrés hídrico. Valores más altos indican que las plantas están recibiendo suficiente agua.

En el artículo, publicado en *Global Ecology and Biogeography* [10], los investigadores encontraron que las variables relacionadas con el estrés hídrico, junto con la elevación, fueron factores pronosticadores dominantes de la intensidad de los incendios en las áreas afectadas por tres incendios forestales en el sur de California en 2020, el incendio de Bobcat en el Bosque Nacional de Los Ángeles, junto con los incendios de Apple y El Dorado en el Bosque Nacional de San Bernardino. Esa investigación concluyó que *“un estrés mayor o menor podía predecir incendios más severos dependiendo del tipo de vegetación principal en un área, por ejemplo, los bosques de pinos estresados tienden a arder con mayor intensidad, lo que sugiere que las condiciones más secas hacen que los árboles sean más inflamables. Mientras tanto, en los pastizales, un menor estrés tendió a correlacionarse con mayor daño por incendios, lo que es una posible indicación de que el crecimiento robusto de la vegetación produjo más combustible, resultando en incendios más intensos”*.

En el artículo de investigación presente, los autores plantearon la hipótesis sobre que aparte de la humedad, velocidad-dirección del viento, presión atmosférica, tipo y cantidad de biomasa que son utilizados por métodos cartográficos para determinar la susceptibilidad ante incendios forestales, existen



otros parámetros que generalmente no son tomados en cuenta en este tipo de metodologías para determinar el inicio y propagación espacial de los incendios forestales, parámetros como son el Índice de Humedad Topográfica-TWI y del Índice de Efecto del Viento-IEV.

Dentro de la RGP, la temperatura máxima en la parte norte alcanza valores de 29,3°C y en la parte sur de 27°C en época de verano en el periodo de junio a diciembre, por lo que las imágenes Ecstress utilizadas coinciden con las posibles temperaturas altas de esa época.

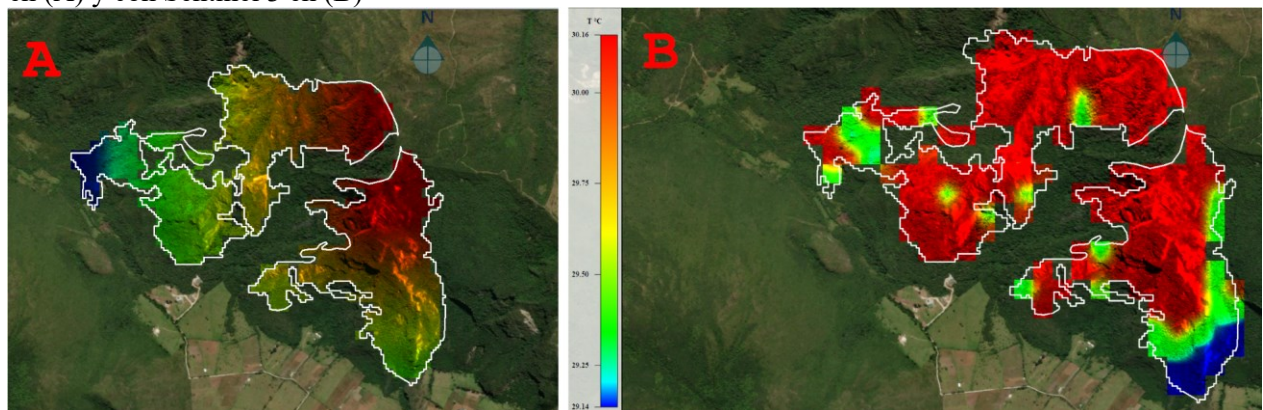
Para obtener la variación de la temperatura en la superficie terrestre y de la vegetación, dentro de la RGP se tomó un grupo de 8 imágenes imagen Ecstress de septiembre a agosto de 2019 y una de Sentinel 3 de junio de 2023, época de verano, en horas en la que las temperaturas del suelo y la vegetación tienen valores altos. Posteriormente, se obtuvieron rangos de temperatura del suelo y de la cobertura vegetal en formato GeoTIFF para tener una correlación con el área quemada en la RGP en el año 2019, como se puede ver en la Figura 4, en donde los límites del área quemada se representan con un polígono de color blanco. La concordancia entre las dos imágenes se da en la zona quemada en donde las temperaturas se elevaron a más de 24°C.

Proceso 4.- Obtención de los Parámetros Morfométricos a partir del modelo de elevaciones, el Índice Topográfico de Humedad y el Índice de Efecto del Viento.

Siguiendo la metodología de Cando, M. con respecto a la obtención de estos parámetros [11], se obtuvieron el Índice Topográfico de Humedad y el Índice de Efecto del Viento a partir del Modelo Digital de Elevaciones y tomando al factor Geoforma como un elemento capaz de conducir el fuego por conectores morfológicos desde las partes bajas hacia las partes altas de las laderas que son expuestas a vientos intensos.



Figura 4. Temperaturas dentro del área quemadas en el año 2019, obtenidas de las imágenes Ecostress en (A) y con Sentinel 3 en (B)



Índice Topográfico de Humedad. TWI [11].

Este índice evalúa la cantidad de humedad presente en el suelo y la vegetación en una determinada geoforma cóncava, convexa o plana. El Índice Topográfico de Humedad-TWI es importante para comprender las condiciones hídricas en un lugar y puede ayudar a prever sequías, inundaciones y en el estudio de incendios forestales, a evaluar el riesgo de ignición-propagación de los mismos. Los incendios forestales se producen por condiciones secas y la presencia de material inflamable, como vegetación seca, ramas caídas y hojas secas, almacenadas en quebradas, quebradillas, pequeñas guías de agua y en embalses naturales en donde hay concentración de vegetación combustible.

Un índice topográfico de humedad bajo puede indicar condiciones secas que aumentan el riesgo de incendios forestales. La vegetación se vuelve más inflamable en ausencia de humedad, lo que facilita la propagación del fuego. Este efecto se puede ver en la Figura 5, en las que las zonas de mayor temperatura se han identificado con fajas de color ocre en las partes medias de los taludes y zonas altas de color hacia el rojo. Generalmente el índice se extrae de un modelo de elevación digital y cuanto más elevado es el valor, mayor humedad debe presentar el terreno o la celda en función de su configuración topográfica (Roa-Lobo & Kamp, 2011[12]). Esta variable se toma en cuenta por que suele incluirse en el modelamiento del fuego como una aproximación de las condiciones hidrogeológicas (Tien Bui, Le, et al., 2016 [13]).

Para entender cómo este índice morfológico ayuda a generar incendios forestales en sus inicios, y principalmente en la generación “tubos morfológicos de propagación” que terminan esparciendo el incendio en áreas extensas en la RGP, el TWI combina la contribución a la escorrentía de un área local

drenada con la curvatura plana que es una medida de la convergencia o divergencia de un flujo erosionante en patrones de distribución del agua superficial y de materiales sólidos a través de la magnitud y dirección de la pendiente. Este proceso netamente morfológico, genera “tubos morfológicos expuestos al viento” que se propagan en suelos con intensa temperatura en pequeñas microcuencas como se puede ver en la Figura 5(A). Los números identifican las comprobaciones de campo en donde ocurrieron los incendios. En la Figura 5(B) se puede ver un detalle de los “tubos morfológicos” de iniciopropagación de viento e incendios en suelos con intensa temperatura en pequeñas microcuencas, representados por los flujos de verde oscuro que llevan combustibles calientes a las partes altas de las vertientes o zonas expuestas al viento. El polígono de color blanco se representan las zonas que se quemaron en el incendio forestal del 2019.

Figura 5

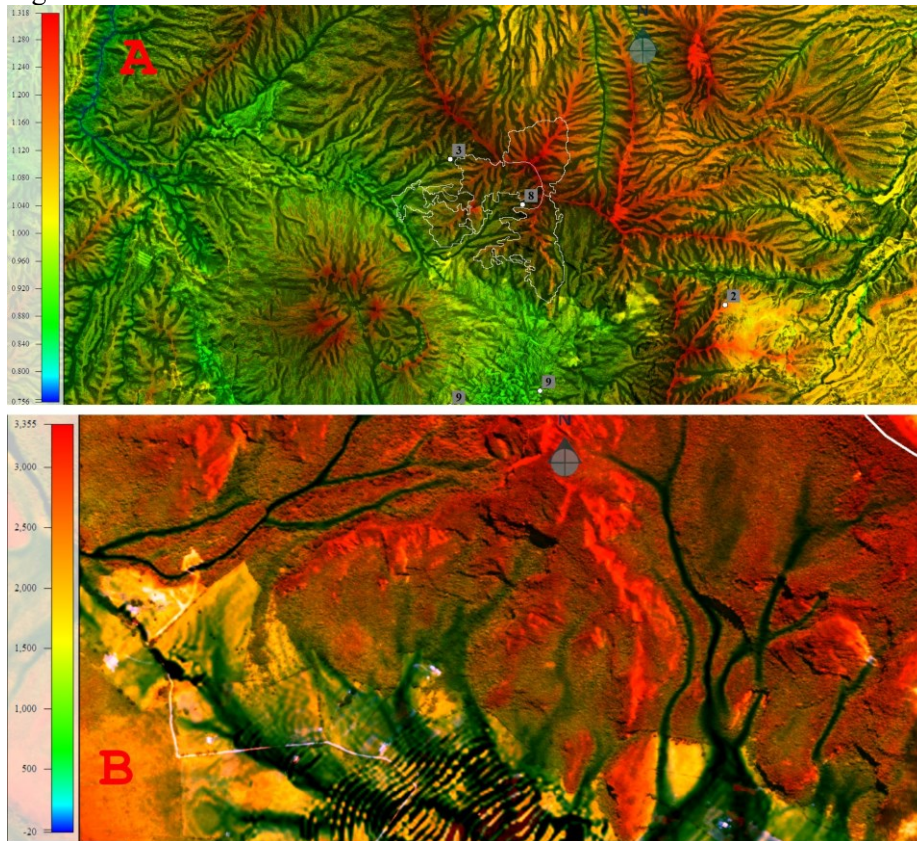


Figura 5. Generación de “tubos morfológicos” de inicio-propagación de viento en suelos con intensa temperatura en pequeñas microcuencas, representados por los flujos de verde oscuro que llevan combustibles calientes a las partes altas de las vertientes o zonas expuestas al viento. Con color blanco las zonas que se quemaron en el incendio forestal del 2019.

Cuando el flujo morfológico por erosión hídrica superficial y subsuperficial converge, este factor TWI es <0 y se generan tubos morfológicos cóncavos. Cuando el flujo morfológico por erosión hídrica superficial y subsuperficial es divergente, este factor TWI es >0 y se generan tubos morfológicos convexos. Las curvaturas verticales y planas influyen sobre la humedad y profundidad de horizontes del suelo, concentración de materia orgánica y distribución de la cobertura vegetal que en este caso es la cantidad de biomasa o combustible. También es un indicador de lineamientos geológicos, estructuras en anillo, y puede ser utilizada para determinar la morfología de fallas [14]. En modelación de modelos de incendios forestales, el TWI puede determinar zonas en donde la cobertura vegetal se acumula en forma de nudos de concentración en represamiento natural en épocas de intensa lluvia/erosión que en períodos de sequía tienen un Índice Topográfico de Humedad bajo, por lo que posiblemente, es esta biomasa acumulada el combustible que se consume rápidamente y se propaga pendiente arriba de las laderas tal como se puede ver en la Figura 5.

En general la literatura Geomática utiliza la siguiente fórmula para determinar el Índice Topográfico de Humedad [11]:

$$TWI = \ln\left(\frac{af}{\tan\beta}\right) \quad \text{ecuación 2, Beven \& Kirkby, 1979 [15]}$$

Donde **af** es el área local drenada para un punto de cálculo, y **tan β** es la pendiente direccional de la celda de interés y de los ocho vecinos en base del Modelo Hidrológico D8. **Ln** es logaritmo natural. Como se mencionó anteriormente, los valores más altos con tendencia al color verde oscuro, representan los tubos morfométricos de inicio-propagación de incendios forestales cóncavos o convexos que en épocas de verano y de estrés hídrico, son por donde dispersan los incendios forestales en grandes áreas. Como este índice es quien genera y controla topográficamente los tubos morfológicos de iniciopropagación de incendios forestales, se multiplicó por un valor constante K de la temperatura del suelo en grados Celsius y por el Índice de Efecto del Viento para obtener los sitios más calientes expuestos al viento con lo que se determinaron las zonas con mayor susceptibilidad ante este tipo de incendios.



Índice de Efecto del Viento

Según Quito Informa [16], durante el mes de agosto de 2019, la calidad del aire de San Antonio de Pichincha y sus alrededores se vio afectada por la resuspensión de material geológico y por el incendio forestal de la Reserva Geobotánica Pululahua.

Según datos de la Red Metropolitana de Monitoreo de la Calidad de Aire de Quito, el mes de agosto de 2019, fue el mes con menores precipitaciones en la última década, con valores de velocidad de viento de hasta 6.75 m/ y la rosa de los vientos en esa época indicó que los viento principalmente provienen de noreste desde la zona de Tanlahua y Rumicucho.

En la Figura 6[A] se observa la dirección preferencial del viento en la RGP que según Tobar [17] es NWSE, con velocidades que fluctúan entre 15 a 16 km/h y, según Quito Informa [10], los vientos cambiaron de 20 a 40 km/h por hora durante el incendio del año 2019. Las velocidades del viento y su influencia en el relieve según la escala de Beaufort para estimar la velocidad del viento se pueden ver en la Figura 6(B) [18].

Figura 6. En (A) Mapa de circulación de vientos según Tobar, 1990 [17]. En (B) Velocidades del viento y sus efectos en la tierra [18].



En la Figura 7 se puede observar la dirección del viento en relación con el incendio forestal ocurrido en el año 2019. Tomado de <https://es.windfinder.com/#13/0.0092/-78.5466>



Figura 7. Dirección del viento en la RGP y su relación con el incendio forestal del año 2019.

En función de lo mencionado anteriormente, el Índice de Efecto del Viento calcula de forma aproximada en dónde la velocidad del viento puede ser mayor debido a la morfometría del relieve topográfico, lo que significa que es una medida de qué tan expuesta está una geoforma a vientos potenciales que vienen de todas las direcciones. Este índice se ha calculado a partir del DEM y el módulo de Morfometría en SAGA GIS.

El Índice de Efecto del Viento promedio para todas las direcciones, utiliza un paso angular en una rosa de vientos de 360 grados, comenzando con 0 para el Norte y aumentando en el sentido de las agujas del reloj. Es un índice adimensional en donde los valores inferiores a 1 indican áreas sombreadas por el viento más húmedas, mientras que los valores superiores a 1 indican áreas expuestas al viento [20].

Numéricamente, el módulo de Efecto de Viento de SAGA GIS, calcula para cada celda de la cuadrícula del MDE las trayectorias del viento con ponderación de los ángulos verticales de las corrientes de flujo de aire utilizando las definiciones siguientes [19]:

El índice de barlovento o de laderas expuestas a vientos dominantes HW y el índice de sotavento o laderas protegidas del viento HL fueron calculado como:

donde dWHi y dLHi se refieren a las distancias horizontales en dirección de barlovento y sotavento y, dWZi y dLZi, son las distancias verticales correspondientes en comparación con la celda ráster considerada. La segunda suma en la ecuación (3) determina el impacto a sotavento de cadenas montañosas previamente atravesadas por los vientos.

$$H_w = \sum_1^n \left(\frac{dWH_i}{dLHi} \right) + \left(\sum_1^n \frac{dLZ_i}{dLHi} \right) \cdot \tan^{-1} \left(\frac{dWH_i}{dLHi} \right) \quad (\text{ecuación 3})$$

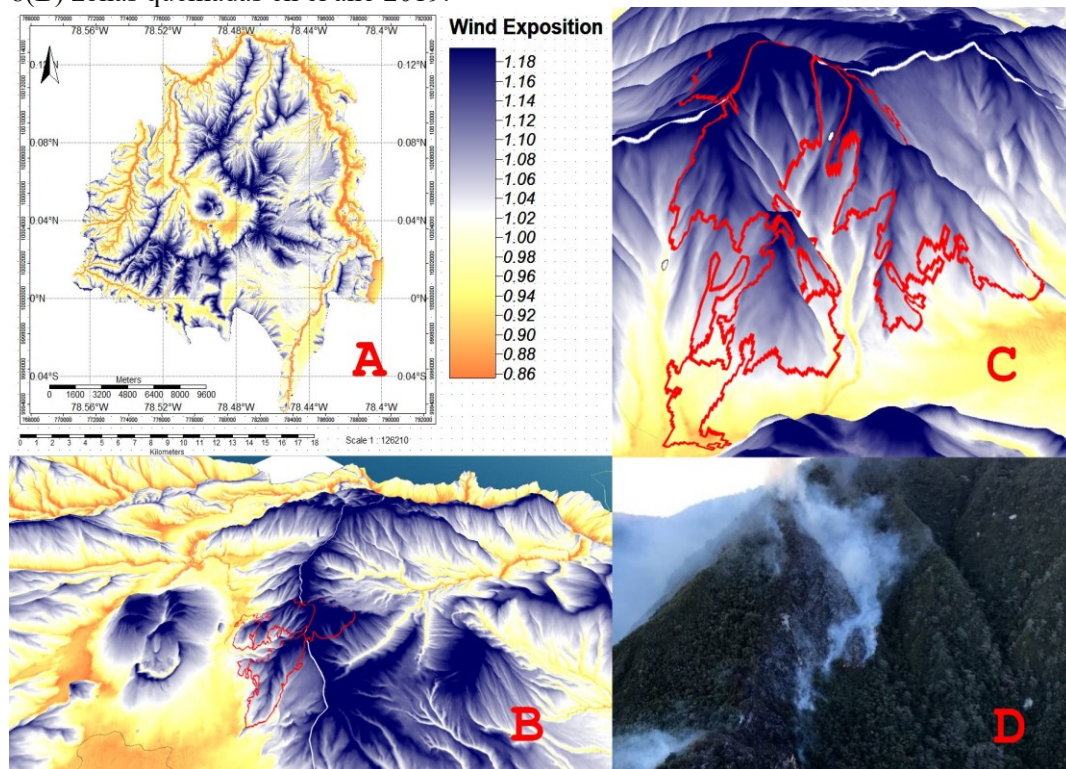
$$HL = \sum_1^n \ln \left(\frac{dWH_i}{dLHi} \right) \cdot \tan^{-1} \left(\frac{dWH_i}{dLHi} \right) \quad (\text{ecuación 4})$$

Las distancias horizontales logaritmizadas en la ecuación (4) determinan un impacto a mayor distancia de la sombra de la lluvia a sotavento. El final del parámetro del efecto del viento, que se supone que está relacionado con la interacción del campo eólico a gran escala y la escala local características de precipitación, se calcula como $H = HL \cdot HW$ y toma valores entre 0,7 para posiciones de sotavento y 1,3 para posiciones de barlovento (Böhner y Antonic, 2009) [19]. El cálculo del efecto del viento está implementado en SAGA GIS.

La Figura 8 muestra la distribución espacial del efecto del viento, así como el campo de viento medio a 686.06 hPa a 3178 m.s.n.m. para septiembre de 2019 dentro de la RGP. La Figura 8(A) superior muestra el área objetivo completa. En 8(B) la distribución espacial del viento y las zonas quemadas en el año 2019 en barlovento y sotavento. En 8(C) se observa la microcuenca quemada, microcuenca con sus tubos de propagación de incendios forestales y en 8(D) la misma microcuenca con el incendio real de agosto de 2019. El polígono rojo es el límite del área quemada en la RGP y Tanlahua.



Figura 8. Distribución espacial del efecto del viento en la RGP. En 8(A) el área objetivo completa. En 8(B) zonas quemadas en el año 2019.



En la Figura 9, se puede ver la correlación que existe entre los puntos de control de campo de inicio/propagación de los incendios forestales, con los sitios expuestos al viento con valores cercanos y mayores que 1.

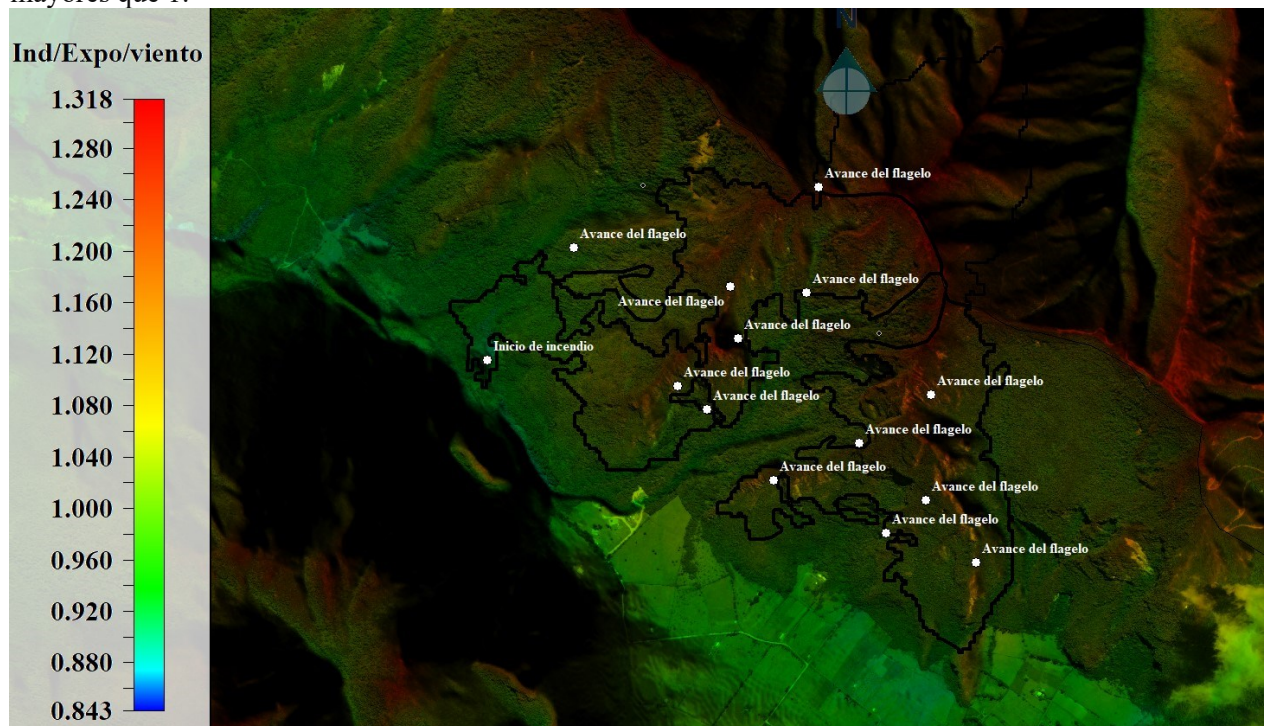


Figura 9. Correlación entre los puntos de control de campo de inicio/propagación de incendios forestales, con los sitios expuestos al viento dentro de la RGP.

Proceso 5. Integración final de los resultados, discusión. Zonificación por incendios forestales y comparación con otros estudios.

La integración de los dos mecanismos de temperatura Ecostress/Sentinel 3 y morfométrico de la ecuación 2, más el índice de efecto del viento en distancias horizontales en sotavento y barlovento de las ecuaciones 3 y 4, tiene relación con el relieve topográfico y en su efecto diferencial en la severidad de los incendios forestales que afecta tanto la distribución y la productividad de la vegetación, así como aspectos climáticos de humedad, temperatura, radiación solar directa y exposición al viento, que en últimas repercuten en la disponibilidad y el contenido de humedad del combustible (Pyne et al. 1996 [20], Keane et al. 2010)[21].

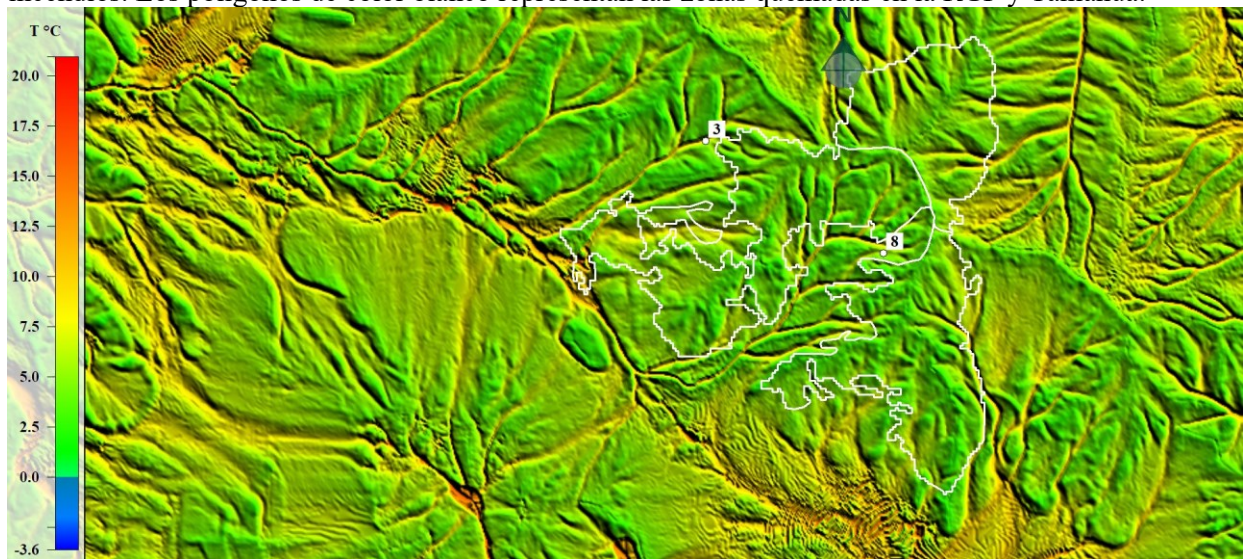
Matemáticamente se presenta de la siguiente manera:

$$\left(H_w = \sum_1 \left(\frac{dWZ_i}{(dWH_i)^{-1}} \cdot \tan \frac{dLZ_i^n}{-1 dWH_i} \right) + \left(\sum_1 (dLHi) \cdot \tan \frac{dLZ_i^n}{-1 dWH_i} \right) \right) \frac{= \ln \left(\frac{\tan \beta}{1} \right)}{\sum_1 \frac{dLHi}{dLHi}} \quad \text{af}$$

Gráficamente, esta integración se ve en la Figura 10, en la que las zonas de mayor temperatura se han especificado con fajas de color hacia el rojo en las quebradas, quebradillas y guías de agua, por donde se propagan los incendios. En la Figura los polígonos de color blanco son las zonas quemadas en la RGP y Tanlahua.



Figura 10. Zonas de mayor temperatura (Fajas de color hacia el rojo) por donde se propagan los incendios. Los polígonos de color blanco representan las zonas quemadas en la RGP y Tanlahua.



Un resultado muy importante de la aplicación de esta metodología es que se logró determinar los sitios de ignición o de inicio de los incendios forestales, sitios que se comprobaron en campo que fueron proporcionados por el Cuerpo de Bomberos del DMQ. En la Figura 11(A) se puede ver el resultado de determinación espacial de las zonas de ignición o iniciadores de los incendios y avance o propagación de los incendios en la RGP y en la Figura 11(B) una imagen real de los sitios de ignición. En la Figura 12 se puede ver la zona inicial del incendio de 2019 desde cultivos que fueron quemados por los habitantes de la zona para resiembra. La temperatura fue mayor a 24 grados centígrados.

En la Figura 12 se puede ver un detalle de las zonas iniciales del incendio de 2019 en la RGP desde cultivos que fueron quemados por los habitantes de la zona para resiembra.

Las zonas de propagación o avance del incendio del 2019 están representadas con esas fajas de color hacia el amarillo-rojo. Los puntos de control de campo que coinciden con los resultados obtenidos en el avance de los incendios forestales se pueden ver en la Figura 13.

Figura 11. En (A) zonas iniciales y de propagación de incendios forestales del año 2019. En (B) imagen real de la quema.

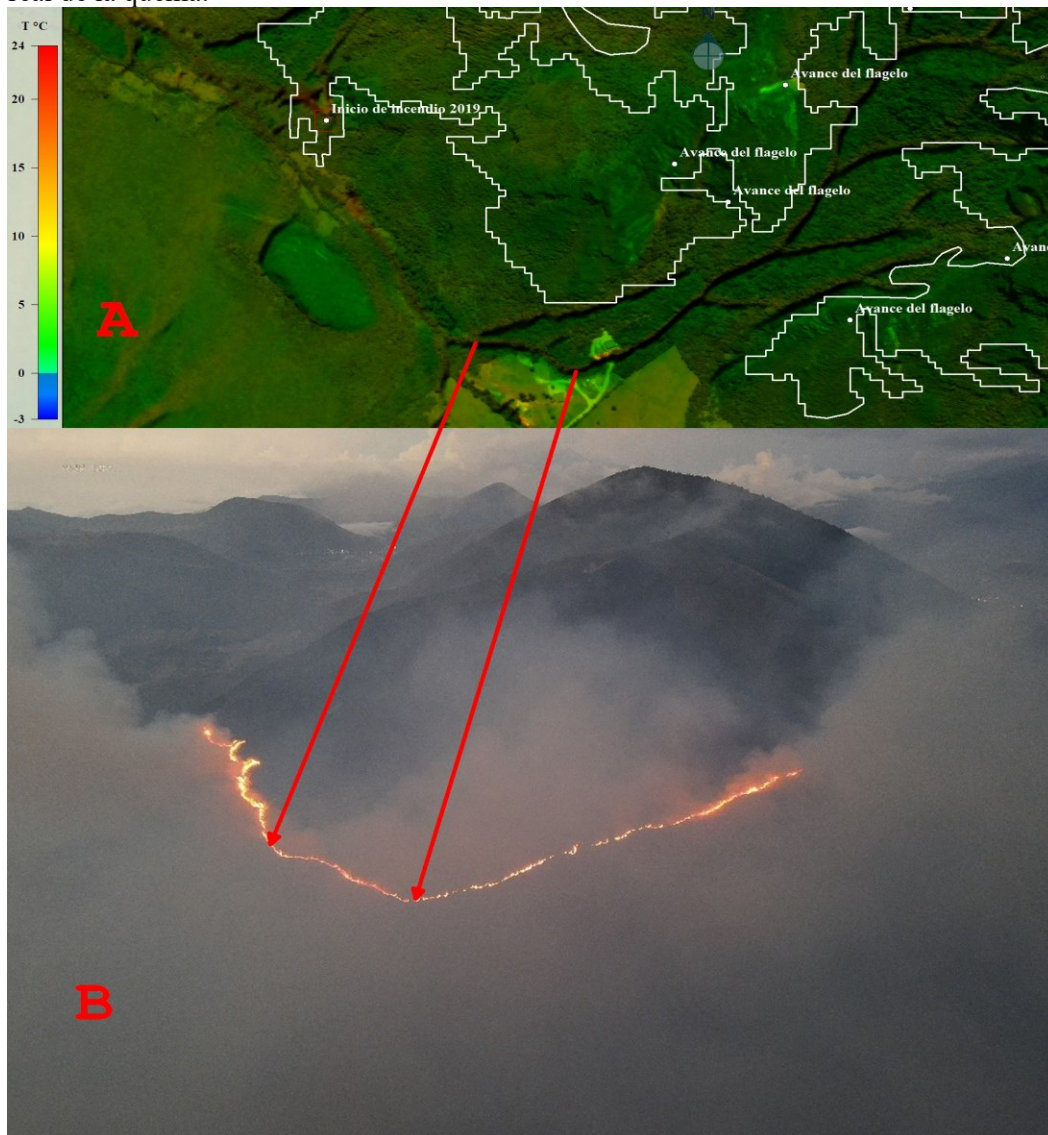


Figura 12. Zonas iniciales del incendio de 2019 desde cultivos que fueron quemados por los habitantes de la zona para resiembra. El punto blanco representa el punto de ignición datado por el cuerpo de Bomberos

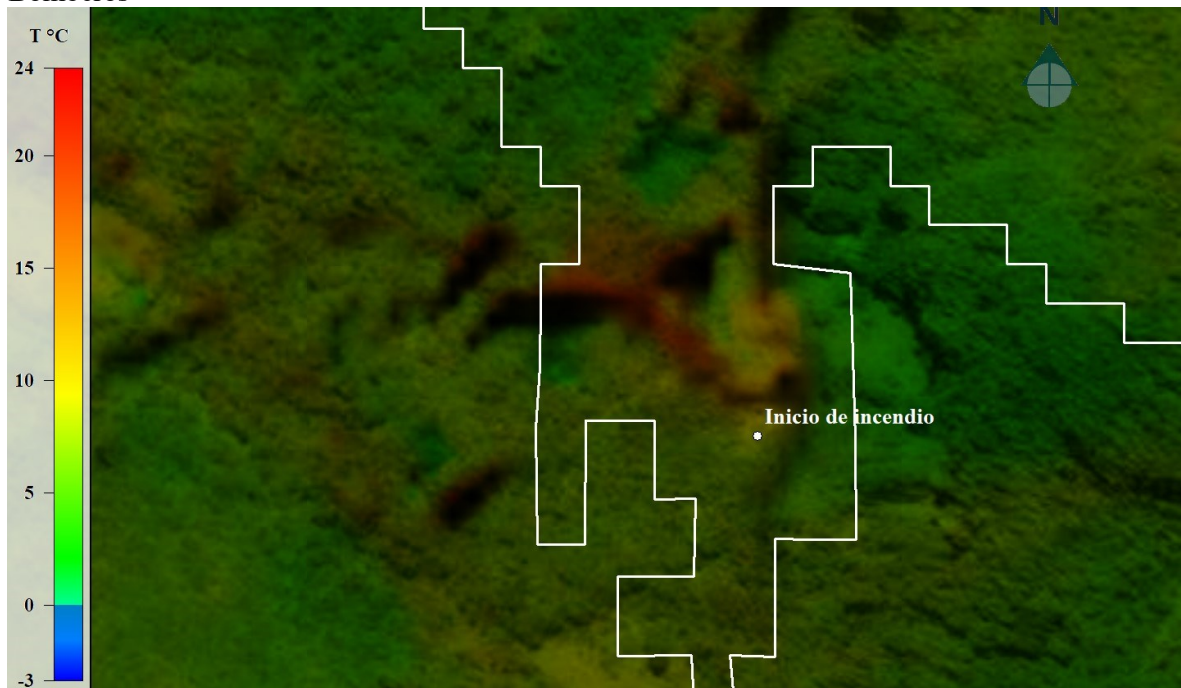


Figura 13. Zonas de propagación con puntos de control de avance de los incendios forestales en la RGP y Tanlahua. La flecha de color rojo indica el tubo de propagación simulado en (A) y el tubo de propagación real de avance del incendio forestal en (B)



Las zonas de ignición o inicio de los incendios forestales se han encontrado para toda la RGP y el área de influencia del volcán Pululahuá incluyendo los sitios de Niebli de Monjas, Chaupizacha, Hacienda la Playa, San José de Niebli, Acarat, Pailón de la Cruz, Esto se puede ver en la Figura 14. Otras zonas con alta susceptibilidad incendios forestales se encuentran en la comunidad al Sureste de la zona de influencia del volcán Pululahuá, sectores de Caspigasí, Huasipungo, Rumicucho, San José de la Mitad del Mundo, Casitagua, hacienda Oasis, La Virgina, Cajias, San Cayetano, Carcelén, San Jorge, Alcantarillas, Catequilla. Hacia el este Huatacharqui, Ipila, hacienda Fernando, hacienda Tanlahua,

es de color anaranjado o de alto riesgo a diferencia del mapa obtenido en esta investigación en donde no todo se quema.

Figura 15.



Figura 15. Comparación del nivel de riesgos a incendios forestales en la RGP elaborado por el Ministerio del Ambiente (A9) en el que la mayor parte de la RGP es de color anaranjado o de alto riesgo a diferencia del mapa obtenido en esta investigación (B) en donde no todo se quema.

CONCLUSIONES

La integración de imágenes Ecostress-Sentinel con los índices morfométricos, determinó que los factores morfométricos topográficos que controlan el comportamiento del fuego, además de la elevación, pendiente y las curvaturas longitudinales y de perfil, son el Índice Topográfico de Humedad y el de Efecto del Viento en el caso de la RGP, son los factores que más tienen influencia para la propagación de los incendios forestales.

Los “tubos morfológicos calientes” que se genera en las zonas bajas de las vertientes, se propagan por pendientes pronunciadas especialmente en zonas expuestas al viento de las vertientes medias y altas, encendiendo la biomasa de combustible adyacentes por efectos de precalentamiento contribuyendo al aumento de severidad del fuego.

El Índice Topográfico de Humedad es el factor morfométrico más importante para el desarrollo de los incendios forestales contribuyendo en la velocidad, dirección y zonas determinación de zonas de exposición al viento para su propagación.

El fuego se propaga más rápidamente a favor de este Índice Topográfico de Humedad por los tubos de ignición-propagación pendiente arriba incluyendo el humo y el calor mayores a 24 grados centígrados que hace más fácil quemar la biomasa de combustible.

La exposición de las laderas de las vertientes al viento y al fuego aumenta la intensidad de los incendios por los tubos de ignición-propagación mediante las “chispas - pavesas” que son combustibles más secos y, por lo tanto, son más inflamables y capaces de propagar los incendios.

Un bajo Índice de Humedad Topográfica en zonas expuestas al viento, aumentan el estrés del suelo y vegetación que está asociado a los drenajes, cambiando la dinámica del incendio forestal al aumentar el calor, el mismo que cambia en base de la humedad de los combustibles que pueden quemarse o no fácilmente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Comisión Nacional Forestal. 2010. Incendios Forestales. Guía para Comunicadores. Tercera edición. San Juan de Ocotán, Zapopan, Jalisco, México.
<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/10/236Gu%C3%ADa%20pr%C3%A1ctica%20para%20comunicadores%20-%20Incendios%20Forestales.pdf>
- [2] CENEPRED. 2018. Caracterización del peligro por incendios forestales.
https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//10471_escenario-de-riesgo-por-incendiosforestales.pdf
- [3] McCartney, S. & Mentha, A.; Podest, E. 2020. Teledetección Satelital para Aplicaciones Agrícolas. Programa de entrenamiento. NASA.
https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Ag_Training_Part1_Span.pdf
- [4] Fernández A. Cálculo de temperaturas de superficie a partir de imágenes NOAA, Landsat y Sentinel 3. 2018. Universidad Politécnica de Valencia.
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/103166/Fern%C3%A1ndez%20-%20CALCULO%20DE%20TEMPERATURA%20DE%20SUPERFICIE%20A%20PARTIR%20DE%20IM%C3%81GENES%20NOAA%20Y%20LANDSAT%20Y%20SENTINEL-3.pdf?sequence=1>
- [5] Logan, T.; Smyth, M.; Chu, E. 2018. ECOSystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station (ECOSTRESS) Mission. Level 1 Product Specification Document. National Aeronautics and Space Administration. California Institute of Technology.
https://ecostress.jpl.nasa.gov/downloads/psd/ECOSTRESS_SDS_PSD_L1.pdf



- [6] Manteca, O. 2021. Calibración de modelos termométricos mediante la banda radiométrica de Sentinel-3. Trabajo de Fin de Grado para acceder al GRADO EN FÍSICA. Facultad de Ciencias. Universidad de Cantabria.
- https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/22438/MantecaMart%C3%ADnez_%C3%93scar_TFGFisica_Calibraci%C3%B3n_de_modelos.pdf?sequence=1
- [7] Equipo de redacción de Ciencia. NASA. 2022. Los datos de la NASA sobre la transpiración vegetal podrían ayudar a predecir la gravedad de los incendios forestales.
- <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/datos-de-la-nasa-sobre-la-transpiracion-vegetal/>
- [8] IBERICADRON. [Cursosonlinegis](https://cursosonlinegis.com). 2022. Mapas de incendios forestales: cómo rastrear incendios en tiempo real en todo el Mundo.
- <https://cursosonlinegis.com/3-mapas-de-incendios-forestales-como-rastrear-incendios-en-tiempo-realen-todo-el-mundo/#:~:text=Si%20la%20diferencia%20est%C3%A1%20por,el%20sat%C3%A9lite%20no%20podr%C3%A1%20detectarlo.>
- [9] Wikipedia. Enciclopedia Libre. Sentinel-3. 2023. <https://es.wikipedia.org/wiki/Sentinel-3>
- [10] Madeleine Pascolini-Campbell, et al. 2023. Evaluating European ECOSTRESS Hub Evapotranspiration Products Across a Range of Soil-Atmospheric Aridity and Biomes Over Europe.
- Water Resources Research. Journal article. DOI: [10.1029/2022WR034132](https://doi.org/10.1029/2022WR034132)
- [11] Cando-Jácome, M.; Martínez-Graña, A. (2019). Determination of primary and secondary lahar flow paths of the Fuego Volcano (Guatemala) using morphometric parameters. Special Issue Remote Sensing of Volcanic Processes and Risk. Remote Sensing, 11 (6), 727. Ed.: MDPI. ISSN 2070- 4292. Impact Factor JCR_2018: 4.118. Categories: Remote Sensing (7/30- Q1).
- <https://doi.org/10.3390/rs11060727>
- [12] Roa-Lobo, Jose & Kamp, Ulrich. 2012. Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, estado Trujillo-Venezuela. Revista Geográfica Venezolana.53. 109-126.
- <https://www.researchgate.net/publication/>



[272887866 Uso del indice topografico de humedad ITH para el diagnostico de la amenaza por desborde fluvial estado Trujillo-Venezuela](#)

- [13] Bui, Dieu & Tuan, Tran & Klempe, Harald & Pradhan, Biswajeet & Revhaug, Inge. (2015). Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. Landslides. 13. 1-18. 10.1007/s10346-015-0557-6. https://www.researchgate.net/publication/271430808_Spatial_prediction_models_for_shallow_landslide_hazards_a_comparative_assessment_of_the_efficacy_of_support_vector_machines_artificial_neural_networks_kernel_logistic_regression_and_logistic_model_tree
- [14] Cando Jácome, M.; Martínez-Graña A. (2018). Numerical modeling of flow patterns applied to the analysis of the susceptibility to movements of the ground. Geosciences, 8, 340 pp. ISSN 2076-3263. Special Issue Tectonics and Morphodynamics. Categories: Geosciences Multidisciplinary (32/182- Q1). Impact Factor Scopus: 1.97. <https://doi.org/10.3390/geosciences8090340>
- [15] Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. Assessment of the Sensitivity of Streamflow Simulations to Changes in Patch Resolution Using GIS Based Hydro-Ecologic Model. Hydrological Sciences Bulletin, 24, 43-69. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=65337>
- [16] Quito Informa. 2019. Calidad de aire: influencia de los incendios forestales de la reserva Geobotánica Pululahua y re-suspensión de material geológico. <https://www.quitoinforma.gob.ec/2019/08/30/calidad-de-aire-influencia-de-los-incendios-forestales-de-la-reserva-geobotanica-pululahua-y-re-suspension-de-material-geologico/>
- [17] Rubio, H. 2019. Evaluación de efectividad de manejo de la Reserva Geobotánica Pululahua, basado en la percepción Externa de cuatro actores estratégicos. Disertación previa a la obtención del título de Ingeniero Geógrafo en Gestión Ambiental. Escuela de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.



<https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4453/1/MANUSCRITO%20FINAL%20%20KAREN%20ALEXANDRA%20CALDER%C3%93N%20Y%C3%89PEZ.pdf>

- [18] Seiscubos. 2021. Escala de Beaufort para estimar la velocidad del viento. <https://www.seiscubos.com/conocimiento/viento>
- [19] Karger, D., Conrad, O., Böhrer, J. et al. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. Sci Data 4, 170122 (2017). <https://www.nature.com/articles/sdata2017122>
- [20] Pyne, S.J., P.L. Andrews and R.D. Laven. 1996. Introduction to wildland fire, second edition. John Wiley & Sons, New York. 769 pp. <https://search.worldcat.org/es/title/33244900>
- [21] Van R. Kane, Bryce N. Bartl-Geller, Malcom P. North, Jonathan T. Kane, Jamie M. Lydersen, Sean M.A. Jeronimo, Brandon M. Collins, L. Monika Moskal, First-entry wildfires can create opening and tree clump patterns characteristic of resilient forests, Forest Ecology and Management, Volume 454, 2019, 117659, ISSN 0378-1127, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112719313301>

