

MODELO DE RIESGOS DE INCENDIOS FORESTALES

INSTITUTO BOLIVIANO DE INVESTIGACION FORESTAL - 2022

Instituto Boliviano de Investigación Forestal (IBIF)

**Modelo de Riesgos de Incendios Forestales
Febrero 2022**

Consultoría requerida a FAN (Fundación Amigos de la Naturaleza)

Autor: Armando Rodríguez
Revisión: Natalia Calderón
Fotografía de tapa: Pedro Rivera



safeCreative
2301133174841
INFO ABOUT RIGHTS

Estudio Realizado con el financiamiento de:



Las opiniones y puntos de vista expresados en esta publicación son de responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan necesariamente las de Tropenbos Internacional, ni el Ministerio de Relaciones Exteriores de los Países Bajos

Instituto Boliviano de Investigación Forestal
Barrio Las Palmas. Av. Ibérica, Calle 6 - N° 39
www.ibifbolivia.org.bo
Santa Cruz, Bolivia.

Índice

1. Introducción	4
2. Áreas quemadas históricas por tipo de vegetación	5
3. Áreas quemadas históricas por Municipio y en Planes Generales de Manejo Forestal	7
4. Modelo de riesgos de incendios forestales	9
Criterios de selección, descripción de las variables y parámetros a usar en el modelo de riesgo de incendios.	9
5. Riesgo de incendios forestales	12
6. Influencia de la recurrencia anual de area quemadas en el riesgo de incendios forestales	15
7. Conclusiones y recomendaciones	16
8. Referencias bibliográficas	18

Modelo de Riesgos de Incendios Forestales

1. Introducción

Estudios recientes sugieren que, debido al cambio climático, aumentará el número de incendios forestales en todo el mundo. Recientemente, los incendios forestales registrados en Bolivia durante la época seca de los años 2019-2020, donde se quemaron más de 65 millones de hectáreas de bosque. En Bolivia las superficies quemadas cada año en el país aumentaron significativamente, habiendo alcanzado entre el 2001 y 2020 un promedio anual (media) de 3,7 millones de hectáreas, pero, con una dinámica temporal y espacial que resulta heterogénea, existiendo años donde los incendios sobrepasaron el promedio histórico, y otros donde no superaron los 2 millones de hectáreas quemadas.

La recurrencia creciente del fuego está aumentando en la región de Chiquitania. Identificar los niveles de riesgo de incendios forestales en la región y las variables que explican la ocurrencia del fuego parte de adecuada selección de factores climáticos, ambientales, topográficos, socioeconómicos. De tal forma que se pueda predecir la ocurrencia de incendios forestales en cuanto a su ubicación y magnitud dentro del área de este estudio. De tal forma que este mapa de riesgos de incendios forestales pueda ser utilizado para proyectar medidas preventivas y de mitigación de estos impactos en la región. Este estudio se basa en datos gratuitos de detección o percepción remota u observación de la Tierra. Por otro lado, la Fundación Amigos de la Naturaleza cuenta con mucha experiencia sobre el diseño e implementación de información diaria sobre riesgo de incendios forestales¹ esta información está disponible en el denominado Sistema de Monitoreo de Riesgo de Incendios Forestales (SATRIFO) para Bolivia. Si bien este sistema genera modelos de pronósticos climáticos para predecir la ocurrencia de incendios forestales de forma diaria, no es aplicable a los propósitos de esta consultoría. Puesto que se requiere un mapa que sea estático y que reúna las condiciones más probables en un escenario representativo de la región.

En los últimos años, el aprendizaje automático de máquinas ha demostrado ser exitoso en muchos ámbitos de la ciencia, debido a su capacidad de aprender de relaciones obvias, pero también ocultas para un mejor entendimiento de los procesos. Es por esta razón que esta tecnología la utilizamos en este estudio. Ya que uno de los objetivos de este estudio es la construcción de un marco metodológico para identificar la ocurrencia de incendios forestales de gran magnitud espacialmente distribuida que además utilice información libre disponible. Se planteó que la identificación de la ocurrencia de incendios se desarrolle en la plataforma Google Earth Engine (GEE) por la disponibilidad de la información y por el poder computacional que ofrece. La ubicación y magnitud de los incendios fue basado en focos de calor y para la ausencia de estos se identificó información históricos de 21 años (2001-2020). El algoritmo seleccionado para este estudio fue RandomForest (RF) con la variante de probabilidades. Este estudio también contemplo la fase de validación o evaluación de exactitud de la predicción.

¹ <http://incendios.fan-bo.org/Satrifo/plataforma/>

2. Áreas quemadas históricas por tipo de vegetación

A partir de información satelital del producto MCD64A1² de MODIS (2001-2021) se generó estadísticas sobre la dinámica de áreas quemadas dentro del área de estudio que comprenden los municipios de Ascensión de Guarayos, Urubichá, Concepción, San Ignacio de Velasco, San Antonio de Lomerío, San Rafael, San Miguel, San Javier, Roboré y San José de Chiquitos y dentro de las concesiones forestales. Para caracterizar la presión de áreas quemadas en ecosistemas se procedió a cuantificar la ocurrencia de cicatrices de quema en los diferentes tipos de vegetación³ (figura 1E). A continuación, se presentan los principales resultados de esta sección.

Se ha identificado que los años 2004, 2006, 2007, 2010, 2019 y 2020 fueron más críticos en cuanto a superficie afectada por los incendios forestales en la región. Estos años superaron sustancialmente el promedio anual de 600 mil hectáreas quemadas. Los años que superaron el millón de hectáreas fueron los años 2004, 2007, 2010, 2019 que coinciden con los años extremadamente secos en la región. El año 2010 fue el record histórico que se aproxima a la cifra de 2 millones de hectáreas (figura 1A), patrón que se replica a escala departamental y nacional.

La acumulación anual de superficie de áreas quemadas es mayor en el estrato de vegetación Herbacea graminioide, llegando a un total de 4.3 millones de hectáreas en los últimos 21 años. Le sigue el Bosque denso siempre verde con más de 4.1 millones de hectáreas quemadas (figura 1C) registrado en el mismo periodo de tiempo. Las proporciones de Herbacea graminioide afectada por el fuego supera un promedio anual de 30% en cambio el Bosque denso siempre verde llega a un promedio de 24% del total de su superficie (figura 1B).

En este estudio se ha determinado que el 46% (2.5 millones de hectáreas) de las áreas quemadas corresponde a cicatrices de quema que se quemaron una sola vez a lo largo de 21 años. De esta proporción el 49% corresponde al Bosque densos semi siempre verde que se quemó una sola vez en los últimos 21 años de evaluación. En promedio el 60% de las áreas quemadas sucede en bosque (incendios forestales) en la región respecto a una categoría de herbáceas. Los años 2019 y 2021 superaron esta proporción llegando a un 80% de bosque quemado.

El escenario que se puede anticipar dadas las condiciones, sugiere una creciente presión del fuego en categorías de bosque siempre verde, esto más la pérdida en proporciones nuevas de bosque que son degradadas año a año. En particular esta categoría de bosque se distribuye longitudinalmente en el área de prácticamente toda el área de estudio. Esta característica por sí sola no quiere decir que la vulnerabilidad del fuego es igual en toda la región. Existe una diferenciación de factores naturales y antrópicos que condicionan la ocurrencia y grado de afectación a causa del fuego. Entre los factores que permiten esta diferencia está el clima (precipitación, temperatura), actividad antrópica (deforestación, aprovechamiento forestal, extracción de recursos), disponibilidad y distribución de combustible forestal. Se debe tomar en cuenta estas diferencias para identificar las regiones con mayor riesgo de incendios.

² Giglio, L., Justice, C., Boschetti, L., Roy, D. (2015). <i>MCD64A1 MODIS/Terra+Aqua Burned Area Monthly L3 Global 500m SIN Grid V006</i> [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2022-02-02 from <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD64A1.006>

³ Navarro, G., & Ferreira, W. (2007). Mapa de Vegetación de Bolivia, Esc. 1: 250.000. The Nature Conservancy (TNC). Edición digital. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.

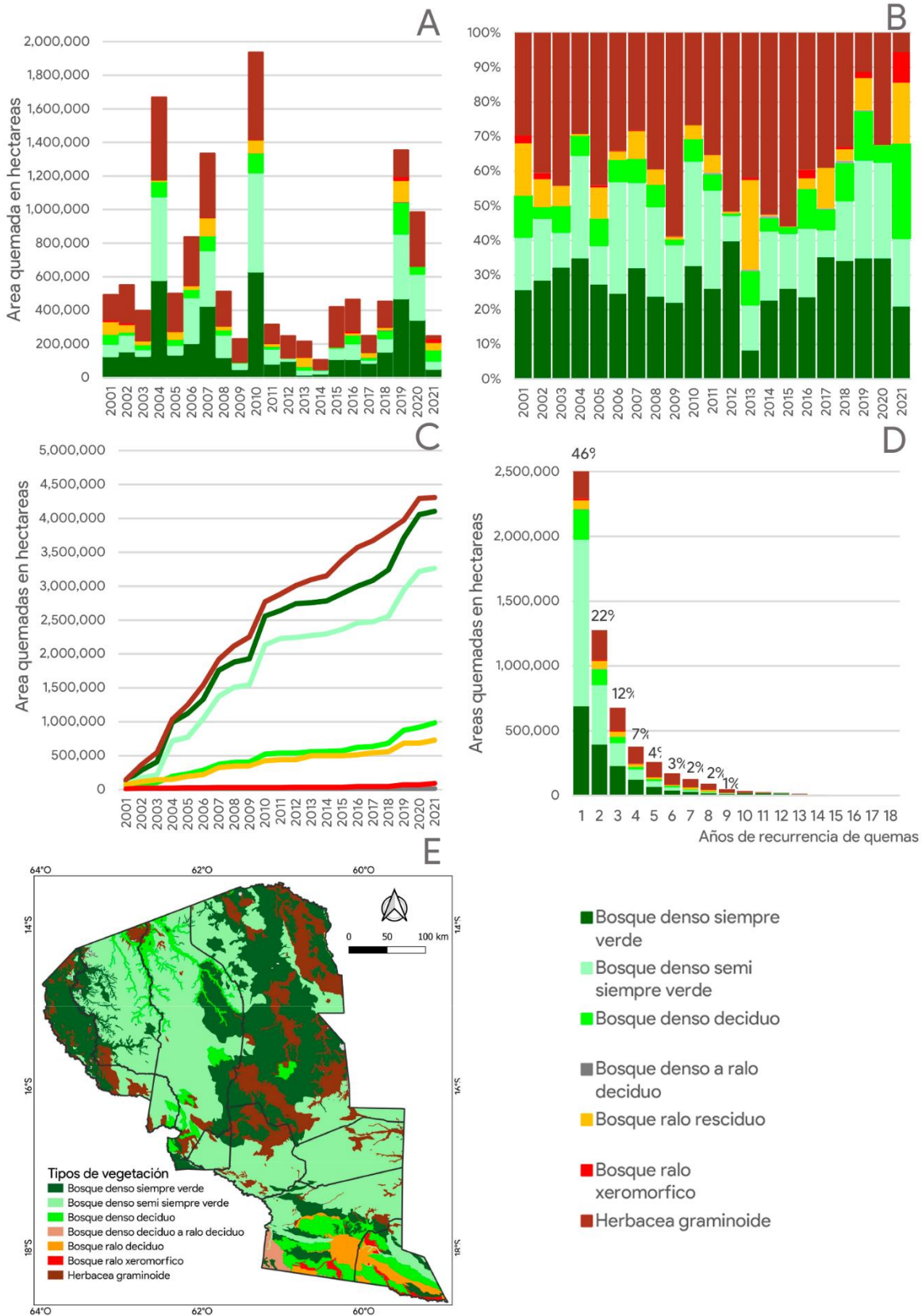


Figura 1. Superficie de áreas quemadas por tipo de vegetación en hectáreas, periodo 2001 a 2021. A. Histórico de áreas quemadas. B. Proporción de áreas quemadas. C. Acumulación de áreas quemadas. D. Recurrencia anual de áreas quemadas. E. Mapa de vegetación.

3. Áreas quemadas históricas por Municipio y en Planes Generales de Manejo Forestal

En toda el área de estudio se han quemado más de 13.7 millones de hectáreas en los últimos 21 años, en promedio se queman más de 655 mil hectáreas. Los municipios que concentran la mayor proporción de áreas quemadas se encuentra San Ignacio de Velasco acumulando más de 7 millones de hectáreas quemadas a lo largo de 21 años, representando el 52% del total para el área de estudio en el mismo periodo (figura 2A).

La proporción de nuevas áreas quemadas, es decir cicatrices que a lo largo de 21 años solo se quemaron una sola vez. Se concentran en los municipios de Concepción con un 64% y 30% para San Ignacio de Velasco. Este último municipio muestra una mayor proporción de recurrencia de áreas quemadas. El rango es mucho más amplio que otros municipios, va desde 2 a 13 años en total. San Ignacio de Velasco acumula una superficie de 1.5 millones de hectáreas recurrentes que representa el 69% del total quemado en ese municipio (figura 2B).

Dentro de los planes generales de manejo forestal (PGMF) también son evidentes los eventos de incendios registrados en la región. Esta condición es de esperarse ya que los PGMF están distribuidos en toda el área de estudio y en proximidades a actividades antrópicas. Una característica particular que podemos resaltar es el evento del 2019 que fue el más crítico de estas unidades de manejo. En la región ya mostramos que fue el año en que se consumió más superficie de bosque a causa del fuego (figura 2C y 2F). En total se quemó más de 1.3 millones de áreas quemadas representa el 10% del total de área quemada del área de estudio. En promedio se queman 61 mil hectáreas (figura 2C).

El 26% del total de PGMF que corresponde a 347 mil hectáreas se quemaron al menos una vez. Las proporciones de bosque que se quemaron una sola vez a lo largo de estos 21 años dentro de los PGMF ascienden a 178 mil hectáreas representando el 70%. Una característica importante es que los PGMF con una extensión mayor a 20 mil hectáreas presenta una menor ocurrencia de áreas quemadas (figura 2F).

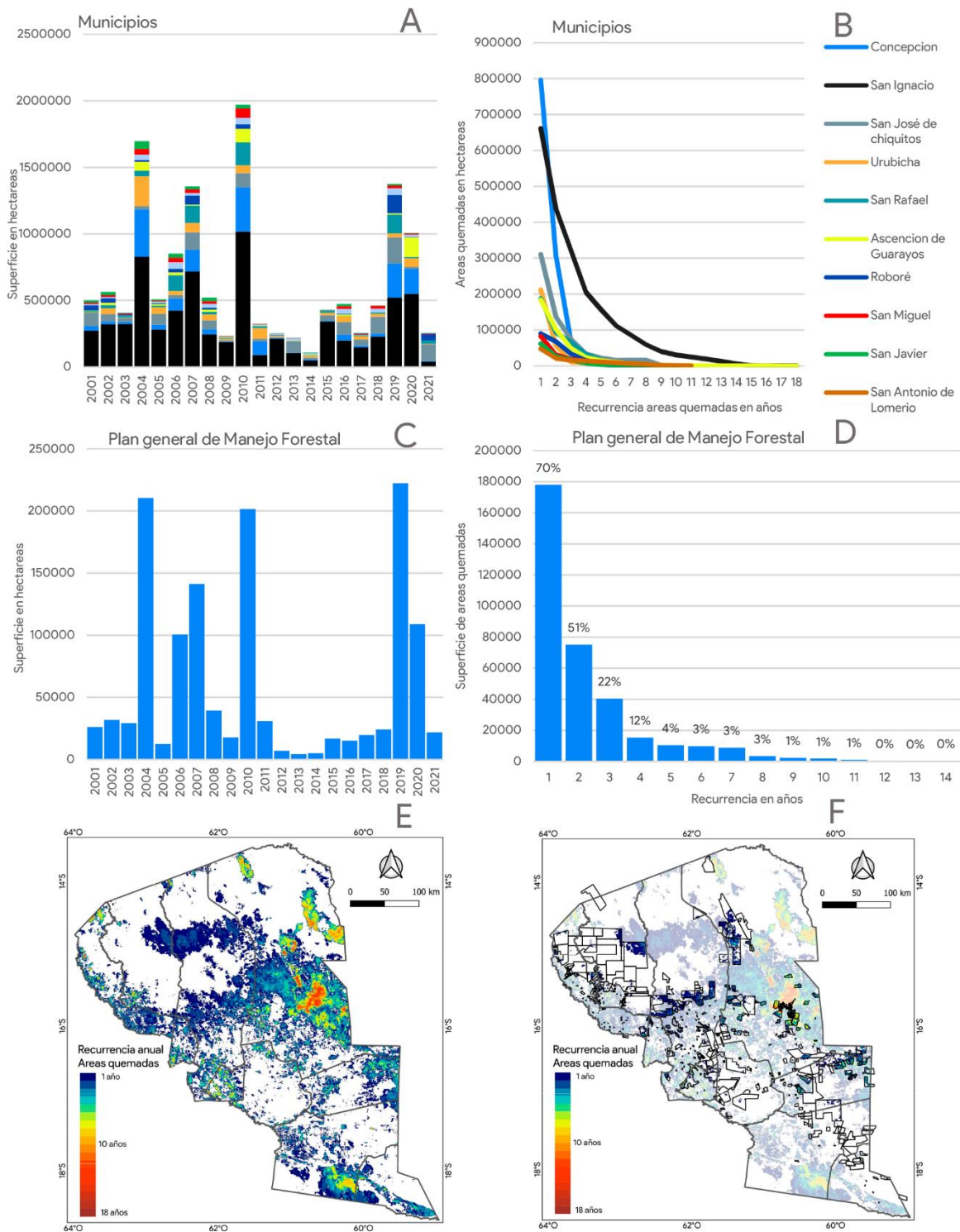


Figura 2. Áreas quemadas por municipio y por plan general de manejo forestal.

4. Modelo de riesgos de incendios forestales

El marco metodológico propuesto para este estudio parte de la premisa que el resultado del mapa de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales debe contar con una buena resolución espacial y debe concentrarse en los meses críticos de los incendios forestales.

Además de priorizar la ocurrencia de incendios de mayor intensidad que producirán un mayor impacto al bosque. El modelo seleccionado para este estudio fue RandomForest (RF). Este modelo ha demostrado en varios estudios un alto desempeño para predecir ocurrencia de cambios en función a las variables seleccionadas. Este modelo se utiliza habitualmente para la predicción de datos y es adecuado para la modelización no lineal de la susceptibilidad a los incendios forestales (Gigović. et al, 2019), permite analizar el vínculo entre los factores condicionantes de los incendios forestales y la ocurrencia de incendios y, posteriormente, para predecir la susceptibilidad de los incendios en la región de la Chiquitania.

El modelo de RF también permite visualizar la importancia de cada variable, que se puede utilizar para determinar la relevancia de la variable y como explica el comportamiento en el factor analizado. Los principales beneficios del modelo de RF es que el modelo o algoritmo evita el problema de sobreajuste si hay suficientes árboles en el modelo empleado, además de permitir manejar valores perdidos. A continuación, se presenta el marco metodológico empleados en este estudio (Liaw et al, 2002) (figura 1).

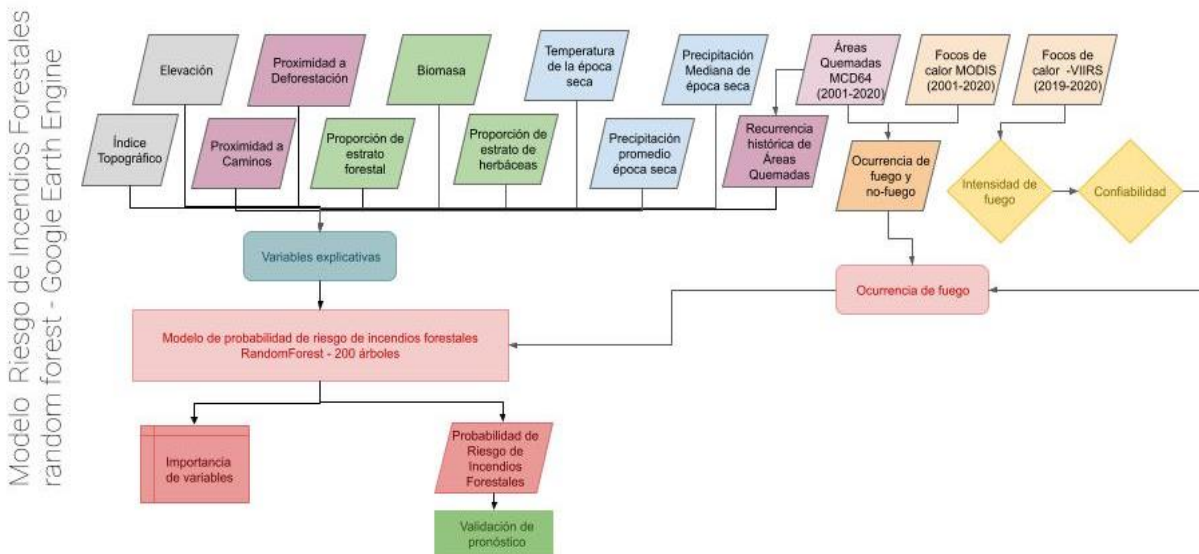


Figura 3 . Marco metodológico para construcción de modelo de probabilidad de riesgo de incendios forestales de la Chiquitania.

Crterios de seleccin, descripcin de las variables y parmetros a usar en el modelo de riesgo de incendios.

Se compilaron las capas del producto de áreas quemadas MCD64A1 generado a partir de imágenes MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de 500 m de resolución.

Se calculó la recurrencia anual de áreas quemadas a partir de este producto. A partir de esta información se generaron las estadísticas descriptivas de ocurrencia de incendios forestales por municipio y áreas de manejo forestal dentro del área de estudio que ya se presentó en la sección anterior. Este mismo producto fue utilizado para construir áreas sin ocurrencia de incendios a lo largo de 21 años. Con este mismo propósito y con la idea de no subestimar alguna región, se utilizaron los focos de calor de MODIS descargados de FIRMS (Fire Information for Resource Management System)⁴ ambos coinciden el rango temporal de 21 años. Encontrar áreas en las cuales no se hayan detectado ninguna ocurrencia de fuego es muy importante para entrenar el modelo; ya que es fundamental determinar el comportamiento del juego de variables que pueden explicar la ausencia de áreas quemadas dentro el área de estudio.

El juego de variables seleccionadas para este estudio fue seleccionadas basadas en la pertinencia de explicar la ocurrencia de incendios forestales de la región, específicamente con intensidades de fuego altas en coberturas boscosas dentro del área de estudio. Se revisaron la disponibilidad de estas variables en la plataforma Google Earth Engine (GEE). Como se mencionó antes, las variables provienen de sensores remotos y están vigentes en la plataforma de GEE.

Se seleccionaron 12 variables espaciales con diferentes resoluciones espaciales y temporales (tabla 1). Estas variables se agruparon en i) Combustibles donde se encuentran los valores de biomasa y los estrados de vegetación como forestal y herbáceas; ii) Clima, donde se calcularon promedios mensuales de la época seca de precipitación y temperatura; iii) Ambiental, que consta de modelo de elevación digital, índice de posición topográfica y humedad del suelo; iv) Socioeconómicas, basadas en proximidad a áreas deforestadas, caminos además de un análisis de recurrencia histórica de áreas quemadas de los últimos 20 años. A continuación, se presentan las variables seleccionadas con los detalles en cuanto a unidades, resolución espacial, temporalidad seleccionada para el estudio y la fuente de los datos (tabla 1).

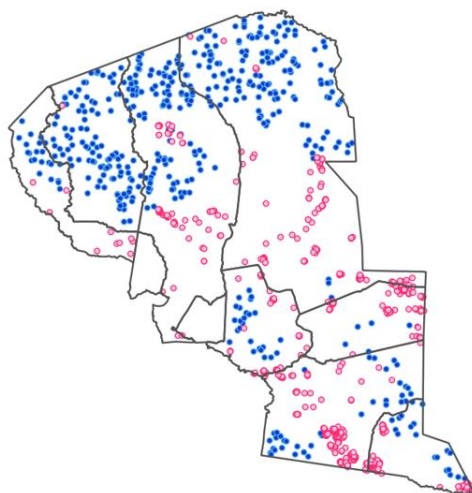
Tabla 1. Variables seleccionadas para el modelo de riesgo de incendios forestales

Categoría	Variable	Unidad	Resolución	Temporalidad	Fuente
Combustible	Biomasa	Mg/Ha	500 m	2012	WHRC
	Proporción estrato forestal	Porcentaje	250 m	2018-2020	MOD44B
	Proporción estrato de herbáceas	Porcentaje	250 m	2018-2020	MOD44B
Clima	Temperatura promedio época seca	Kelvin	~11.000 m	2018-2020	ERA5-Land
	Precipitación mediana época seca	Milímetros	~5.000 m	2018-2020	CHIRPS
	Precipitación promedio época	Milímetros	~5.000 m	2018-2020	CHIRPS

⁴ <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>

	seca				
Ambiental	Modelo de Elevación	m.s.n.m	90 m	2010	MERIT DEM
	Índice de posición topográfica	Metros	270 m	2010	SRTM DEM
	Humedad del suelo	Milímetros	10000 m	2018-2020	SMAP
Socioeconómicas	Deforestación	Distancia en metros	30 m	2001-2020	MapBiomass/ FAN
	Caminos	Distancia en metros	100 m	2001-2018	FAN
	Recurrencia histórica de Áreas quemadas	Años	500 m	2001-2020	MCD64

Antes de correr el modelo de riesgo de incendios forestales en GEE, se re-escalaron todas las variables a una resolución de 100 metros y se eliminaron los píxeles considerados como “no bosque” utilizando la capa de MapBiomass⁵. Los focos de calor de MODIS fueron filtrados según la estimación de intensidad de fuego y el grado de confiabilidad. Para ser introducido en el modelo, fueron seleccionados focos de calor con una intensidad o FRP (Fire Radiative Power) mayor a 50 MegaWatts y que tengan una confiabilidad alta. El periodo de entrenamiento del modelo fue de 3 años (2018 a 2020) y el periodo de validación fue para el 2021. Para correr la estimación de exactitud del modelo se aplicaron los mismos criterios antes explicados. En la figura 4, se presenta la distribución aleatoria de puntos de ausencia de fuego y en color rosa la ocurrencia de focos de calor de alta intensidad y valores altos de confiabilidad.



Focos de calor 2021

- 734 focos de calor > 50 alta intensidad
- 1212 puntos de no ocurrencia de fuego

Figura 4. Validación de modelo de riesgo de incendios forestales

⁵ <https://amazonia.mapbiomas.org/>

5. Riesgo de incendios forestales

El resultado del modelo muestra que la variable más importante para explicar la ocurrencia de incendios forestales es la proximidad a predios deforestados. Le sigue la proporción de bosque remanente, la recurrencia anual de área quemadas, el modelo de elevación digital y la biomasa como carga combustible. En la figura 5, se presentan todas las variables utilizadas el valor de aporte al modelo.

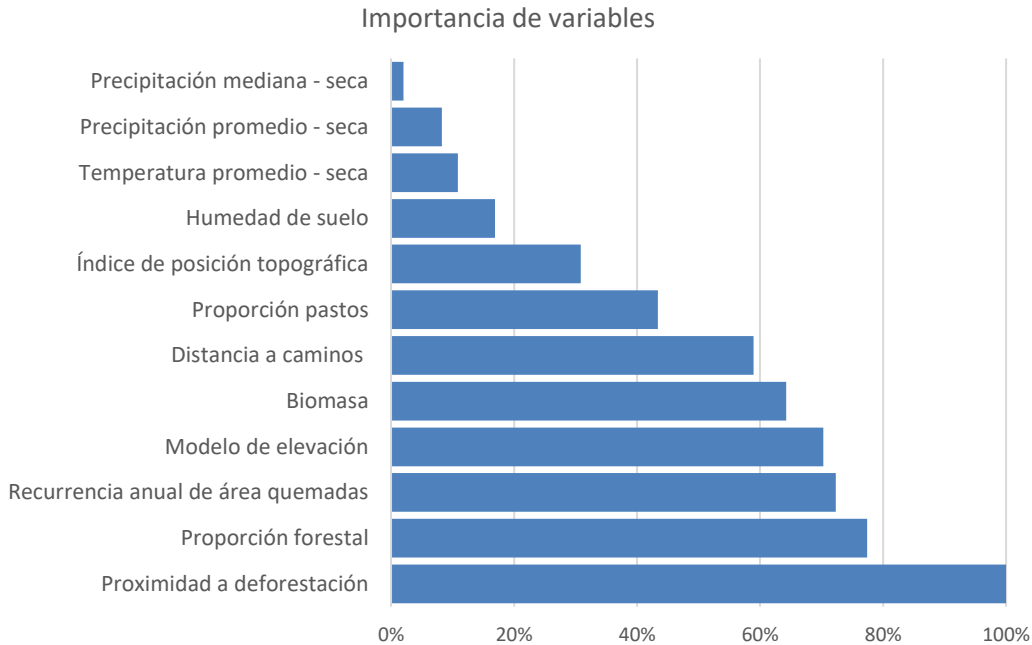


Figura 5. Importancia de variables para el modelo de riesgo de incendios forestales.

El mapa de riesgo de incendios forestales propuesto ha mostrado un valor de exactitud global del 94% y un índice Kappa de 0.85 dando por satisfactorio este resultado (figura 6). Las áreas con mayor riesgo en categorías de muy alto a extremo se concentran en el municipio de San Ignacio de Velasco, Concepción y en San José de Chiquitos y Roboré. Como ya mencionamos antes, estas categorías de riesgo se presentan predominantemente en proximidades de polígonos deforestados y en áreas con una recurrencia anual alta.

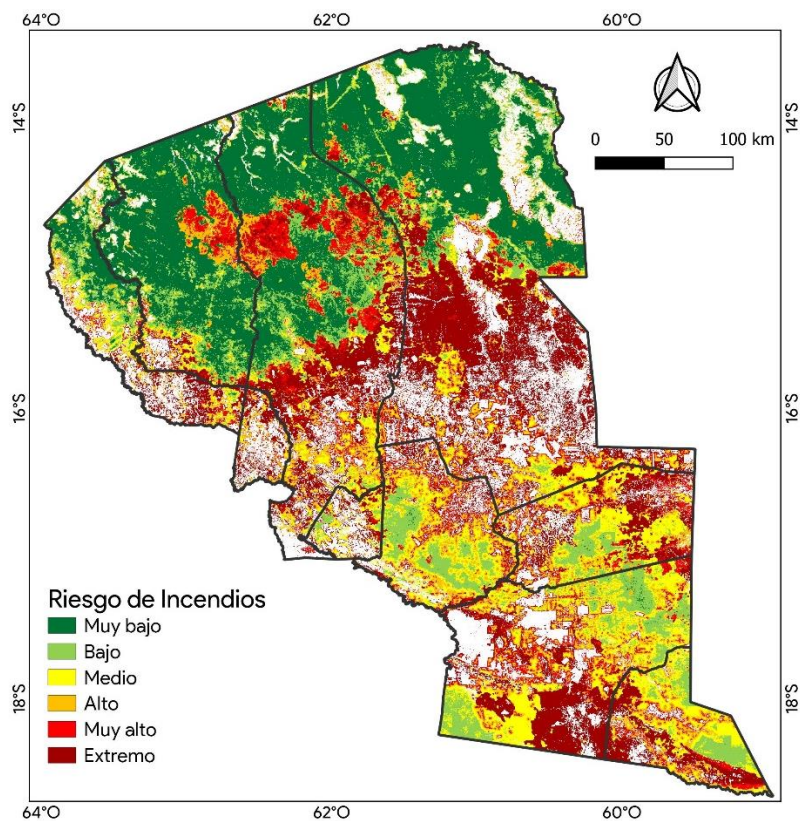


Figura 6. Mapa de riesgo de incendios forestales

Dentro de PGMF las categorías de riesgo alto a extremo se presentan predominantemente en predios pequeños (menor a 20 mil hectáreas) sitios A y B (figura 7). Los PGMF con riesgos entre medio y muy alto se concentran en los municipios de Lomerío, San Miguel, San Rafael, San José de Chiquitos y Roboré. Los PGMF más alejados de centros poblados y de áreas deforestadas (sitio C, D) presentan en general valores de riesgo medio a bajo. Estos PGMF además de estar alejados de predios deforestados están en cobertura boscosa mucho más húmeda (bosque denso siempre verde) comparándolos con la región central del área de estudio.

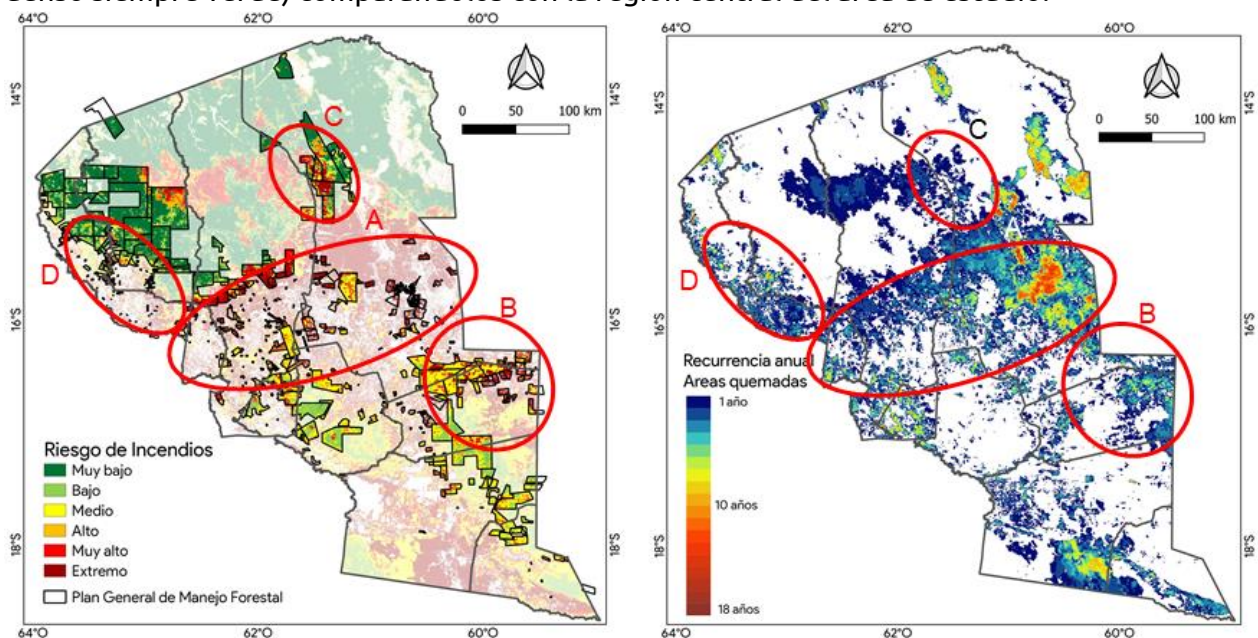


Figura 7. Riesgo de incendios forestales en planes de manejo forestal, recurrencia anual de áreas quemadas.

Los municipios de Roboré, San Antonio de Lomerío, San Jose de Chiquitos, San Miguel, San Rafael presentan riesgo de incendios mayores a riesgo “Bajo”. San Javier muestra riesgo mayor a “Medio”. Los municipios de Asunción de Guarayos, Concepción, San Ignacio de Velasco y Urubicha presentan áreas con categoría de riesgo “bajo” a “muy bajo”. Estas áreas se presentan en la zona norte del área de estudio y en tipos de vegetación de Bosque denso siempre verde a bosque denso deciduo (figura 6 y 8).

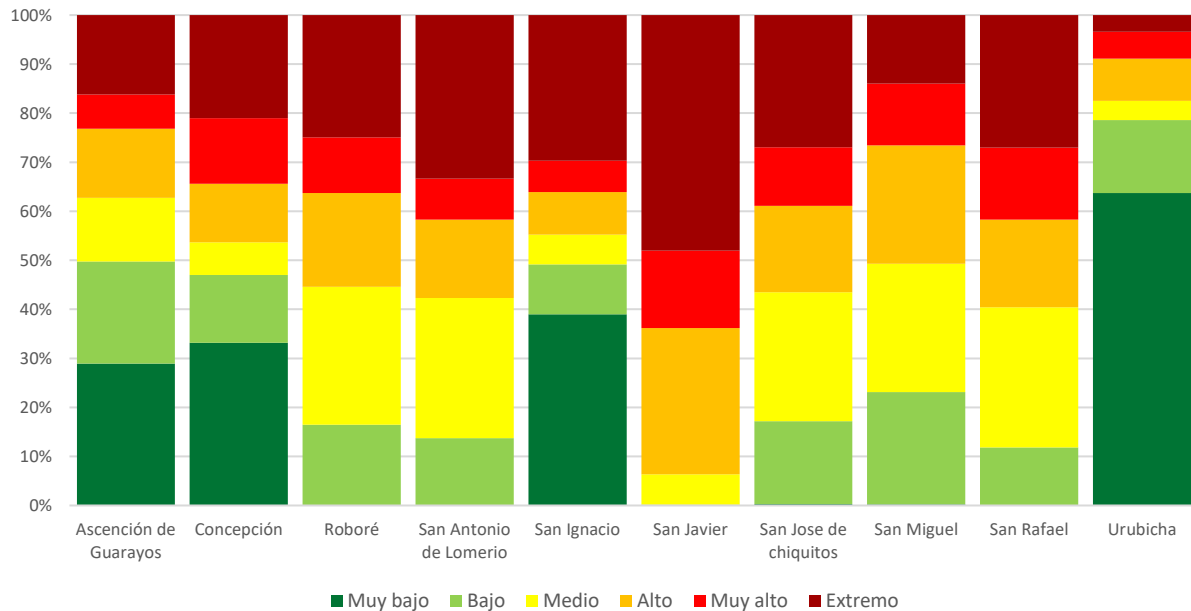


Figura 8. Proporción de categorías de riesgo de incendios forestales por municipio.

Las proporciones mayores en categorías de riesgo alto a extremo se concentran en los Bosques ralos deciduos, y en los Bosques xeromorfoicos. Estos bosques se concentran en la región sur del área de estudio principalmente en los municipios de San Jose de Chiquitos y Roboré.

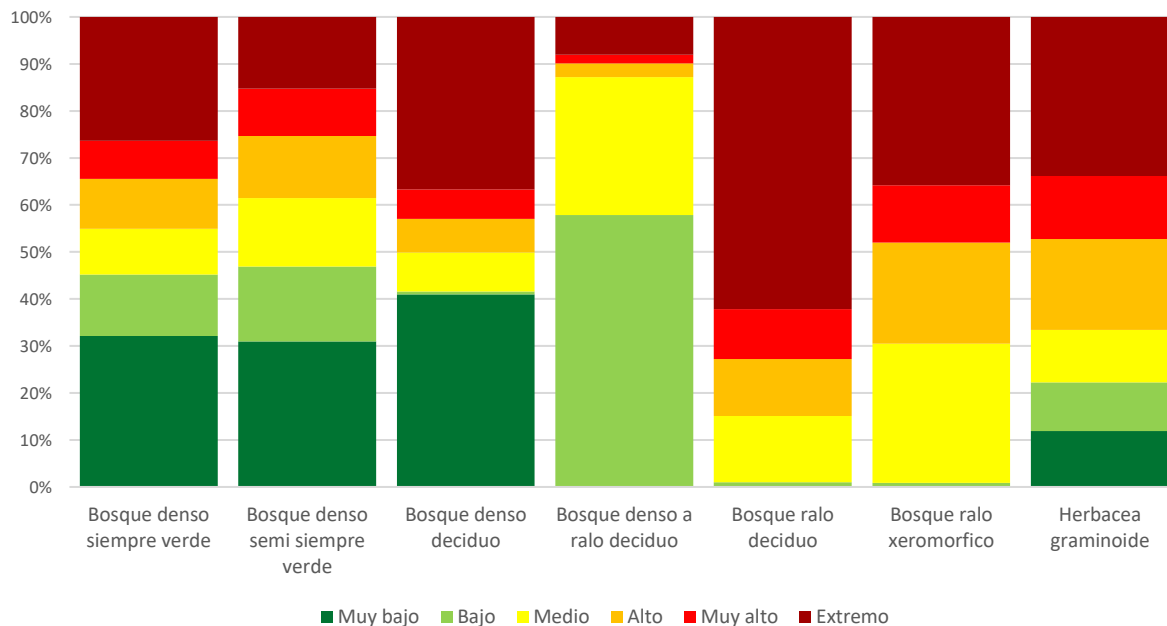


Figura 9. Proporciones de riesgo de incendios forestales por tipos de vegetación.

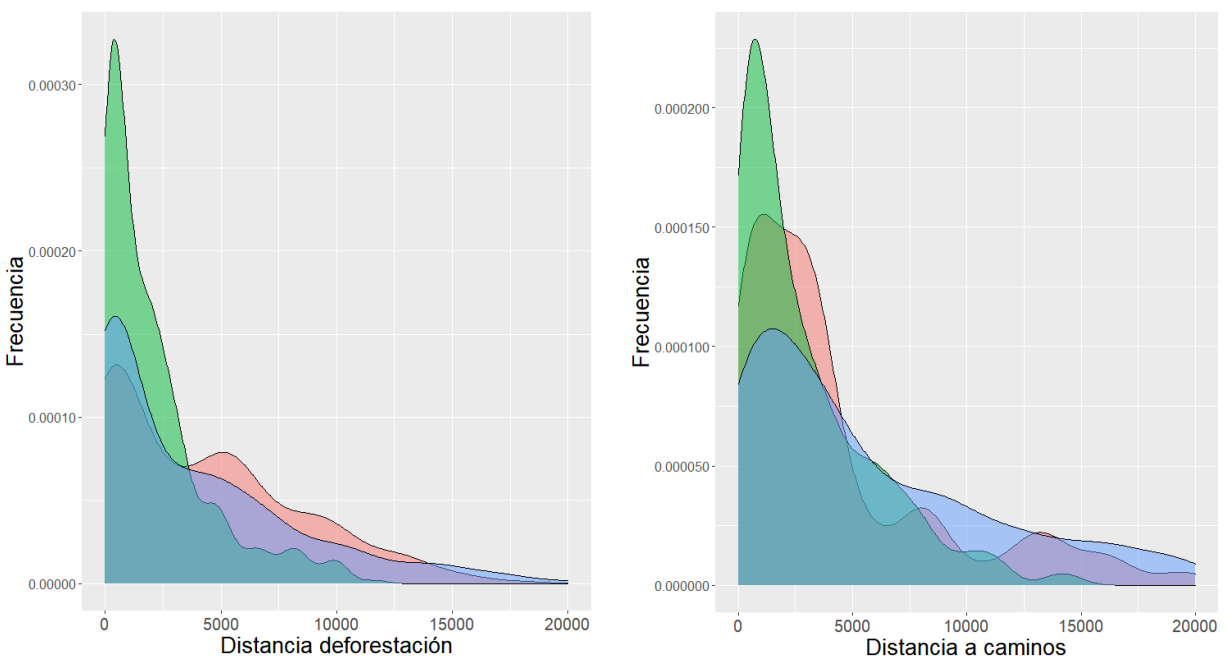
6. Influencia de la recurrencia anual de area quemadas en el riesgo de incendios forestales

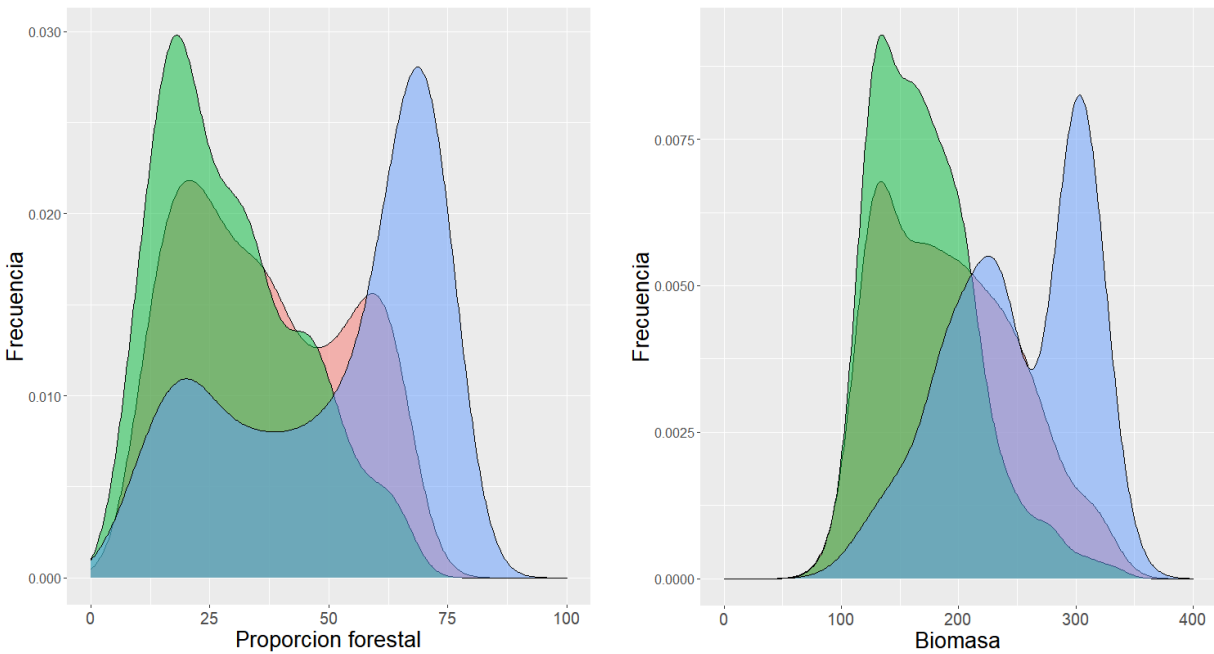
Con la finalidad de observar el comportamiento de la recurrencia de los incendios forestales sobre las variables empleadas en el modelo se utilizaron los puntos de entrenamiento del modelo y se extrajeron los valores de cada variable. Las áreas quemadas una sola vez se mantuvieron separadas y se asignó la categoría de “quema nueva”, todos los valores de recurrencia mayor a un año se agruparon en la categoría de “quema recurrente” y la categoría “sin quema” corresponde los puntos de entrenamiento utilizados en el modelo donde no se registró ninguna actividad de fuego.

Las quemas recurrentes se encuentran concentradas muy próximas a las áreas deforestadas llegando hasta una distancia de 5 kilómetros. Similar comportamiento se observa en las áreas con respecto a la proximidad a caminos, en este caso llegan a 15 kilómetros. Las áreas que se queman por primera vez se detectan con mayor frecuencia cerca de caminos, predominantemente en distancias menores a los 5 kilómetros (figura 10).

La ocurrencia de áreas nuevas se concentra en proporciones menores al 75% de bosque. Y las áreas recurrentes en valores menores al 50%. Un comportamiento similar se puede observar en la distribución de biomasa. Las áreas recurrentes se concentran en valores de 100 a 250 Toneladas por hectárea. Y las áreas nuevas se extienden hasta las 350 Toneladas por hectárea (figura 10).

Áreas sin quema se concentran en valores altos de biomasa y en proporciones de bosque altos. Valores mayores a 250 Toneladas por hectárea y en proporciones mayores a 60% respectivamente (figura 10).





Distancia deforestación, caminos en metros. Proporción forestal en porcentaje y biomasa en toneladas por hectárea.

- Quema nueva
- Quema recurrente
- Sin quema

Figura 10. Frecuencia de recurrencia de áreas quemadas para las principales variables del modelo de riesgo. (distancia deforestación, Biomasa, proporción forestal).

7. Conclusiones y recomendaciones

El modelo propuesto obtuvo 94% de exactitud global al momento de compararlo con los incendios activos del 2021. Valores mayores al 80% son considerados como aceptables para este tipo de modelos. El modelo permitiría actualizar el juego de variables para realizar nuevas corridas ya sean estos con la finalidad de ajuste o para tomar encuentra otras, por supuesto en función de la disponibilidad de nueva información.

Las variables climáticas no mostraron un buen desempeño al momento de explicar la ocurrencia de incendios forestales en la región. En cambio, las variables “socioeconómicas” tales como proximidad a deforestación, recurrencia histórica de áreas quemadas y la proximidad a caminos mostraron que estas variables ayudan a identificar las probabilidades altas de riesgo de incendios forestales. Esto responde al tipo de modelo estático que se planteó en este estudio y a la resolución espacial del modelo. Las condiciones climáticas variantes juegan un papel más importante cuando se trata de modelos de pronóstico diario (dinámico).

Contar con información que describa la disponibilidad de combustible en la región ayudo a identificar mejor las áreas de riesgo. Este segundo grupo de variables ha mostraron también una mayor relevancia al explicar la ocurrencia de incendios forestales. Aparentemente la disponibilidad de combustibles livianos en el bosque permite la entrada recurrente del fuego. Por otro lado, la ocurrencia de nuevas áreas de quema ocurre en proporciones de bosque menor al 75% y biomasa media (de 100 a 250 Tn/ha).

El riesgo alto a extremo de incendio se concentra en los municipios de San Ignacio de Velasco y Concepción en tipos de vegetación decidua. Se ha observado que los PGMF se concentran en los municipios de Concepción, San Ignacio de Velasco y San Rafael. Que además los PGMF menores a 200 mil hectáreas concentran los valores de riesgo de alto a extremo. Los PGMF con superficies mayores registran menor proporción de estas categorías de riesgo. De esta forma se podrían priorizar las PGMF para dirigir acciones de prevención de la ocurrencia de incendios forestales.

Estudios de campo han demostrado que la recurrencia de fuego en vegetación que no está adaptada el fuego se torna más susceptible al fuego. Este comportamiento degrada enormemente la cobertura vegetal, en especial si se trata de bosque. En este estudio se ha determinado que el 46% (2.5 millones de hectáreas) de las áreas quemadas corresponde a cicatrices de quema que se quemaron una sola vez a lo largo de 21 años.

Una vez identificada la región de priorización de riesgo de incendios forestales, se recomienda incorporar en el análisis las capas de recurrencia de áreas quemadas. De esta forma se podrían identificar áreas más degradadas (cambios estructurales y de composición) o por el contrario priorizar áreas que requieran asistencia para su recuperación o restauración (vegetación) dentro de un PGMF.

La resolución espacial de los resultados obtenidos en este estudio podrían mejorar al contar con información más detallada. Para este propósito se requerirá contar con información espacial de patios de acopio, caminos de extracción, así como la temporalidad y volúmenes de extracción de madera en cada PGMF. Con información se tendrá una mayor aproximación características en cuánto a disponibilidad de combustible forestal, de tal forma que se pueda estimar mejor intensidad del fuego.

En proximidades a PGMF que tengan categorías de riesgo alto a extremo que coincidan con una recurrencia alta de áreas quemadas, se podrían diseñar y ejecutar quemas prescritas para reducir la carga combustible circundante y minimizar los riesgos de incendios forestales.

8. Referencias bibliográficas

Baccini, A. G. S. J., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., ... & Houghton, R. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature climate change*, 2(3), 182-185.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 1-21.

Yamazaki, D., Ikeshima, D., Tawatari, R., Yamaguchi, T., O'Loughlin, F., Neal, J. C., ... & Bates, P. D. (2017). A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 44(11), 5844-5853.

Theobald, D. M., Harrison-Atlas, D., Monahan, W. B., & Albano, C. M. (2015). Ecologically-relevant maps of landforms and physiographic diversity for climate adaptation planning. *PloS one*, 10(12), e0143619.

Mladenova, I.E., Bolten, J.D., Crow, W., Sazib, N. and Reynolds, C., (2020). Agricultural drought monitoring via the assimilation of SMAP soil moisture retrievals into a global soil water balance model. *Front. Big Data*, 3(10). doi:10.3389/fdata.2020.00010 Article

Gigović, L., Pourghasemi, H. R., Drobnjak, S., & Bai, S. (2019). Testing a new ensemble model based on SVM and random forest in forest fire susceptibility assessment and its mapping in Serbia's Tara National Park. *Forests*, 10(5), 408.

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. *R news*, 2(3), 18-



Instituto Boliviano de Investigación Forestal
Barrio Las Palmas. Av. Ibérica, Calle 6 - N° 39
www.ibifbolivia.org.bo
Santa Cruz, Bolivia.

Con el apoyo de:

