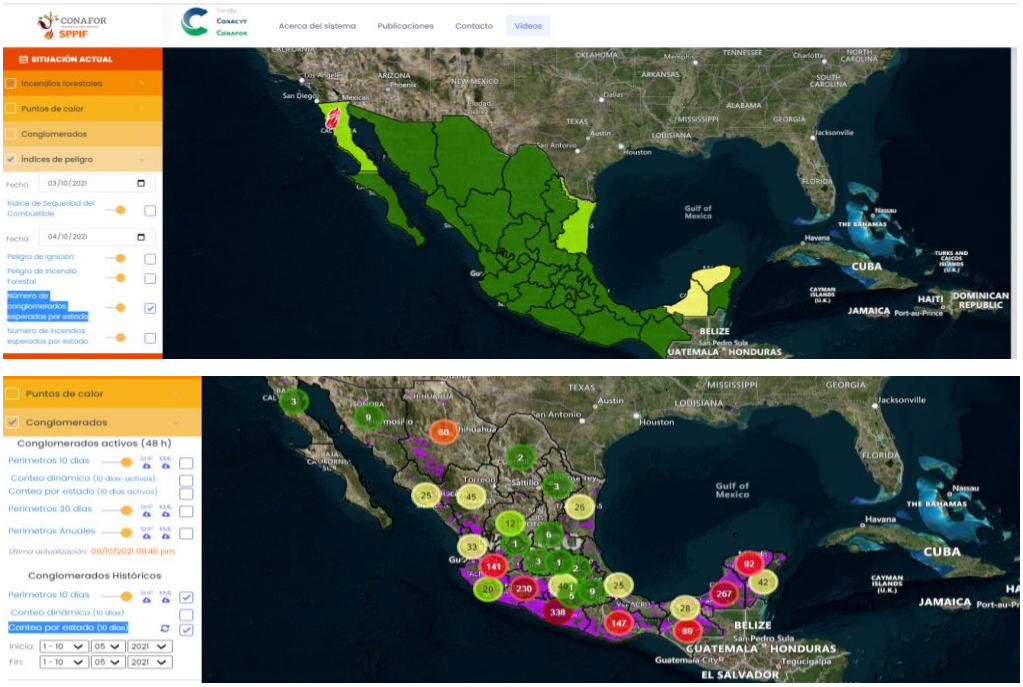
Anexo 1. Informe técnico del desarrollo de un índice de pronóstico del número de conglomerados de puntos de calor esperados por estado.



Informe del Proyecto "Reforzamiento al Sistema Nacional de Predicción de Peligro de Incendios Forestales de México para el pronóstico de conglomerados y área quemada", con clave B-S-131553, convocatoria CONAFOR-2018-C02

Fondo Sectorial para la Investigación, el Desarrollo y la Innovación Tecnológica Forestal CONAFOR-CONACYT

Autores: Dr. Daniel José Vega Nieva, Dr. Jaime Briseño Reyes, Mc. Carlos Briones Herrera, Dr. Pablito Marcelo López Serrano, Dr. José Javier Corral (FCF-UJED), Dr. Ernesto Alvarado (U. Washington), Dr. Robert Burgan, Dr. William Matthew Jolly (USDA Forest Service).

RESUMEN.

El desarrollo del mapeado automatizado de perímetros de conglomerados de puntos de calor (Briones-Herrera t al., 2020), en la primera etapa del proyecto de reforzamiento del sistema de peligro, abrió la puerta para una caracterización sistemática de la ocurrencia de todos los grandes incendios en México, incluyendo todas las áreas con presencia de fuego detectado por MODIS y VIIRS en terrenos forestales, disponibles desde el año 2012 hasta la fecha.

Se ha incluido en la segunda etapa del reforzamiento del sistema una herramienta de conteo automatizado que permite visualizar el número de conglomerados de puntos de calor observados por estado, permitiendo apoyar las labores de monitoreo y atención de incidentes de posibles incendios forestales. El conteo del número de conglomerados de puntos de calor observados por estado está disponible en tiempo real, así como para el periodo histórico 2012-fecha actual.



Conteo de número de conglomerados históricos por estado en el sistema de peligro.

A partir de los históricos disponibles de conglomerados de puntos de calor y del índice de sequedad del combustible (Vega-Nieva et al. 2017), se ha desarrollado un índice para el pronóstico del número de conglomerados de puntos de calor esperados por estado. El índice muestra el pronóstico del número de conglomerados esperados por estado para los próximos 10 días, en base al pronóstico del índice de sequedad, así como al número de conglomerados observados por estado en los últimos diez días.

Se resumen en el presente informe los métodos y resultados para el desarrollo del índice de pronóstico del número de conglomerados de puntos de calor esperados por estado. El índice se encuentra operativo, calculándose cada día a las 8.30 am, en la sección **Situación Actual-> Índices de Peligro-> Número de conglomerados esperados por estado** del sistema de predicción de peligro de incendios forestales (http://forestales.ujed.mx/incendios2/).

En el anexo al final del presente documento (Anexo 1.1.) se muestran, para cada uno de los 32 estados de la república mexicana, los valores observados y predichos del número de conlgomerados de puntos de calor por estado para el período 2012-2020.

Se incluye asimismo el código y la documentación del mismo en el **Anexo 1.2.** "Documentación y código del índice de pronóstico del número de conglomerados de puntos de calor esperados por estado".

INTRODUCCIÓN.

Los índices satelitales de humedad del combustible permiten monitorear la evolución del riesgo de ocurrencia de incendio (e.g. Lozano et al. 2008; Chuvieco et al. 2010; Yebra et al. 2013), incluyendo la predicción del número esperado de incendios (e.g. Wotton,et al., 2003, 2010; Preisler et al. 2004, 2007, 2014), lo que permite mejorar la toma de decisiones operacionales de manejo del fuego (e.g. Preisler et al. 2011; Mavsar et al. 2013; Rodríguez y Silva et al. 2014). Uno de los índices más utilizados operacionalmente que integran información satelital y meteorológica es el índice FPI (Burgan et al. 1998), que combina la humedad del combustible muerto (Fosberg and Deeming 1971) con imágenes de NDVI para expresar la humedad relativa del combustible muerto y vivo y el riesgo asociado de ocurrencia de incendio. El índice FPI ha sido empleado para predecir la ocurrencia de incendios en USA (Burgan et al. 1998; Preisler and Westerling 2007; Preisler et al. 2009; Preisler et al. 2015) y Europa (Sebastian-Lopez et al. 2002), incluyendo España (Huesca et al. 2007; Huesca et al. 2009; Huesca et al. 2014).

En México, en el marco del desarrollo del sistema nacional de peligro de predicción de incendios forestales, se ha realizado una calibración operacional del índice FPI para los tipos de combustibles del país (Vega-Nieva et al., 2017), mostrada diariamente en la sección de índices de peligro -> Índice de Sequedad del Combustible, del sistema de peligro. A partir de ese índice de sequedad del combustible, se han desarrollado modelos para predecir el peligro de ignición por tipo de combustible y región del país (Vega-Nieva et al., 2017), así como modelos para pronosticar el número de incendios por estado (Vega-Nieva et al., 2018, 2019), que se muestran en la sección de índices de peligro del mencionado sistema.

Se han desarrollado recientemente, en el marco del proyecto de reforzamiento al sistema de peligro, algoritmos automatizados para el mapeado del perímetro de los conglomerados de puntos de calor MODIS y VIIRS (Briones-Herrera et al., 2020). Los perímetros de conglomerados se encuentran disponibles, actualizados con cada paso del satélite en tiempo casi real, en la sección "**Conglomerados- Conglomerados activos**" del sistema de peligro. (http://forestales.ujed.mx/incendios2/). En la primera etapa del reforzamiento del sistema en 2020 se incluyó un conteo dinámico, siendo el primer sistema de peligro del mundo que realiza un conteo automatizado de los perímetros de conglomerados de puntos de calor. Se ha incluido, asimismo, en la segunda etapa del proyecto de reforzamiento del sistema en 2021, la opción "**Conteo por estado**" que muestra el número de conglomerados activos (con presencia de puntos de calor en las últimas 48 h) por estado.



Conteo de número de conglomerados activos observados por estado en el sistema de peligro.

Se ha incluido asimismo en la segunda etapa del reforzamiento del sistema de peligro una opción de consulta del conteo por estado para los perímetros de conglomerados de puntos de calor históricos, disponibles para 2012-2021, en la sección de **Conglomerados-> Conglomerados históricos.**



Conteo de número de conglomerados históricos por estado en el sistema de peligro. El ejemplo muestra el conteo de conglomerados del 1-10/05/2021.

Para hacer la consulta, el usuario debe hacer la consulta, y clicar en el botón para refrescar (ubicado a la derecha de "**Conteo por estado**").

La disponibilidad de históricos de perímetros de incendios, delimitados a partir de los conglomerados de puntos de calor, permite ofrecer un registro sistemático de relativamente larga duración de actividad de incendios en el país. Una posible ventaja del uso de conglomerados de puntos de calor es la cuantificación del número de eventos con presencia del fuego en áreas forestales para los que no se contaba previamente registros, por la ausencia de combate o de registros del mismo en el histórico de coordenadas de incendios. Si bien se cuenta con modelos predictivos del número de incendios esperados por estado, calibrados con los registros de incendios combatidos por estado (Vega-Nieva et al., 2018), estos podrían subestimar la actividad de incendios, comparados con los registros de conglomerados de puntos de calor, en estados donde la presencia de incendios haya rebasado puntualmente la capacidad de atención de incidentes, o no se haya contado con condiciones que posibiliten el combate. Por el contrario, los conglomerados de puntos de calor incluirán todos los eventos de actividad de fuego en terrenos forestales con suficiente superficie para ser detectados por los puntos de calor, ayudándonos a caracterizar de una manera sistemática la actividad de fuego en el país.

En el presente estudio se desarrollaron modelos para la predicción del número de conglomerados de puntos de calor por estado a partir del índice de sequedad de combustible y del número de conglomerados previos observados, calibrado con los históricos de conglomerados de puntos de calor MODIS y VIIRS del periodo 2012-2020. Los resultados se han incluido en la sección de índices de peligro-> número de conglomerados esperados por estado del sistema de peligro.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Conglomerados de puntos de calor.

Se utilizaron los perímetros de conglomerados calculados según la metodología de Briones-Herrera et al. (2020), a partir de los puntos de calor MODIS y VIIRS. Se analizaron todos los conglomerados de 10 días en el periodo 2012-2020, disponibles en la sección de Conglomerados-> históricos del sistema de peligro (http://forestales.ujed.mx/incendios2/).

Se calculó para cada estado el número de conglomerados de puntos de calor de 10 días (NCPC), mediante una intersección de los mismos con la capa de estados de la república mexicana.

Índice de sequedad de combustible.

Se emplearon los históricos del índice de sequedad de combustible del periodo 2012-2020, disponibles en la sección de índices de peligro del sistema de peligro. El índice es una calibración para los tipos de combustible de México del índice FPI de Burgan (1998), según la metodología descrita en Vega-Nieva et al. (2017). Se calculó para cada estado el índice de sequedad de combustible promedio acumulado en 50 días, por haber demostrado la mayor capacidad predictiva para pronosticar el número de incendios por estado (Vega-Nieva et al., 2018).

Modelos de predicción del número de conglomerados esperados por estado.

Para cada uno de los 32 estados de la república de México, se ajustaron modelos para el pronóstico de número de conglomerados de puntos de calor a partir del pronóstico del índice de sequedad del combustible acumulado en 50 días (FDI50), así como del número de conglomerados de puntos de calor observados en los 10 días anteriores, según la metodología de Vega-Nieva et al. (2017), tal y como se muestra en la ecuación 1:

$$NCPC_{ij} = a \cdot FDI50_{ij}^{\ b} + c \cdot NCPC_{i\text{-}10\,j} \qquad (1)$$

Donde:

$NCPC_{ij}$: Número de conglomerados de puntos de calor esperado por periodo de 10 días *i* en el estado *j;*

$FDI50_{ij}$: Índice de sequedad promedio de 50 días por periodo de 10 días *i* en el estado *j ;*

$NCPC_{i\text{-}10\,j}$: Número de conglomerados de puntos de calor observado en los 10 días anteriores *i* -10 en el estado *j;*

a, b y c son coeficientes del modelo.

Los modelos se ajustaron mediante regresión no lineal percentílica, empleando el percentil 90, mediante el paquete *quantreg* en R. Esta metodología ha mostrado potencial en estudios previos para estimar la densidad de puntos de calor por tipo de combustible (Vega-Nieva et al., 2017), así como el número de registros de combates de incendio por estado (Vega-Nieva et al., 2018).

Se evaluó la bondad de ajuste de los modelos mediante su coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE) y sesgo (Bias).

RESULTADOS.

Modelos de pronóstico del número de conglomerados esperados por estado.

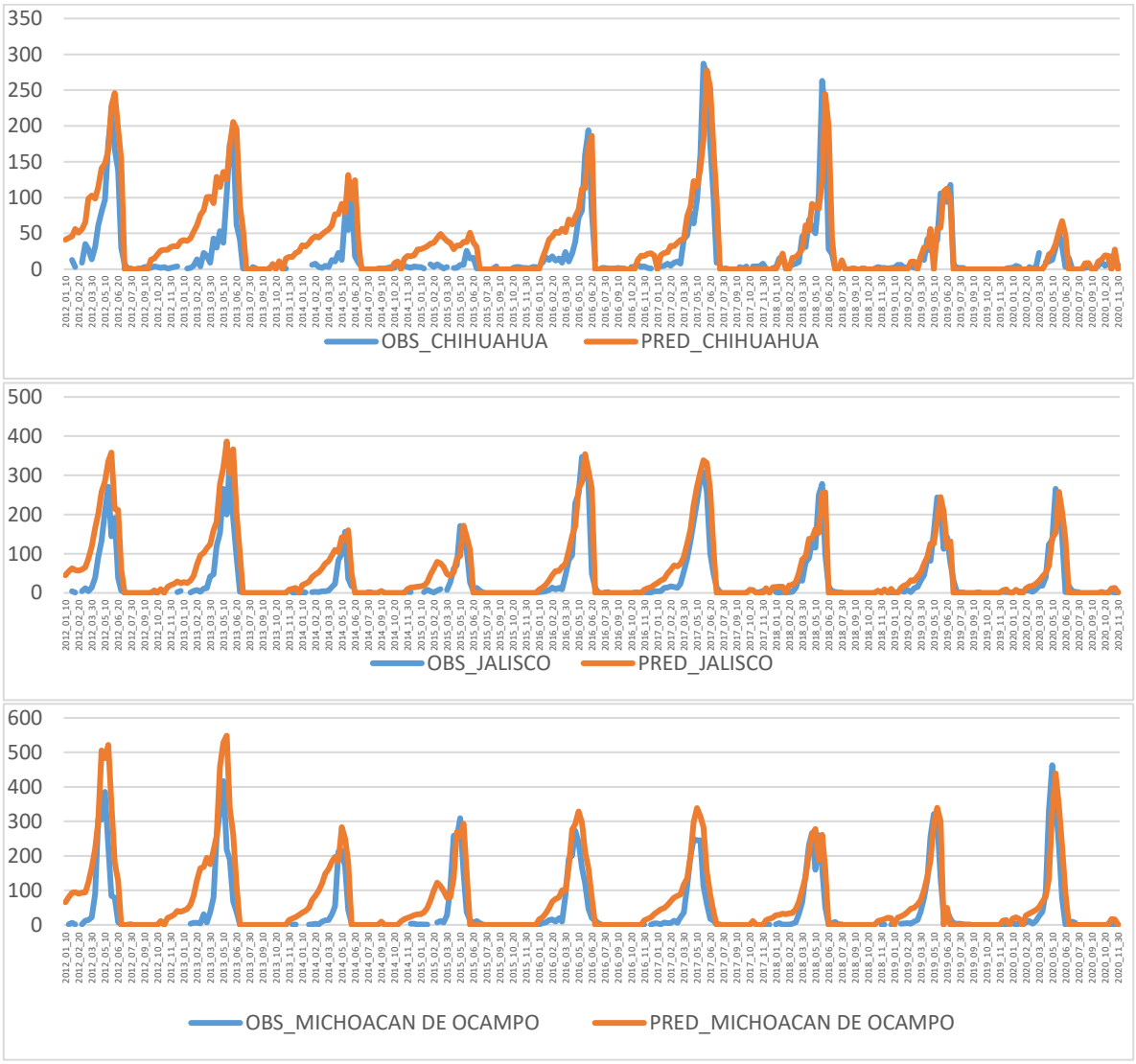
Los coeficientes y bondad de ajuste de los modelos para predecir el número de conglomerados esperados por estado se muestran en la Tabla 1.

Estado	a	b	c	R^2	RMSE	Bias
Campeche	0.248	0.109	0.758	0.574	104.6	-62.7
Chiapas	0.178	0.110	0.724	0.521	91.9	-54.5
Chihuahua	0.444	0.064	0.802	0.665	41.0	-23.1
Coahuila	0.163	0.057	0.644	0.411	6.7	-4.7
Colima	0.716	0.040	0.607	0.353	8.6	-6.9
Ciudad de México	1.703	0.058	0.518	0.169	19.1	-0.1
Durango	3.842	0.042	0.774	0.591	69.9	-48.2
Guanajuato	0.054	0.070	0.399	0.193	6.8	3.9
Guerrero	5.118	0.052	0.798	0.618	166.7	-114.0
Hidalgo	2.648	0.064	0.785	0.530	148.3	-87.6
Jalisco	0.454	0.074	0.823	0.722	65.4	-37.2
México	2.363	0.039	0.620	0.331	22.7	-0.1
Michoacán	0.926	0.069	0.828	0.677	91.6	-56.0
Morelos	5.829	0.023	0.304	0.138	17.8	-15.8
Nuevo León	0.461	0.045	0.053	0.101	6.6	-4.9
Nayarit	1.776	0.051	0.729	0.576	42.9	-23.8
Oaxaca	0.104	0.106	0.768	0.553	74.9	-36.8
Puebla	0.577	0.045	0.570	0.302	8.7	-5.6
Querétaro	0.469	0.050	0.387	0.160	9.8	-8.9
Quintana Roo	0.118	0.098	0.701	0.518	27.3	-15.0
Aguascalientes	2.528	0.025	0.000	0.117	2.5	9.4
San Luis de Potosí	0.151	0.063	0.597	0.418	9.2	-5.0
Tabasco	0.108	0.103	0.575	0.222	28.8	-14.6
Sinaloa	0.572	0.063	0.773	0.624	39.5	-27.0
Sonora	0.213	0.063	0.742	0.585	15.3	-10.8
Baja California	0.013	0.101	0.084	0.124	4.6	-5.2
Baja California Sur	0.006	0.090	0.171	0.103	3.9	-2.3
Yucatán	0.436	0.084	0.631	0.455	55.1	-35.9
Tamaulipas	0.933	0.044	0.510	0.343	10.1	-7.5
Tlaxcala	9.705	0.027	0.171	0.143	48.8	-0.1
Veracruz	0.096	0.090	0.675	0.419	16.1	-6.6
Zacatecas	0.062	0.070	0.495	0.210	10.7	-6.9

Tabla 1. Coeficientes y bondad de ajuste de los modelos para predecir el número de conglomerados esperados por estado. Donde: a, b y c son coeficientes del modelo (eq. 1); R^2: coeficiente de determinación; RMSE: error cuadrático medio; Bias: sesgo (unidades en número de conglomerados de puntos de calor).

Las bondades de ajuste variaron en R^2 de 0.72 a 0.1. Generalmente los mejores ajustes se observaron en estados con un alto número de conglomerados observado (i.e. Campeche, Chiapas, Chihuahua, Guerrero, Michoacán o Sinaloa), que son estados con alta actividad agrícola y donde se han registrado importante actividad de incendios (e.g. Vega-Nieva et al., 2017). Los ajustes más bajos se observaron para estados de baja superficie y con baja actividad de conglomerados, similar a los observado en previos análisis del número de incendios por estado en el periodo 2011-215 (Vega-Nieva et al., 2018). En futuros estudios se analizará la inclusión de variables adicionales, tales como el viento, para explicar la actividad de propagación de incendios forestales por estado y tipos de combustibles.

Se muestran algunos ejemplos de las predicciones del número de conglomerados esperados por estado, frente a los valores observados, para el periodo 2012-2020, en la figura 2. Los valores observados y predichos del número de conglomerados por estado para todos los estados se muestran en el anexo 1.

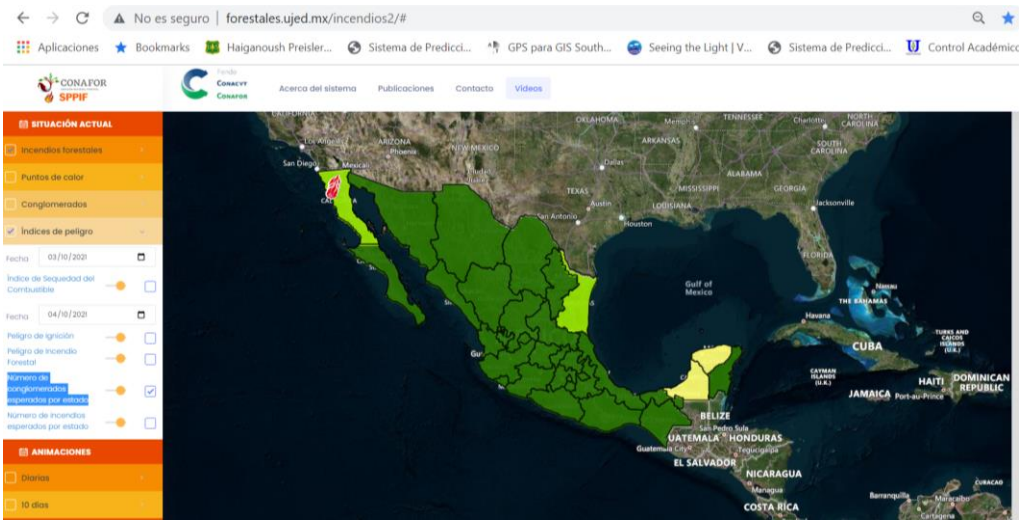


Número de conglomerados de puntos de calor observados y predichos en el período 2012-2020 para los estados de Chihuahua, Jalisco y Michoacán.

Integración del número de conglomerados esperados por estado en el sistema de peligro.

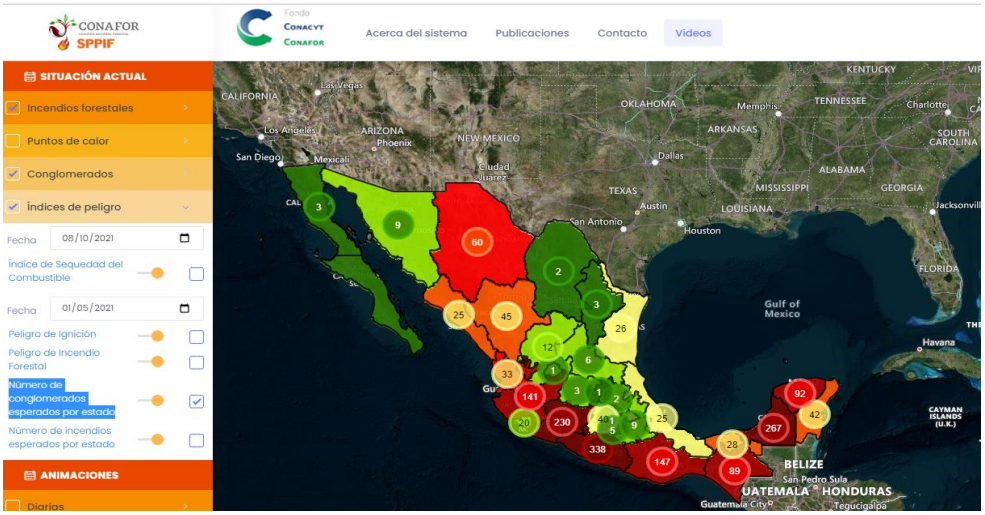
El mapa de **NCP.tif** se calcula diariamente a las 8 am, a partir de la última observación disponible de conglomerados de puntos de calor MODIS y VIIRS, y en base al último pronóstico del índice de sequedad acumulada FDIM50forecast disponible.

Se muestra diariamente en el sistema de peligro en la sección **Situación Actual-> Índices de Peligro-> <u>Número de conglomerados esperados por estado.</u>**



Número de conglomerados esperados por estado (04/10/2021).

Se encuentran disponibles para consulta todos los índices históricos del periodo 2012 a la fecha en la misma sección.



Consulta del número de conglomerados esperados por estado (1/05/2021) (pronóstico para el periodo 1-10/05/2021) (mapa de colores) y conteo de conglomerados observados por estado (mostrados en círculos) en el período del 1 al 10/05/2021 (los 10 días siguientes a la fecha del pronóstico).

REFERENCIAS.

Briones-Herrera, C.I.; Vega-Nieva, D.J.; Monjarás-Vega, N.A.; Briseño-Reyes, J.; López-Serrano, P.M.; Corral-Rivas, J.J.; Alvarado-Celestino, E.; ArellanoPérez, S.; Álvarez-González, J.G.; Ruiz González, A.D.; Jolly ,W.M.; Parks, S.A. 2020. Near Real-Time automated early mapping of the perimeter of large forest fires from the aggregation of VIIRS and MODIS active fires in Mexico. Remote Sensing, 12(12): 2061. https://doi.org/10.3390/rs12122061

Burgan, R.E., R.W. Klaver, and J.M. Klaver. 1998. Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. International Journal of Wildland Fire 8 (3): 159–170 https://doi.org/10.1071/WF9980159

Chuvieco, E., I. Aguado, M. Yebra, H. Nieto, J. Salas, M.P. Martín, L. Vilar, J. Martínez, S. Martín, P. Ibarra, J. de la Riva, J. Baeza, F. Rodríguez, J.R. Molina, M.A. Herrera, and R. Zamora. 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. Ecological Modelling 221: 46–58 https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017

Fosberg, M.A., and J.E. Deeming. 1971. Derivation of the 1- and 10-hour timelag fuel moisture calculations for fire-danger rating. USDA Forest Service Research Note RM-207. Fort Collins: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Research Station

Huesca, M., J. Litago, S. Merino-de-Miguel, V. Cicuendez-López-Ocaña, and A. Palacios-Orueta. 2014. Modeling and forecasting MODIS-based Fire Potential Index on a pixel basis using time series models. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 26: 363–376 https://doi.org/10. 1016/j.jag.2013.09.003.

Huesca, M., J. Litago, A. Palacios-Orueta, F. Montes, A. Sebastián-López, and P. Escribano. 2009. Assessment of forest fire seasonality using MODIS fire potential: a timeseries approach. Agricultural and Forest Meteorology 149: 1946–1955 https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.022.

Huesca, M., A. Palacios-Orueta, F. Montes, A. Sebastián-López, and P. Escribano. 2007. Forest Fire Potential Index for Navarra Autonomic Community (Spain). In Proceedings of the 4th Wildland Fire International Conference, Seville, Spain, 14–17 May 2007, ed. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

Lozano, F.J., S. Suarez-Seoane, and E. De Luis. 2008. A multi-scale approach for modeling fire occurrence probability using satellite data and classification trees: a case study in a mountainous Mediterranean region. Remote Sensing of Environment 112 (3): 708–719 https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.006

Preisler, H.K.; Brillinger, D.R.; Burgan, R.E.; Benoit, J.W. Probability based models for estimating wildfire risk. Int. J. Wildland Fire 2004, 13, 133–142.

Preisler, H.K.; Westerling, A.L. Statistical model for forecasting monthly large wildfire events in western United States. J. Appl. Meteorol. Clim. 2007, 46, 1020–1030.

Preisler, H.K.; Westerling, A.L.; Gebert, K.M.; Munoz-Arriola, F.; Holmes, T.P. Spatially explicit forecasts of large wildland fire probability and suppression costs for California. Int. J. Wildland Fire 2011, 20, 508–517.

Riley, K.L.; Abatzoglou, J.T.; Grenfell, I.C.; Klene, A.E.; Heinsch, F.A. The relationship of large fire occurrence with drought and fire danger indices in the western USA, 1984–2008, the role of temporal scale. Int. J. Wildland Fire 2013, 22, 894–909

Riley, K.; Stonesifer, C.; Calkin, D.; Preisler, H.K. Assessing predictive services' 7-day fire potential outlook. In Proceedings of the Large Wildland Fires Conference, Missoula, MT, USA, 19–23 May 2014; Keane, R.E., Jolly, M., Parsons, R., Riley, K., Eds.; Proc. RMRS-P-73. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA, 2015; pp. 188–195

Sebastian-Lopez, A., J. San-Miguel-Ayanz, and R.E. Burgan. 2002. Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluation of forest fire risk at the pan-European scale. International Journal of Remote Sensing 23 (13): 2713–2719 https://doi.org/10.1080/ 01431160110107761

Vega-Nieva, D.J., J. Briseño-Reyes, M.G. Nava-Miranda, E. Calleros-Flores, P.M. López-Serrano, J.J. Corral-Rivas, E. Montiel-Antuna, M.I. Cruz-López, M. Cuahutle, R. Ressl, E. Alvarado-Celestino, A. González-Cabán, E. Jiménez, J.G. Álvarez-González, A.D. Ruiz-González, R.E. Burgan, and H.K. Preisler. 2018. Developing models to predict the number of fire hotspots from an accumulated fuel dryness index by vegetation type and region in Mexico. Forests 9: 190 https://doi.org/10.3390/f9040190.

Vega-Nieva, D.J., Jaime Briseño, Norma Monjarás-Vega, Carlos Briones, Eric Calleros, Maria Guadalupe Nava Miranda, Pablito Marcelo, Javier Corral, Cruz-López, M.I.; Cuahutle, M.; Ressl, R.; Alvarado-Celestino, E.; González-Cabán, A.; Burgan, R.E.; Preisler, H.K. 2018. Módulo de análisis de peligro y riesgo de peligro y de incendios en México: cálculo del número de incendios esperados por estado. Informe del proyecto CONAFOR-CONACYT 252620 "Desarrollo de un sistema de predicción de peligro de incendios forestales para México". 12 pg.

Vega-Nieva, et al. 2019. The Forest Fire Danger Prediction System of Mexico. In: Proceedings for the 6th International Fire Behavior and Fuels Conference April 29 – May 3, 2019, Albuquerque, New Mexico USA. http://albuquerque.firebehaviorandfuelsconference.com/wp-content/uploads/sites/13/2019/04/DANIEL-JOSE-VEGA-NIEVA-Albuquerque.pdf

Wotton, B.M.; Martell, D.L.; Logan, K.A. Climate change and people-caused forest fire occurrence in Ontario. Clim. Chang. 2003, 603, 275–295

Wotton, B.M.; Nock, C.A.; Flannigan, M.D. Forest fire occurrence and climate change in Canada. Int. J. Wildland Fire 2010, 193, 253–271

Yebra, M., P.E. Dennison, E. Chuvieco, D. Riaño, P. Zylstra, R. Hunt, F.M. Danson, Y. Qi, and S. Jurdao. 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: moving towards operational products. Remote Sensing of Environment 136: 455–468 https://doi.org/10. 1016/j.rse.2013.05.029.