



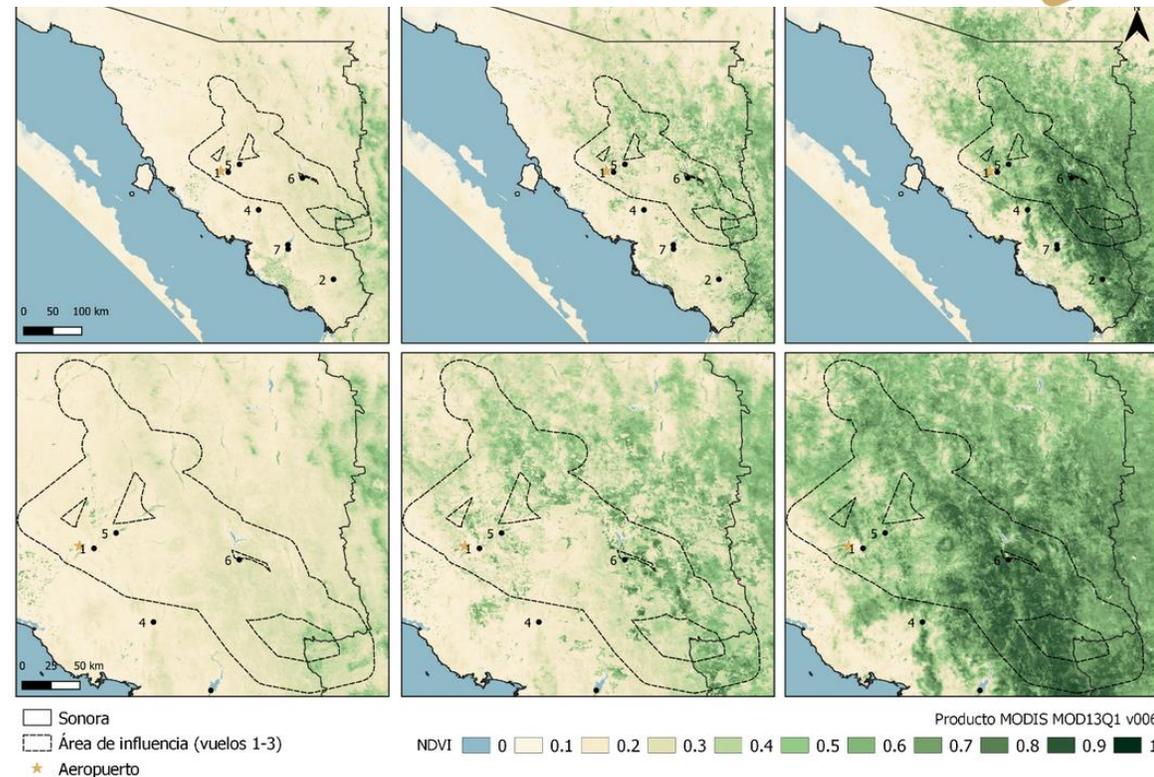
**VIII** Congreso Nacional y  
**I** Congreso Internacional  
de Riego, Drenaje y Biosistemas  
COMI - UAAAN 2023 | Saltillo, Coahuila  
4 al 6 octubre 2023



## MESA REDONDA: ESTIMULACIÓN DE LLUVIA: ¿MITO O REALIDAD?

Evaluación de la precipitación y su efecto con técnicas de sensores remotos

Ponente Invitado:  
Dr. B. Ricardo Eaton González  
M.C. Nadia Fernanda Siordia González



Fecha de presentación: 04 de octubre 2023





# Introducción

- ❖ Desde el año 2021 se comienza a evaluar sistemática y analíticamente los procesos de estimulación atmosférica.
- ❖ Una de las metas es generar información que permita demostrar:
  - El efecto de la estimulación atmosférica sobre sistemas terrestres
  - Aportar datos sobre la evaluación de la precipitación generada por estimulación atmosférica

- La escasez del agua es un problema en muchas regiones del mundo
- Causas:
  - Variabilidad de la precipitación
  - Disminución o falta de precipitación exacerbado por el cambio climático y extracción excesiva de agua
- Medida de mitigación: Estimulación de precipitación por medio de la siembra de nubes
- Los experimentos de siembra de nubes iniciaron a realizarse a finales de los años 40's
- Actualmente las actividades de siembra de nubes se llevan a cabo en diferentes partes del mundo como parte de las estrategias de manejo del recurso
- Existen diferentes métodos para realizar la estimulación: se libera un compuesto higroscópico con la intención de modificar los procesos micro-físicos que resultan en la estimulación de la precipitación



## Estimulación vs disipación de la precipitación

La siembra de nubes no solo se utiliza para estimular la precipitación en regiones áridas, este método de modificación del clima también se usa para:

- Suprimir la caída granizo: formación de gotas de agua que se congelan hasta formar copos de nieve con mayor probabilidad de derretirse antes de llegar al suelo
- Despejar niebla
- Desviar la precipitación

## Validación de los datos obtenidos a partir de imágenes satelitales con registros de pluviómetros

Las estimaciones de precipitación derivadas de los productos satelitales pueden arrojar datos sobre o subestimados (Popovych y Dunaieva, 2021).



- ***Análisis de tendencias y detección de puntos de cambio en los periodos de estimulación***

Se realizaron análisis para identificar cambios abruptos en las series de tiempo e investigar los potenciales impactos de la siembra de nubes en la tendencia de la precipitación.

Para determinar si existió un aumento o disminución en la cantidad de precipitación, se detectaron los puntos de cambio en la serie de tiempo (desviaciones de la media abruptas) y se compararon las direcciones de las tendencias entre los periodos pre y post cambios.

- ***Análisis comparativo entre las características de las nubes estimuladas y las no estimuladas (control)***

Para esto se utilizó información de la red de radares de banda C del Centro Nacional de Meteorología de los Emiratos Árabes.



## **Evaluación de la siembra de nubes basada en partículas cargadas (iones negativos) utilizando electrodos emisores de iones (en tierra) (Zheng et al., 2020 y 2021)**

*Métodos estadísticos combinados con inteligencia artificial para evaluar la operación*

Estimación de la precipitación esperada (natural) en el área de experimentación utilizando un modelo predictivo de precipitación elaborado con datos históricos.

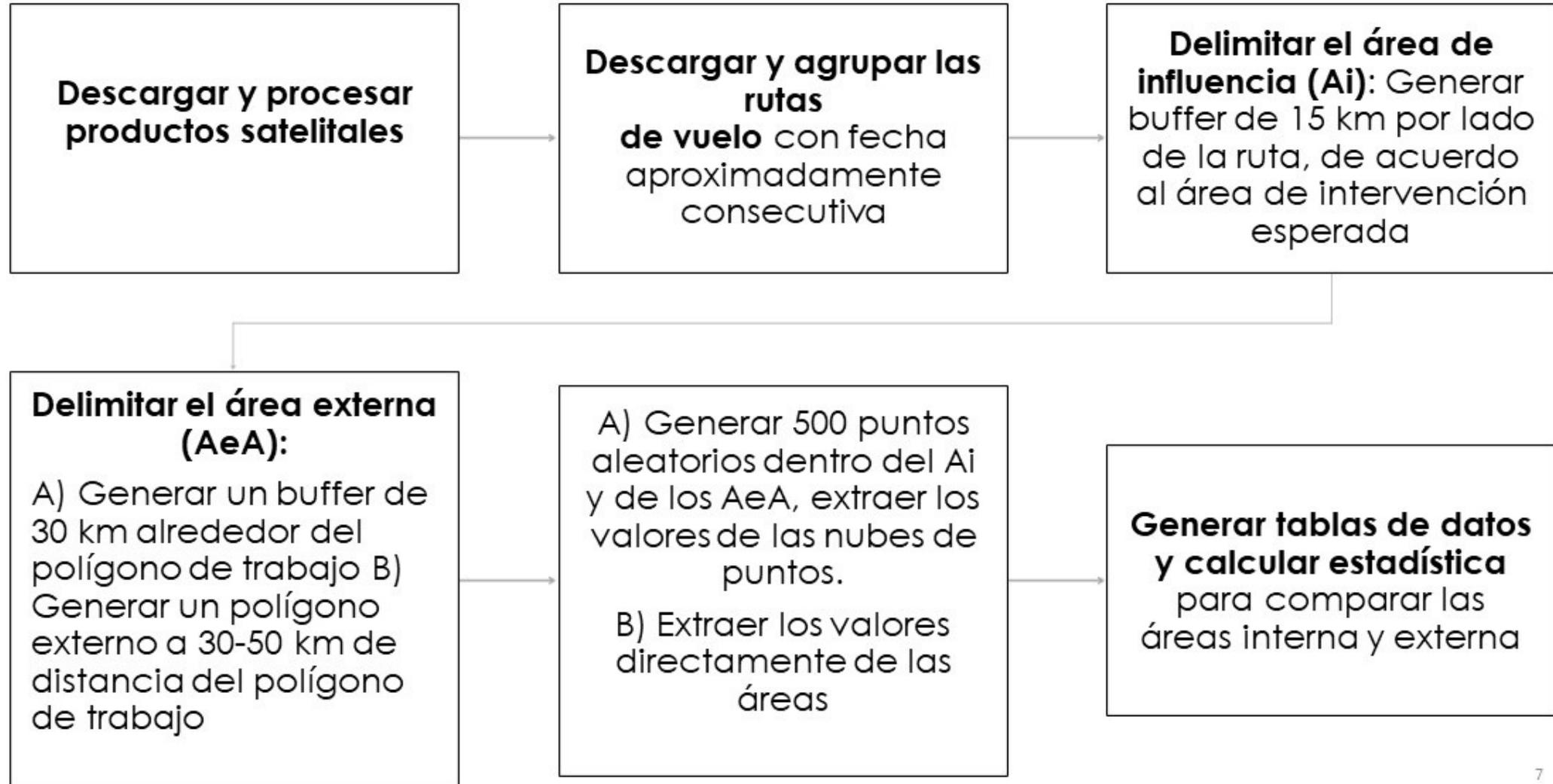
Red neuronal para entrenar un modelo de regresión para la predicción de la precipitación en un escenario hipotético sin estimulación dentro del área de prueba (precipitación natural).

Detección de anomalías: Comparación entre precipitación esperada (natural) vs. la precipitación real para determinar si la precipitación fue influenciada por algo diferente a las condiciones naturales.

## Objetivo

Con el fin de analizar espacialmente el efecto de la estimulación atmosférica en el aporte de humedad al suelo, humedad en la atmósfera y en la respuesta de la vegetación, se han analizado productos derivados de sensores y plataformas satelitales dentro y fuera de las áreas de influencia (rutas de vuelo) en los sitios de estudio.

# Métodos





# Productos satelitales que han sido utilizados

## Soil Moisture Active Passive (SMAP)

Variable "Soil moisture"  
Resolución especial: 9 km  
Resolución temporal: Diaria

## MODIS/Terra+Aqua (MCD19A2 v006)

Variable "Column water vapor"  
Resolución especial: 1 km  
Resolución temporal: Diaria

## MODIS/Terra Net Evapotranspiration (MOD16A2 v061)

Variable "Total  
Evapotranspiration"  
Resolución especial: 500 m  
Resolución temporal: 8 días

## MODIS Vegetation Indices (MOD13Q1)

Variables "NDVI" y "EVI"  
Resolución especial: 250 m  
Resolución temporal: 16 días

## MODIS/Terra Gross Primary Productivity (MOD17A2H v061)

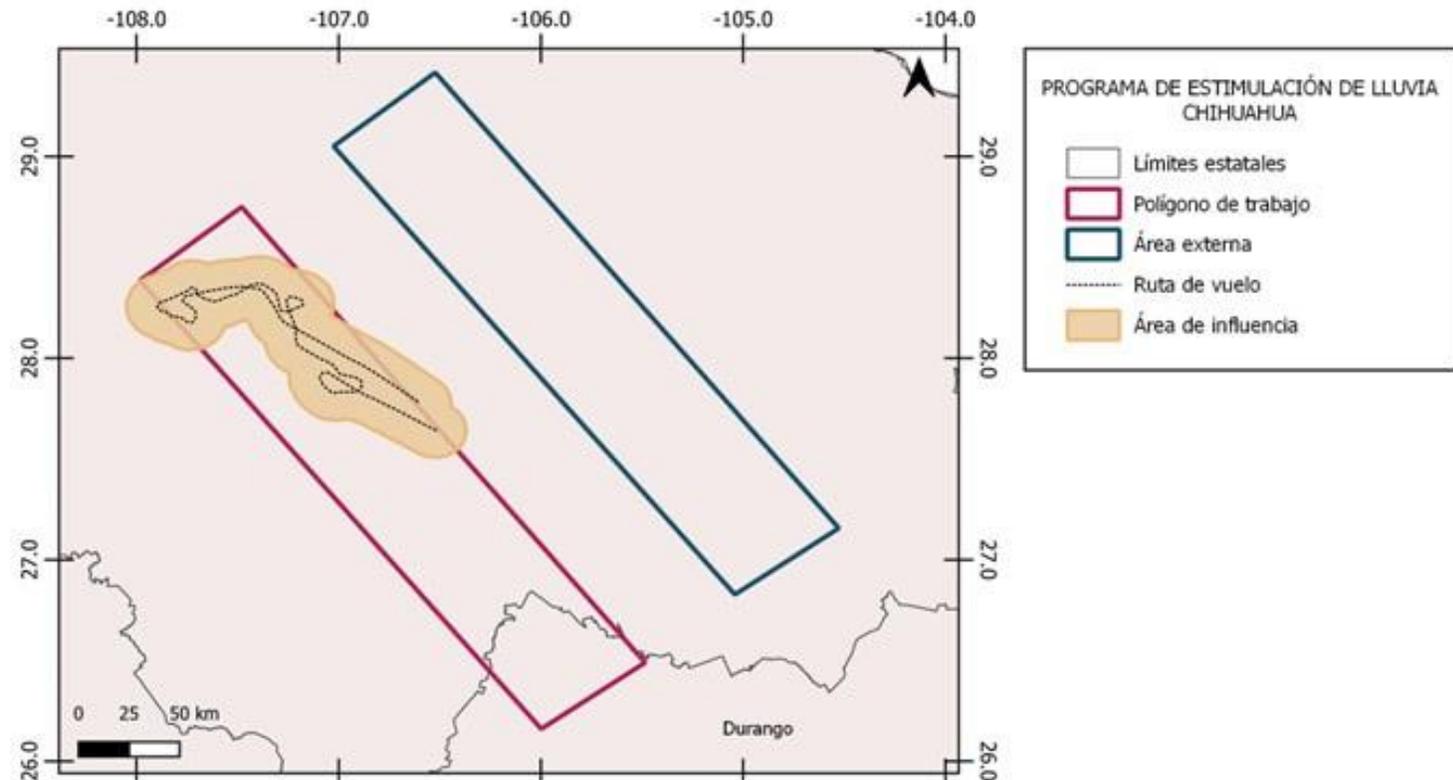
Variable "Net Photosynthesis"  
Resolución especial: 500 m  
Resolución temporal: 8 días

## GPM\_3IMERGDL v06 Late Precipitation L3

Variable "Daily accumulated  
precipitation"  
Resolución especial: 0.1 °  
Resolución temporal: Diaria

Para definir el área de influencia, se genera un buffer alrededor de la ruta de vuelo (15 km por lado). Con ello delimitamos el área en la que se espera observar el efecto de la estimulación.

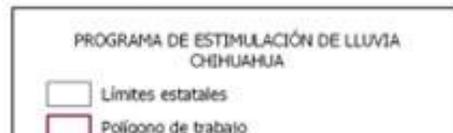
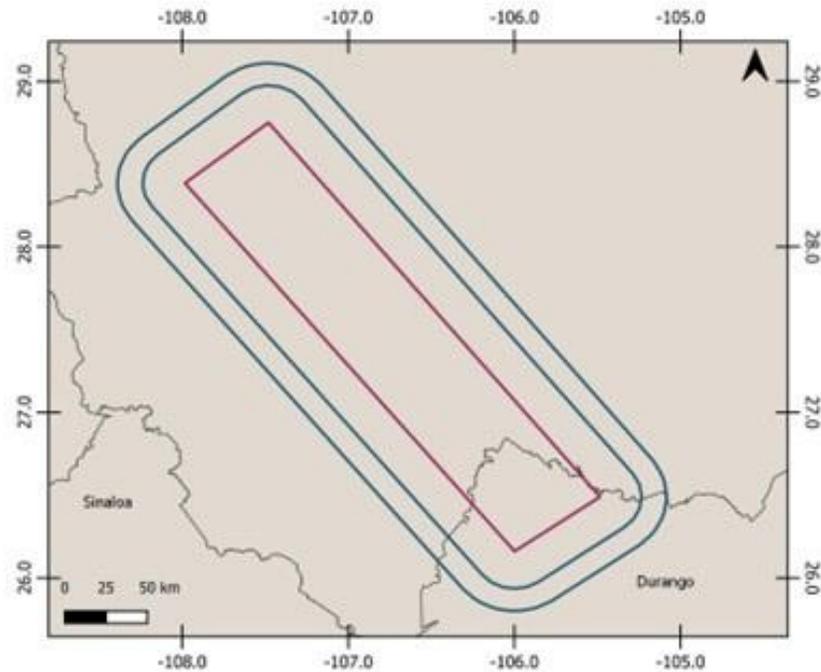
Delimitación del  
área de  
influencia (ai)



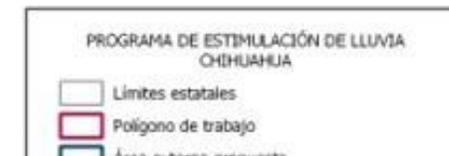
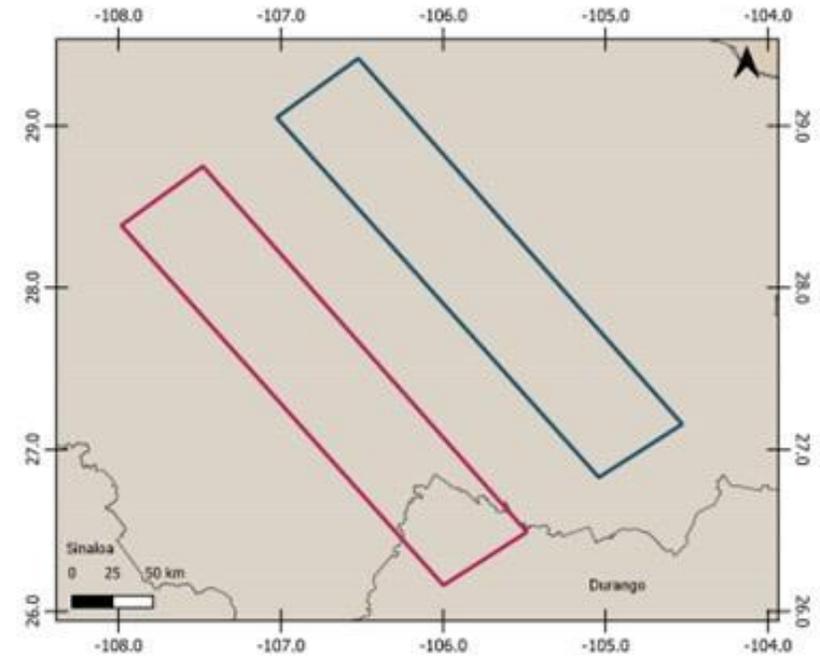


Para definir el área externa se han empleado las siguientes dos opciones:

A) Generar un buffer de 30 km alrededor del polígono de trabajo



B) Generar un polígono externo al polígono de trabajo

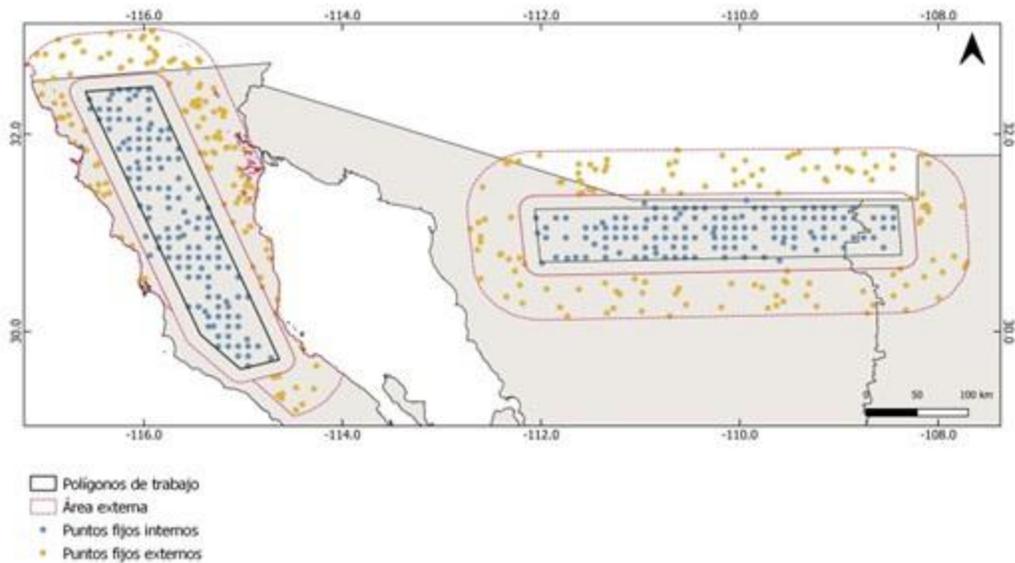


Delimitación del  
área externa  
(aea)

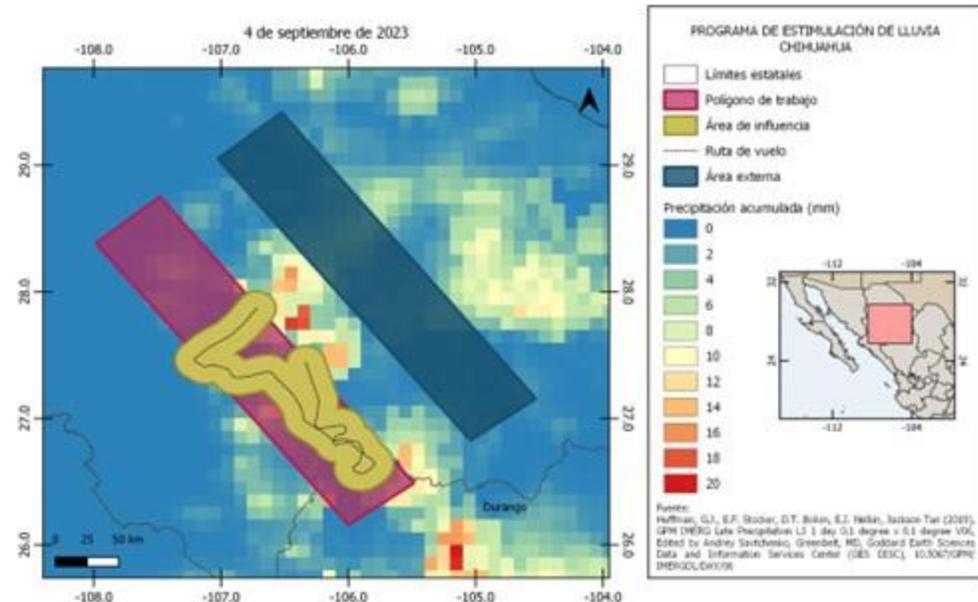
# Muestreo-obtención de valores

Hemos probado diferentes estrategias para el muestreo de datos en los distintos proyectos:

A) Los valores se han obtenido de 500 puntos aleatorio generado dentro del polígono de trabajo, del área externa y del área de influencia

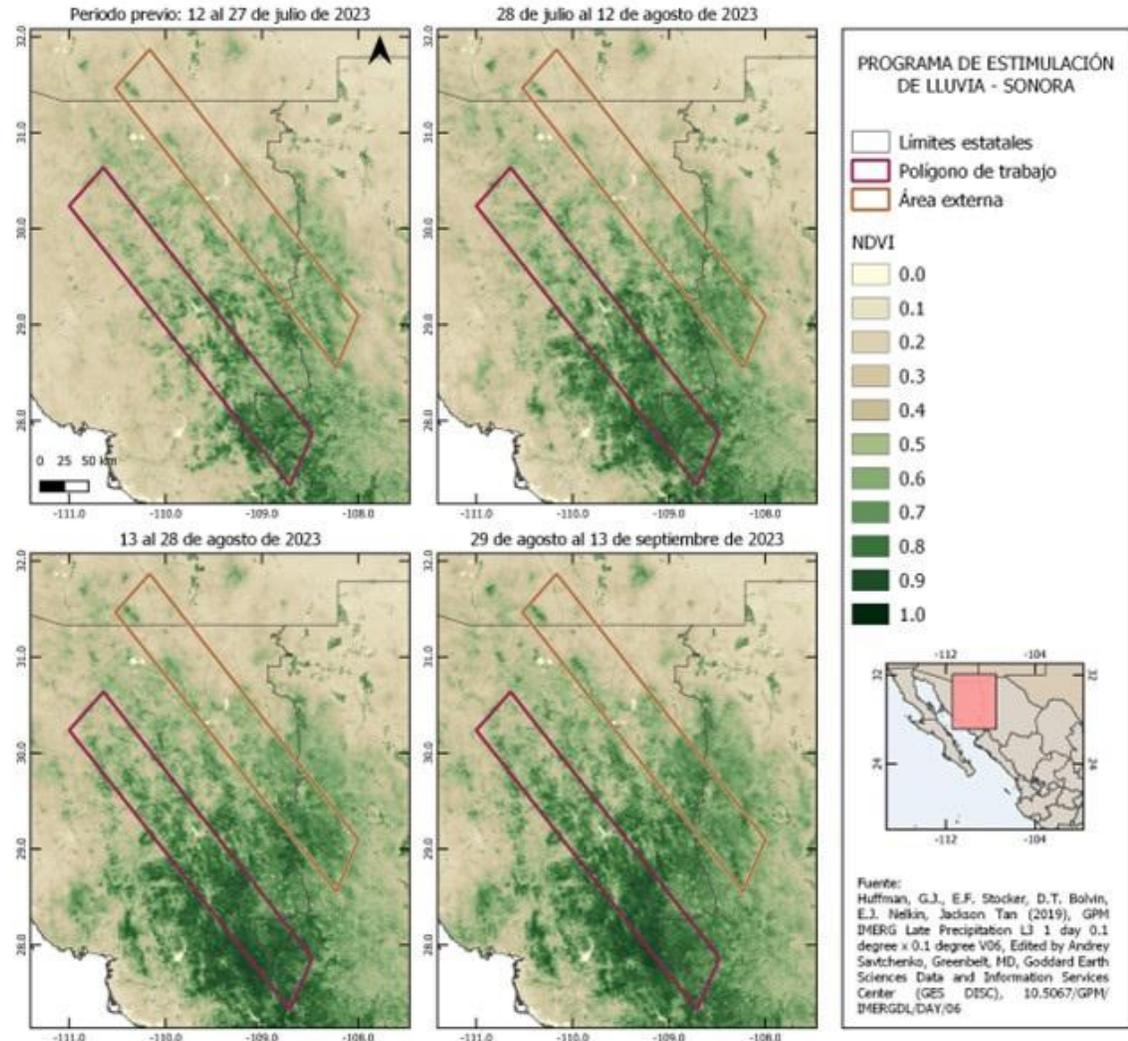
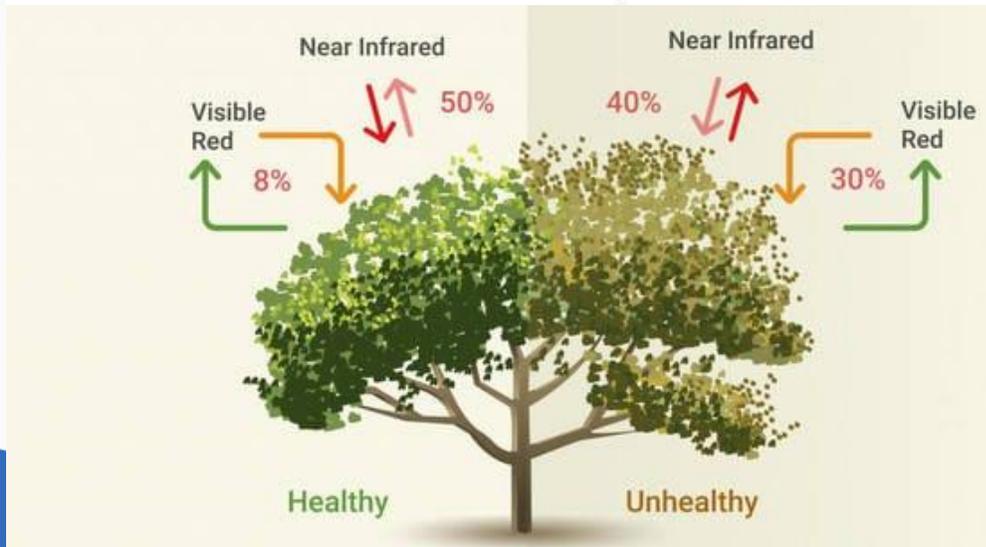


B) Los valores se han extraído de toda la superficie del polígono de trabajo, área externa y área de influencia



## Producto MOD13Q1 de MODIS (16 días/ 250 m)

Entre más verde, mayor respuesta de la vegetación a través del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI).



NDVI/EVI

# Sonora

Más verde significa una mayor respuesta de la vegetación a través del índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI). Todo parece verde, pero lo es más, dentro de la zona intervenida.

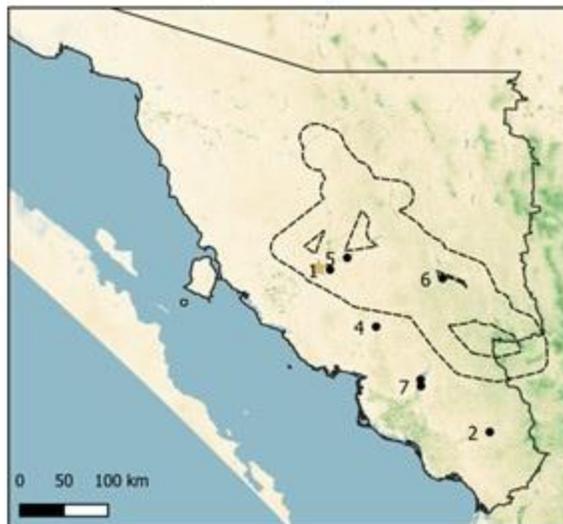
NDVI ranges

<0  
0-0.2  
0.2-0.4  
0.4-0.6  
≥0.6

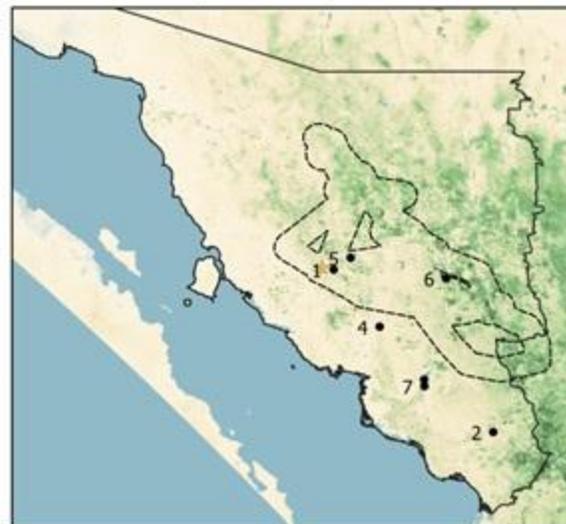
Drought

Extreme dry  
Dry  
Moderate  
Wet  
Extremely wet

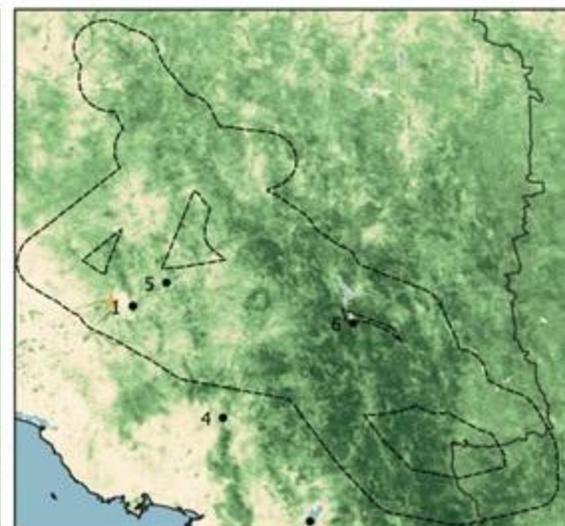
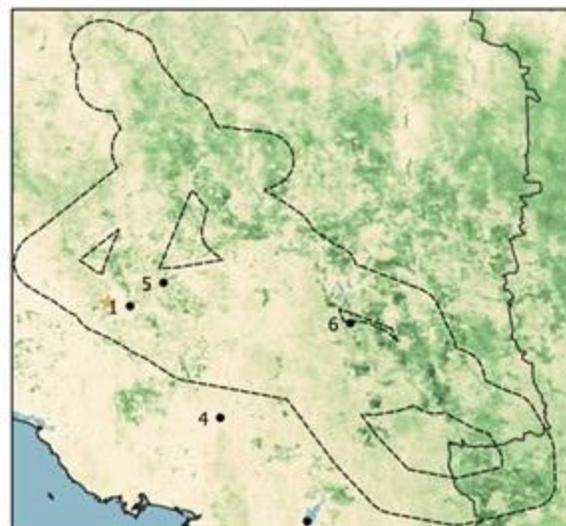
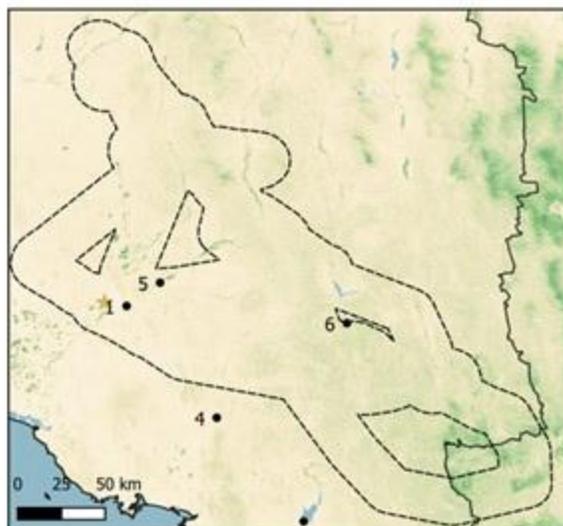
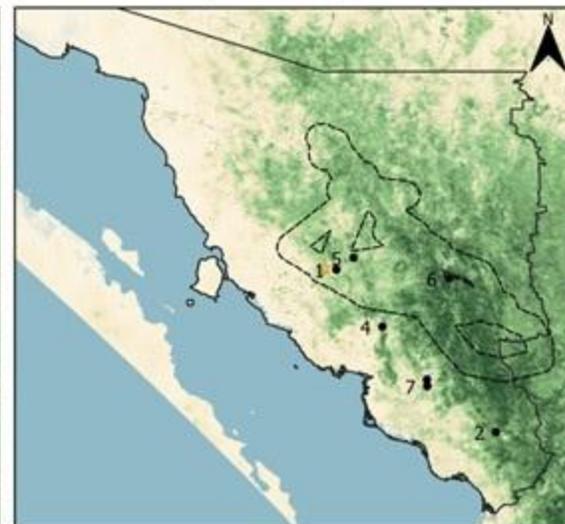
10 de junio al 25 de junio de 2021



26 de junio al 11 de julio de 2021



12 de julio al 27 de julio de 2021



□ Sonora  
□ Área de influencia (vuelos 1-3)  
★ Aeropuerto

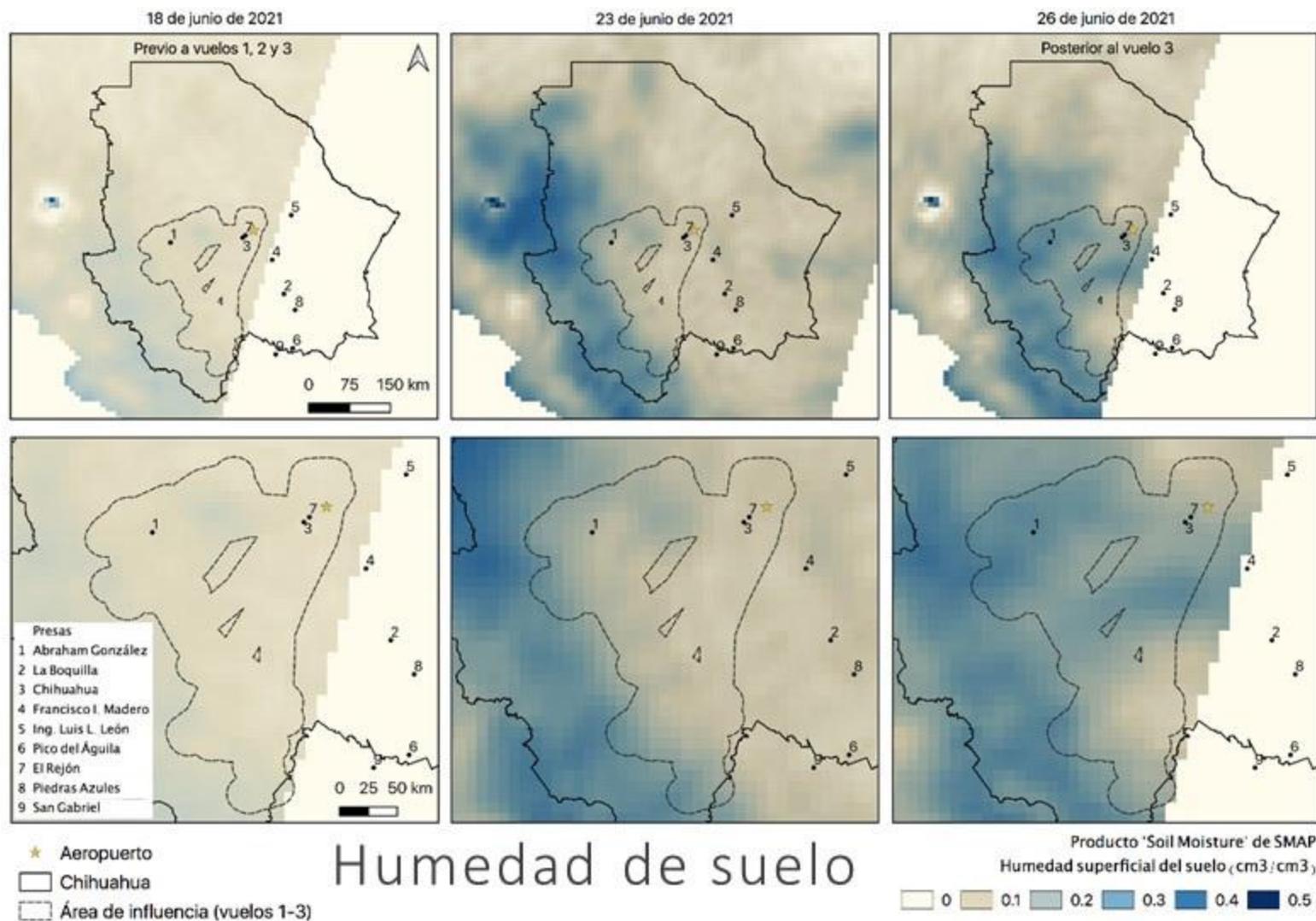
NDVI 0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1

Producto MODIS MOD13Q1 v006

## Producto Soil Moisture de SMAP (Diario/9 km)

Entre más azul, mayor cantidad de agua en el suelo.

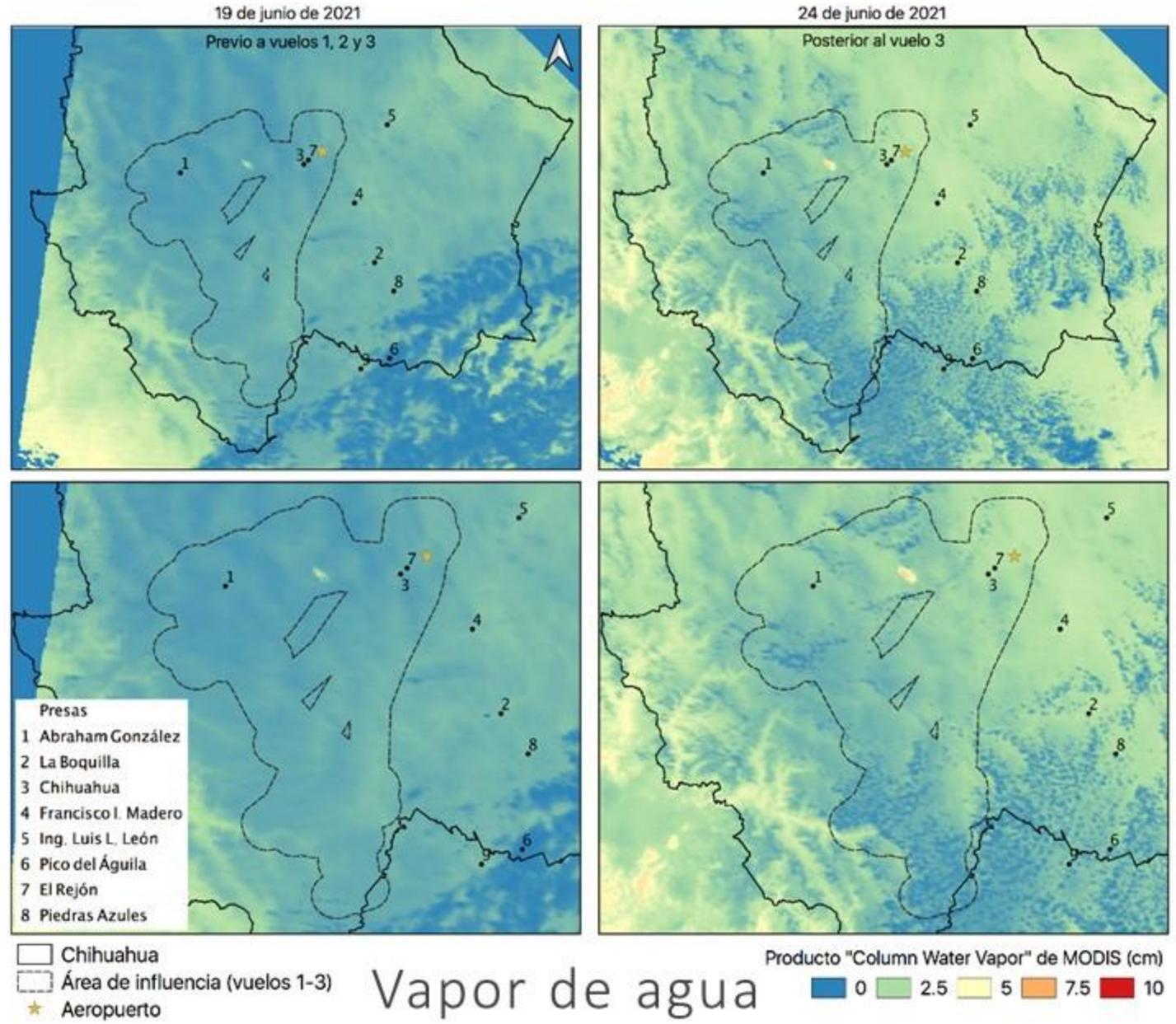
El producto tiene una resolución especial de 9 km, así que cada pixel indica la condición para ~ 8000 ha.



## Producto MCD19A2 de MODIS (Diario/1 km)

Entre más verde, mayor cantidad de agua en atmósfera.

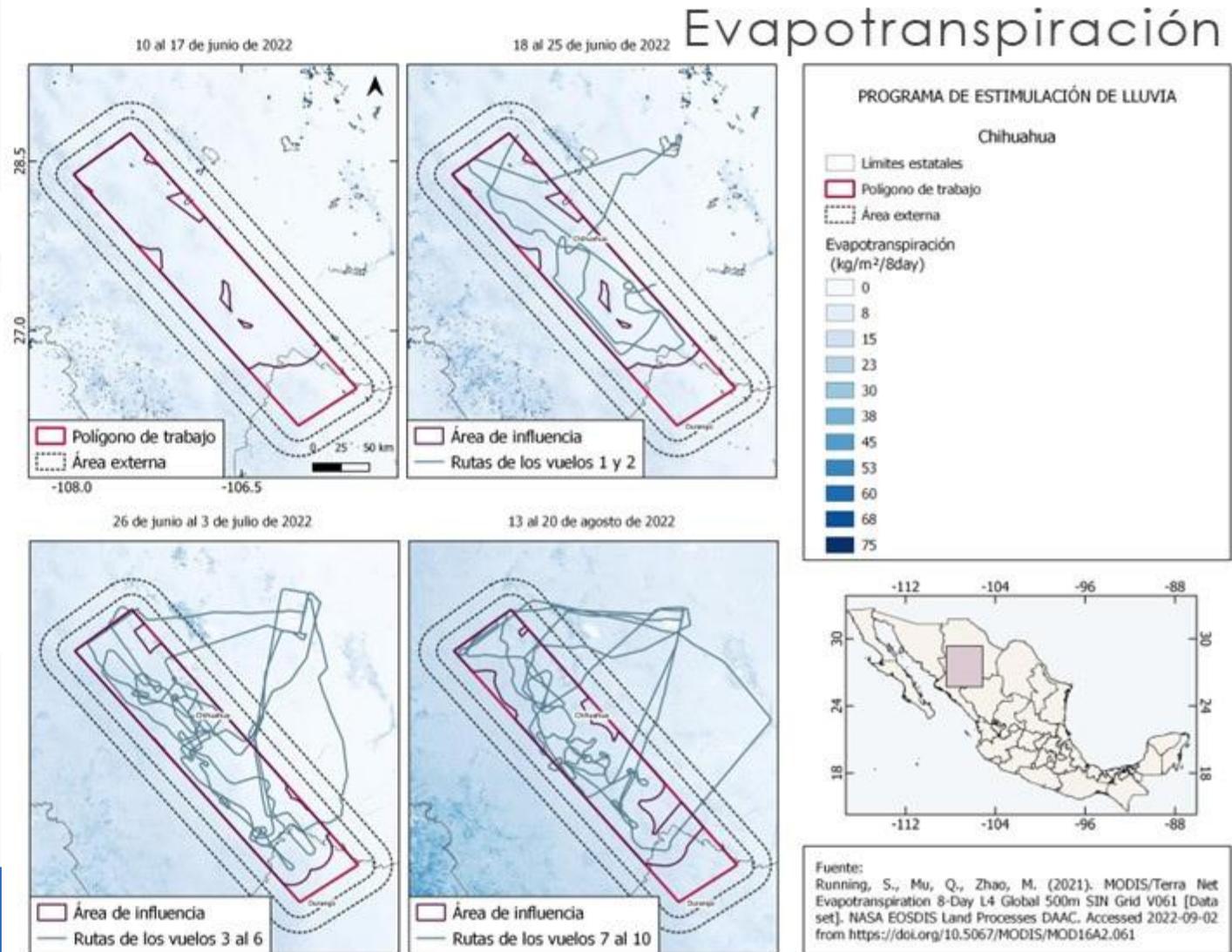
Este producto tiene una resolución especial de 1 km, así que cada pixel indica la condición para aprox 100 ha.





## Producto MOD16A2 v006 de MODIS (8 Días/500 m)

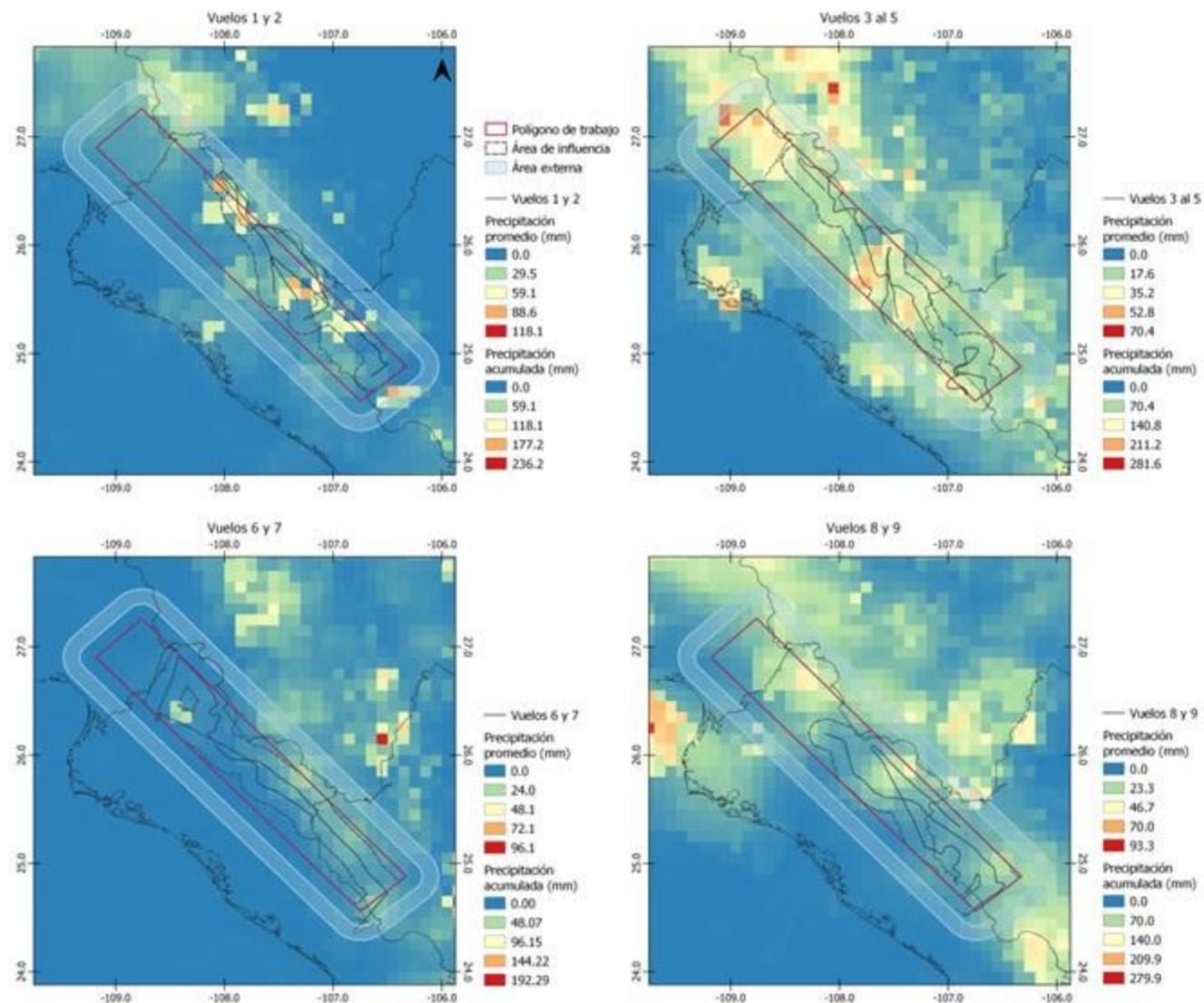
Valor evapotranspiración total (suma  
de agua perdida por  
evapotranspiración en  $\text{kg}/\text{m}^2/8\text{días}$ )  
en un proyecto en Chihuahua  
(Proyecto 2022).

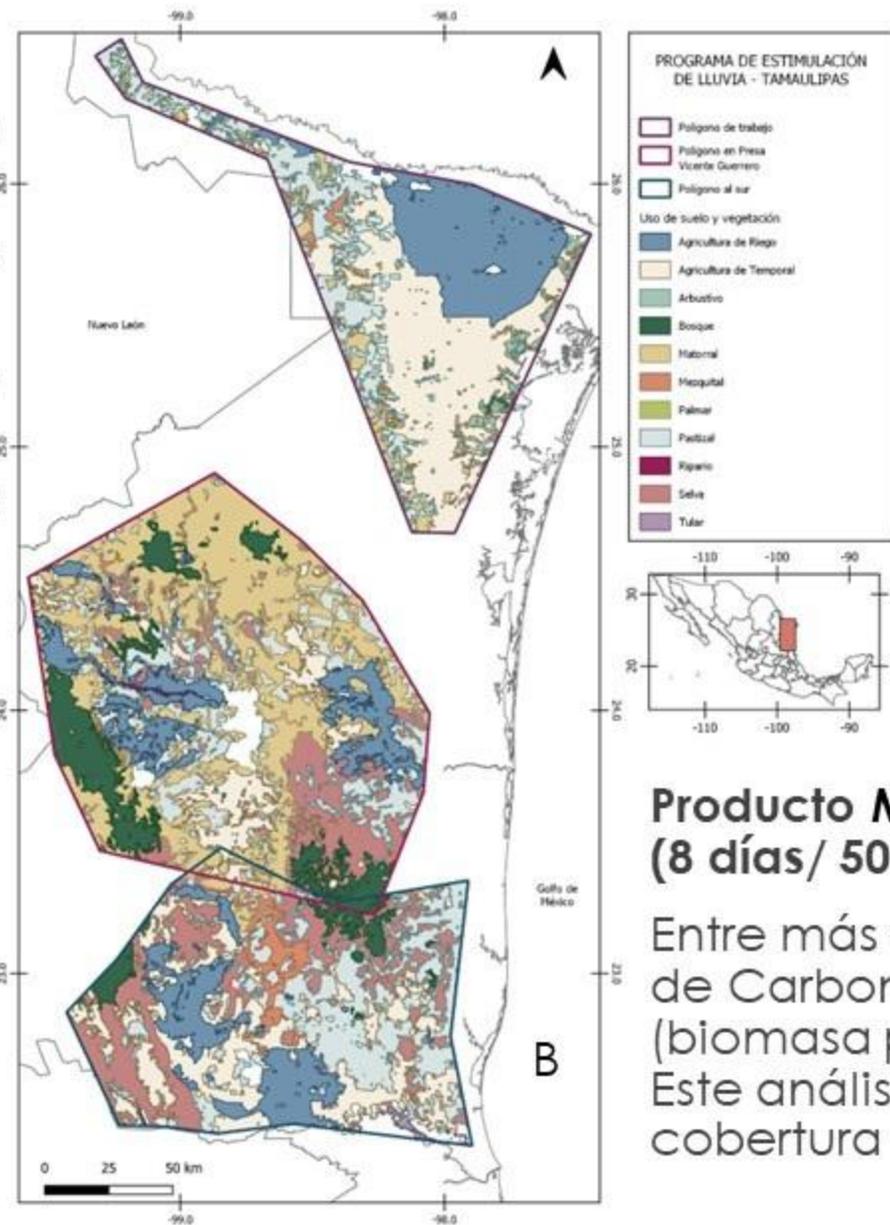
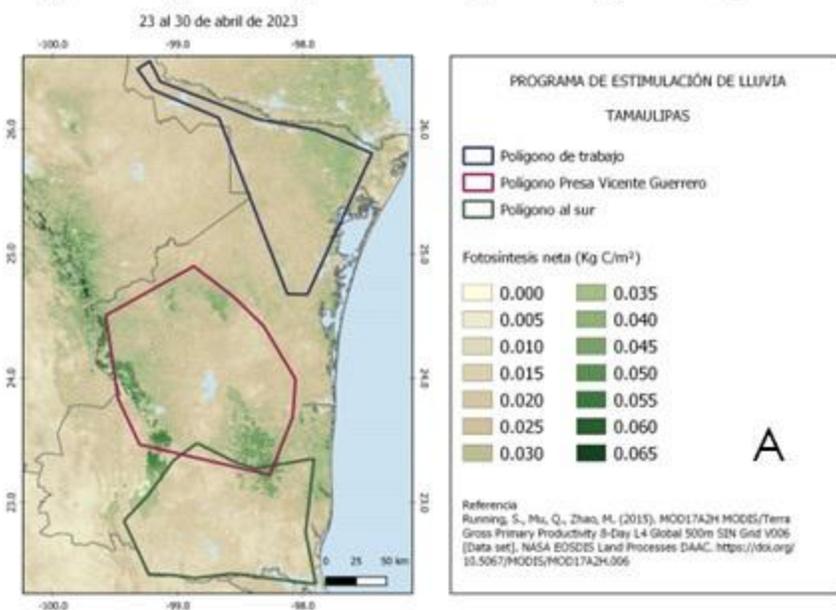
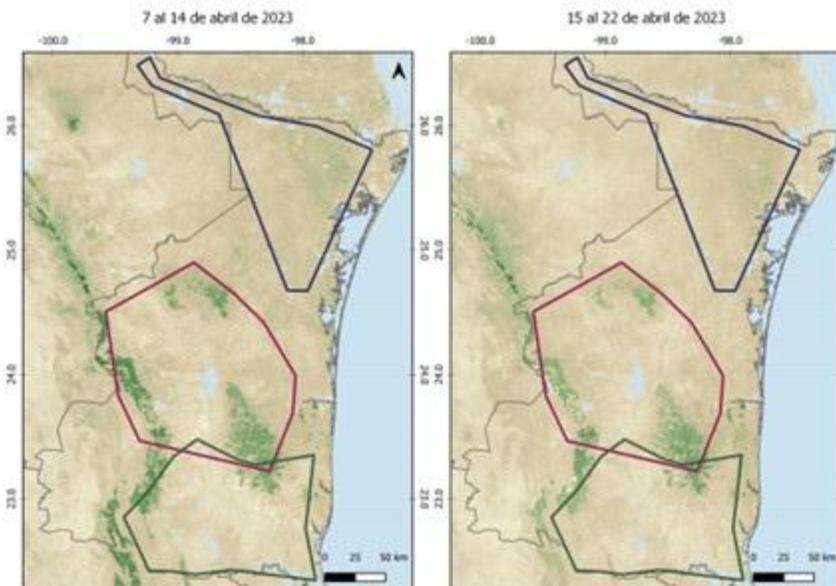


# Precipitación promedio y acumulada

**GPM\_3IMERGDL v06**  
**(diario/ 0.1 °)**

Entre más rojo, mayor cantidad de precipitación acumulada.





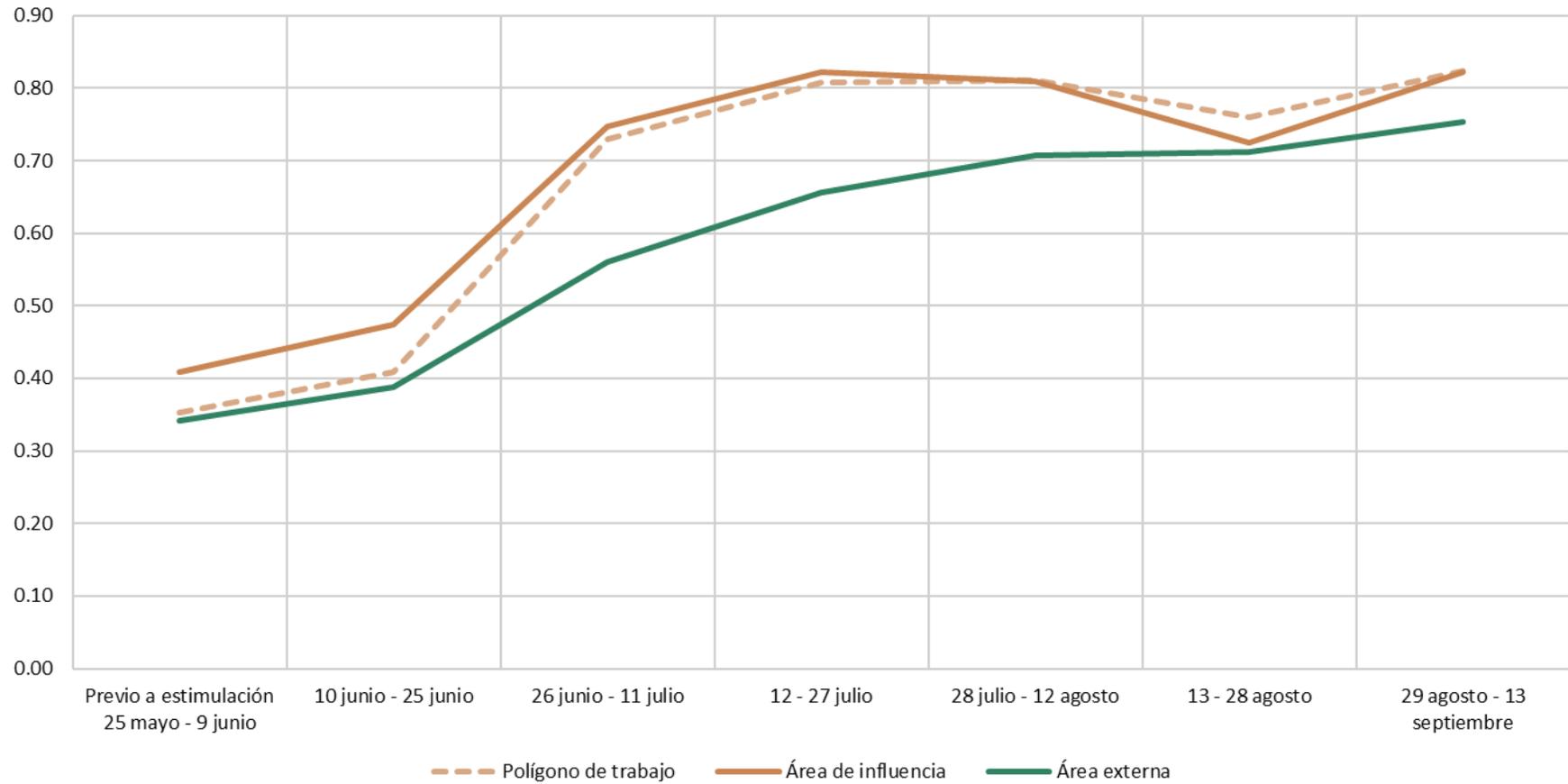
# Fotosíntesis neta

**Producto MOD17A2H v061 de MODIS (8 días/ 500 m)**

Entre más verde, mayor cantidad de kg de Carbono por metro cuadrado (biomasa producida por la vegetación). Este análisis se realiza por tipo de cobertura vegetal.

# NDVI

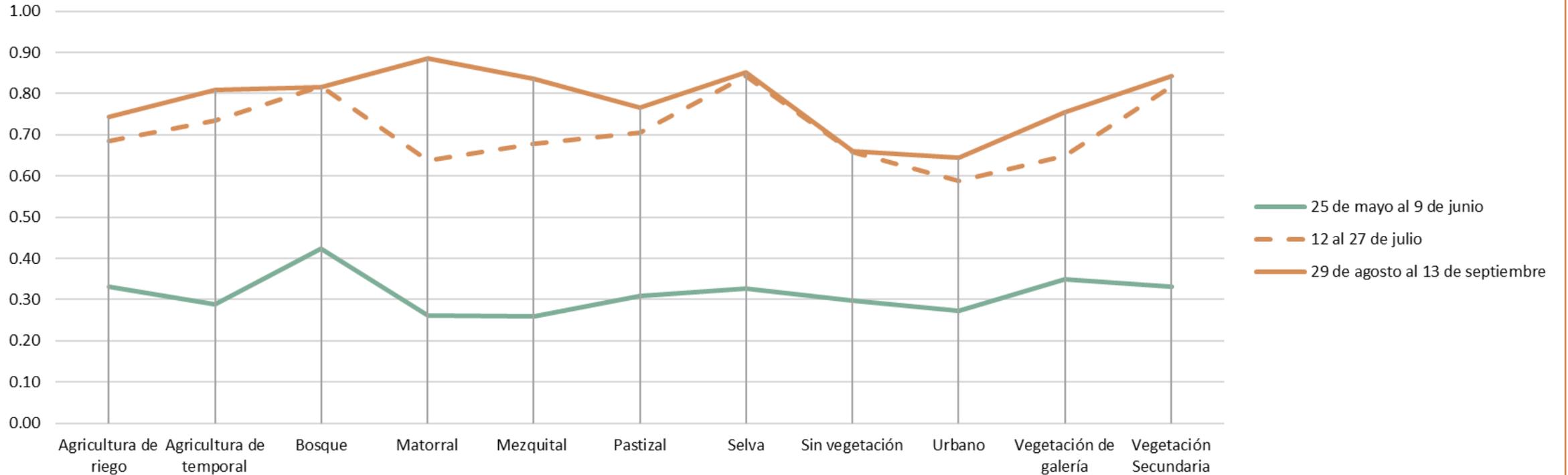
Valor promedio del NDVI - Vuelos de 1 al 22 (Proyecto Sinaloa, 2022)



PERIODO DE LA IMAGEN	POLÍGONO DE TRABAJO	ÁREA DE INFLUENCIA	ÁREA EXTERNA
Previo a estimulación 25 mayo - 9 junio	0.35	0.41	0.34
10 junio - 25 junio	0.41	0.47	0.39
26 junio - 11 julio	0.73	0.75	0.56
12 - 27 julio	0.81	0.82	0.66
28 julio - 12 agosto	0.81	0.81	0.71
13 - 28 agosto	0.76	0.73	0.71
29 agosto - 13 septiembre	0.82	0.82	0.75

# NDVI POR TIPO DE COBERTURA

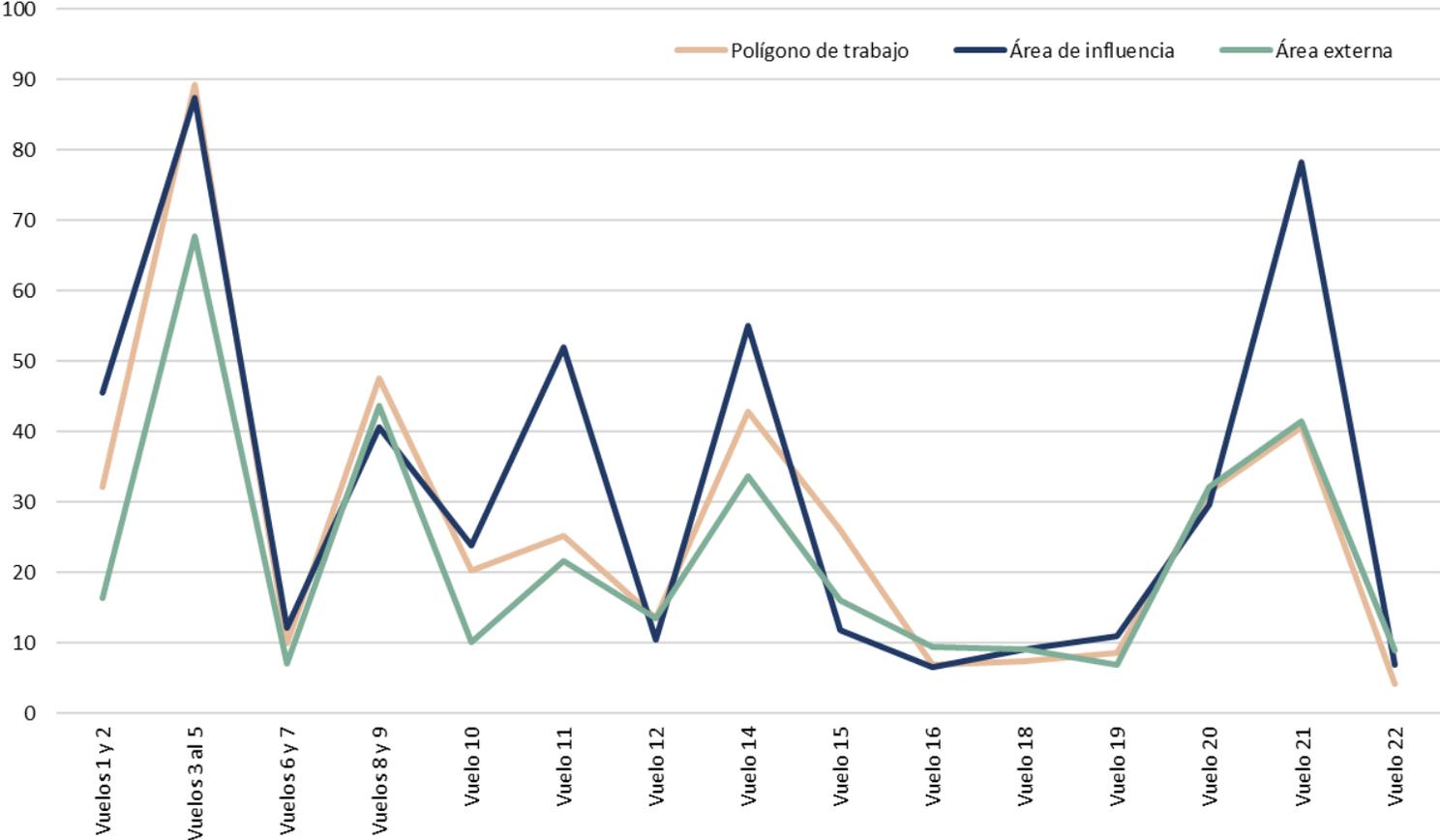
Valores promedio de NDVI por tipo de cobertura  
previo al periodo de estimulación vs el último periodo estimulado (Proyecto Sinaloa, 2022)



Periodo del producto NDVI	Agricultura de riego	Agricultura temporal	Bosque	Matorral	Mezquital	Pastizal	Selva	Sin vegetación	Urbano	Vegetación de galería	Vegetación Secundaria
25 de mayo al 9 de junio (Previo)	0.33	0.29	0.42	0.26	0.26	0.31	0.33	0.30	0.27	0.35	0.33
12 al 27 de julio	0.68	0.73	0.82	0.64	0.68	0.71	0.84	0.66	0.59	0.65	0.82
29 de agosto al 13 de septiembre	0.74	0.81	0.82	0.89	0.84	0.77	0.85	0.66	0.64	0.76	0.84

# Precipitación acumulada (Sinaloa - 2022)

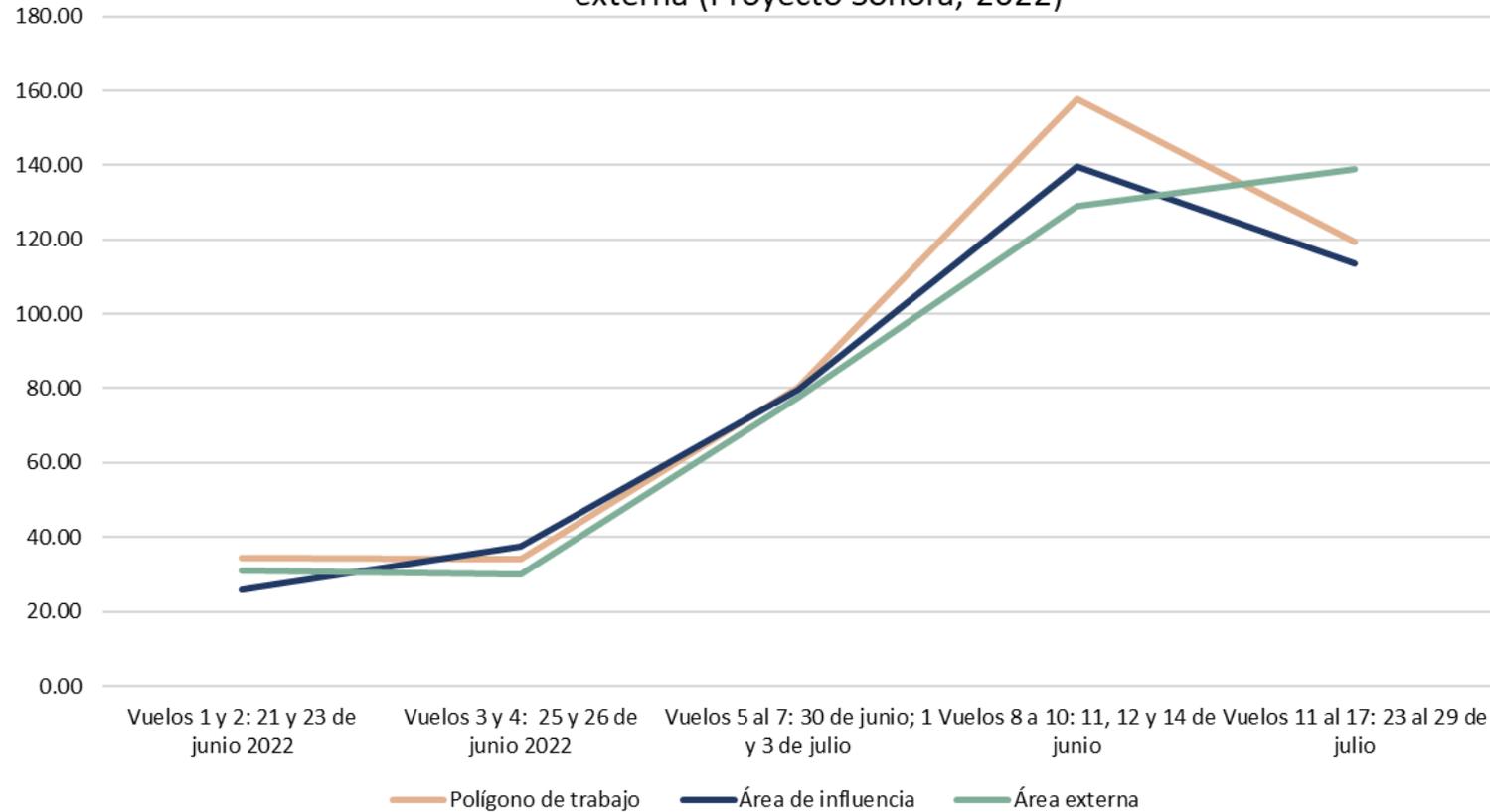
Precipitación acumulada dentro del polígono de trabajo, áreas de influencia y externa (Proyecto Sinaloa, 2022)



Vuelos	Polígono de trabajo	Área de influencia	Área externa
Vuelos 1 y 2	32.08	45.53	16.34
Vuelos 3 al 5	89.38	87.39	67.77
Vuelos 6 y 7	10.00	12.15	7.11
Vuelos 8 y 9	47.54	40.64	43.71
Vuelo 10	20.27	23.75	10.17
Vuelo 11	25.16	51.97	21.70
Vuelo 12	13.53	10.41	13.42
Vuelo 14	42.75	55.12	33.60
Vuelo 15	26.02	11.81	15.99
Vuelo 16	6.90	6.47	9.37
Vuelo 18	7.42	9.14	9.14
Vuelo 19	8.65	10.89	6.87
Vuelo 20	31.42	29.67	32.09
Vuelo 21	40.58	78.26	41.53
Vuelo 22	4.14	6.79	8.91

# Precipitación acumulada (Sonora - 2022)

Precipitación acumulada dentro del polígono de trabajo, áreas de influencia y externa (Proyecto Sonora, 2022)



Vuelos	Polígono de trabajo	Área de influencia	Área externa
Vuelos 1 y 2: 21 y 23 de junio 2022	34.33	25.87	31.08
Vuelos 3 y 4: 25 y 26 de junio 2022	34.06	37.40	30.09
Vuelos 5 al 7: 30 de junio; 1 y 3 de julio	80.40	79.54	77.69
Vuelos 8 a 10: 11, 12 y 14 de junio	157.79	139.60	129.01
Vuelos 11 al 17: 23 al 29 de julio	119.32	113.65	138.89



# Algunos Resultados

Los resultados preliminares se basan en la comparación de muestras de 500 puntos y de estadísticos de área, del polígono de trabajo (Pt), del área intervenida (Ai) y del área externa o sin intervención (Ae), en dos tiempos de análisis, antes y después de la intervención. Los resultados indican:

## Variable Vapor de Agua

- Para esta variable analizada, en todos los casos se observó una diferencia significativa en la comparación de las muestras (Ai vs Ae), consistente en una disminución del vapor de agua en la atmósfera dentro de la zona en donde se aplicó el reactivo, esto indica que la cantidad de agua disponible en la atmósfera está precipitándose más dentro de la zona de influencia, que fuera de la zona de influencia.

## Variable Humedad del suelo

- Los resultados indican que la Ai prevuelo y el Ae prevuelo no presentan diferencias significativas en el valor de humedad del suelo, lo que indica que antes de la estimulación, las áreas se encontraban en condición similar de poca humedad. La comparación entre las áreas indican diferencias significativas en los valores de humedad del suelo antes y después del vuelo, lo que indica que cambió la humedad significativamente, y también se muestran diferencias entre el Ai y el Ae, encontrándose un mayor efecto del cambio de humedad en la Ai.



VIII Congreso Nacional y  
I Congreso Internacional  
de Riego, Drenaje y Biosistemas  
COMEI - UAAAN 2023 | Saltillo, Coahuila  
4 al 6 octubre 2023



# Algunos Resultados

## Variable NDVI - vegetación

- El análisis estadístico comparativo entre las áreas, indica que en todos los casos existen diferencias significativas en el promedio del NDVI dentro de las áreas de influencia ( $A_i$ ), antes y después del tratamiento.
- En todos los casos se observa un incremento en el promedio del NDVI dentro del  $A_i$  a través del tiempo. Aunque se observa un “reverdecimiento” general regional, el efecto es más evidente en las zonas intervenidas. En casos específicos, cuando no hay diferencias entre el pre y post vuelo en la  $A_i$  y la  $A_eA$ , la diferencia siempre es mayor en la  $A_i$ , esto se puede deber a que el fenómeno meteorológico de precipitación impacta de manera homogénea en el territorio, pero una mayor diferencia dentro de la  $A_i$  pre y post, pudiera significar un efecto del tratamiento. Se explorará un análisis más fino para dimensionar las diferencias.



# Estimulación vs disipación de la precipitación

**Hecho:** Los registros en tierra pueden no ser representativos de la precipitación real generada, ya que puede estar sujeta a altas tasas de evaporación antes de llegar a la superficie en los ambientes secos.

**Pregunta:** En las estimulaciones realizadas ¿Existen eventos en los que se haya propiciado la dispersión de las nubes en lugar de estimular la precipitación?

**Propuesta:** Establecer límites de precipitación mínima esperada, establecer el límite de detección con los métodos que hemos usado (satélite, pluviómetros, etc.)



VIII Congreso Nacional y  
I Congreso Internacional  
de Riego, Drenaje y Biosistemas  
COMEI - UAAAN 2023 | Saltillo, Coahuila  
4 al 6 octubre 2023



# Validación de los datos obtenidos a partir de imágenes satelitales con registros de pluviómetros

**Hecho:** Tenemos pocos pluviómetros disponibles con datos para realizar evaluación dentro de los polígonos de trabajo.

**Pregunta:** ¿Cuál es la correlación entre los datos obtenidos de los sensores y las mediciones de precipitación registradas en tierra con pluviómetros?

**Evaluación de las estimaciones del producto de precipitación GPM IMERG en Crimea (Popovych y Dunaieva, 2021).**

**Propuesta:** Establecer un arreglo de pluviómetros dentro de polígonos de estudio/áreas de interés para obtener mediciones de precipitación en tierra.



# Evaluación del efecto de la estimulación en la precipitación

**Hecho:** Hemos obtenido resultados heterogéneos, no consistentes entre la condición climática y la precipitación esperada, al parecer por fenómenos de transporte de sistemas de precipitación por viento, cambio repentino de condiciones atmosféricas, etc.

**Pregunta:** ¿Qué alternativas, aún no probadas, existen para evaluar el efecto de la estimulación de precipitación?, ¿Cómo incorporar más variables que permitan una evaluación integral: altura de nubes, desplazamiento de sistemas, etc?

**Propuesta:** Elaborar bases de datos integradas entre las variables meteorológicas, datos de pluviómetros y datos de satélite - publicar resultados.



- Evaluar la correlación entre los datos registrados por los pluviómetros y los extraídos de imágenes satelitales con estadísticos como:
  - Sesgo: representa la sobreestimación o subestimación del parámetro medido
  - Error promedio: valores indican la sobre/sub estimación promedio por mes en comparación con la precipitación registrada
  - Coeficiente de corr. de Pearson: caracterizar la fuerza de la relación entre los datos satelitales vs pluviómetros
- Calibrar las estimaciones de precipitación derivadas del producto satelital GPM\_3IMERGDL en función a los datos registrados por los pluviómetros y/o estaciones meteorológicas locales.



VIII Congreso Nacional y  
I Congreso Internacional  
de Riego, Drenaje y Biosistemas  
COMEI - UAAAN 2023 | Saltillo, Coahuila  
4 al 6 octubre 2023



# Referencias

Al Hosari, T., Al Mandous, A., Wehbe, Y., Shalaby, A., Al Shamsi, N., Al Naqbi, H., Al Yazeedi, O., et al. (2021). The UAE Cloud Seeding Program: A Statistical and Physical Evaluation. *Atmosphere*, 12(8), 1013. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/atmos12081013>

Cooper CF, Jolly WC. Ecological effects of silver iodide and other weather modification agents: a review. *Water Resour Res.* 1970;6(1):88–98. doi:10.1029/WR006i001p00088

Fajardo C, Costa G, Ortiz LT, Nande M, Rodríguez-Membibre ML, Martín M, Sánchez-Fortún S. Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2016 Nov;133:433–41. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.06.028. Epub 2016 Aug 9. PMID: 27517140.

Orellana-Macías, J. M., Causapé, J., Pey, J., Valero-Garcés, B., Reyes, J., and Vázquez, I.: Environmental effects of silver iodide emitted by hail suppression systems in Aragón (Spain), EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-15388, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15388>, 2021.

Popovych, V. F., Dunaieva, I. A. (2021). Assessment of the GPM IMERG and CHIRPS precipitation estimations for the steppe part of the Crimea. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 9(1-2). <https://doi.org/10.26491/mhwm/133088>

Tsiouris, S.E. & Τσιούρης, Σ & Aravanopoulos, F.A. & Papadoyannis, I. & Sofoniou, M.K. & Polyzopoulos, N. & Christodoulou, Maria & Samanidou, Victoria & Zachariadis, George & Constantinidou, Helen-Isis. (2002). Soil silver content of agricultural areas subjected to cloud seeding with Silver Iodide. *Fresenius Environmental Bulletin*. 11.

Zheng, W., Xue, F., Zhang, M., Wu, Q., Yang, Z., Ma, S., Liang, H., et al. (2020). Charged Particle (Negative Ion)-Based Cloud Seeding and Rain Enhancement Trial Design and Implementation. *Water*, 12(6), 1644. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w12061644>

Zheng, W., Ma, H., Zhang, M., Xue, F., Yu, K., Yang, Y., Ma, S., et al. (2021). Evaluation of the First Negative Ion-Based Cloud Seeding and Rain Enhancement Trial in China. *Water*, 13(18), 2473. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/w13182473>



**VIII** Congreso Nacional y  
**I** Congreso Internacional  
de Riego, Drenaje y Biosistemas  
COMEI - UAAAN 2023 | Saltillo, Coahuila  
4 al 6 octubre 2023



¡GRACIAS!

[eaton@uabc.edu.mx](mailto:eaton@uabc.edu.mx)

Fecha de presentación: 04 de octubre 2023

