



Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ciencias de la Tierra
Centro de Ciencias de la Atmósfera

Validación del producto 2BCMB del satélite GPM en una porción del Sureste de México

TESIS

Que para optar por el grado de

Maestra en Ciencias de la Tierra

Presenta

Lizbeth Berenice Peláez Pavón

Director

Dr. Fernando García García
Centro de Ciencias de la Atmósfera

Ciudad Universitaria, Ciudad de México
Enero de 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A G. Emmanuel Martínez Gómez,
en cumplimiento de mi palabra y con agradecimiento infinito.*

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme formar parte de la comunidad y recibir en sus espacios una instrucción integral.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por los recursos proporcionados para mi formación académica.

Al Dr. Fernando García por aceptarme en el grupo de trabajo, dirigir mi proyecto y sobre todo por mostrarme desde una perspectiva distinta, que la belleza de las nubes también radica en la complejidad de su conocimiento.

Al Dr. Guillermo Montero por su compromiso con mi proyecto, su apoyo constante tanto académico como personal y su actitud siempre afable.

A los revisores: Dr. Adolfo Magaldi, Dr. Ernesto Caetano y Dr. Antonio Salinas por sus valiosas observaciones y recomendaciones.

Al Ing. Víctor Zarraluqui por su apoyo en la elección y tratamiento de los productos satelitales.

A la Dra. Gema Andraca por sus sugerencias en la metodología y en el tratamiento de los datos de superficie.

A la Dra. Berenice Hernández por recordarme con cada foto o pregunta sobre nubes mi verdadera vocación y por ser mi ejemplo de profesionalista brillante e íntegra.

A mi madre Heydi para quien no habrá jamás palabras suficientes para expresarle mi agradecimiento y profunda admiración.

A mi hermano Antonio porque su inteligencia ha motivado mi mejora constante y simplemente porque su existencia fundamenta la mía.

A Emmanuel Martínez por el tiempo que destinó a mi estudio y aprendizaje, por su paciencia, su disposición permanente para ayudarme y por ser mi mejor ejemplo de perseverancia, trabajo duro y talento.

A mi hermanita Esther por motivarme en cada uno de mis proyectos y porque sin importar la distancia o el tiempo, me ha ofrecido su apoyo y cariño de forma permanente.

A Orlando Peña por su amistad sincera y desinteresada, por ser el medio perfecto para que pueda seguir confiando en la gente y porque coincidir con él ha sido una gran fortuna en mi vida.

A Daniel, Vladimir, Pohema, Stefy, y Federico del Grupo de Física de Nubes por sus aportaciones a mi proyecto durante los seminarios y porque de formas distintas hicieron más grata mi estancia en el posgrado.

A Javier R., Carolina, María Fernanda, Aurora, René, Benjamín, Ana, Julio y Juan Carlos por el tiempo y aprendizaje compartido.

A mis amigos Luis Guadarrama, Diego Gallardo, Indra Bernal, Gabriel González, Mauricio Amaya y Víctor González por su confianza y apoyo durante tantos años.

Finalmente, quiero agradecer de forma especial a Oscar Castro Artola por su soporte académico, su compañía y por haberme ofrecido todos los medios para ejercer mi libertad intelectual y personal. Gracias.

Índice

Resumen.....	I
1. Introducción.....	1
a. Planteamiento del problema.....	2
b. Justificación.....	2
c. Hipótesis.....	3
d. Objetivo general.....	3
e. Objetivos específicos.....	3
Estructura de la Tesis.....	4
2. Marco teórico.....	5
a. Zona de estudio.....	5
b. Medición de precipitación en superficie.....	5
i. Pluviómetros.....	7
ii. Estaciones Meteorológicas Automáticas.....	7
c. Medición de precipitación por percepción remota.....	10
i. Global Precipitation Measurement (GPM).....	10
ii. Instrumentación.....	12
iii. Algoritmo.....	16
iv. Validación de productos satelitales.....	22
3. Materiales.....	24
a. Datos de superficie.....	24
b. Datos de satélite.....	25
4. Métodos.....	26
a. Procesamiento de datos.....	26
i. Datos de satélite.....	26
ii. Datos de superficie.....	30
b. Validación.....	33
5. Resultados.....	37
6. Discusión.....	62
7. Conclusiones.....	66

8. Referencias	68
Anexo 1 Tabla de los registros en los que el satélite GPM y los pluviómetros de las EMAs midieron valores diferentes de cero.	73
Anexo 2 Código en lenguaje de programación Python útil para la extracción y procesamiento de datos de precipitación del satélite GPM.	75

Mapas

Mapa 1 Delimitación y fisiografía de la zona de estudio	6
Mapa 2 Distribución de EMAs sobre Provincias fisiográficas	24
Mapa 3 Distribución espacial de los resultados del proceso de categorización basado en la tabla de contingencia	40
Mapa 4 Distribución espacial de los resultados del proceso de categorización basado en la tabla de contingencia en el que no se encuentran incluidos los <i>null</i>	41

Figuras

Figura 1 Esquema del pluviómetro de balancín	7
Figura 2 Diseño de orbitas satelitales	11
Figura 3 Instrumentación del satélite GPM	12
Figura 4 Esquema de la cobertura espacial de los instrumentos DPR y GMI	12
Figura 5 Esquema que ilustra los parámetros de posición utilizados en el barrido del GMI.	14
Figura 6 Esquema de superposición del barrido DPR- GMI	14
Figura 7 Esquema del procesamiento del Algoritmo Combinado del GPM	21
Figura 8 Estructura del formato de datos del producto combinado Nivel 2 DPR-GMI	25
Figura 9 Proyección puntual de la trayectoria de un paso del satélite	27
Figura 10 Conversión de la proyección puntual en una malla con la misma resolución espacial del satélite (5x5 km)	28
Figura 11 Imagen de la trayectoria del satélite visualizada mediante el software <i>Orbit Viewer</i> de la NASA	28
Figura 12 Superposición de la malla recreada con el software <i>QGIS</i> sobre la imagen obtenida con el visualizador de la NASA	29
Figura 13 Estructura de una tabla de contingencia	34
Figura 14 Cobertura de EMAs por el GPM	37
Figura 15 Distribución de los resultados del proceso de categorización basado en la tabla de contingencia	38
Figura 16 Histograma y gráfico de dispersión del índice AC	42

Figura 17 Histograma y gráfico de dispersión del índice BIAS	43
Figura 18 Histograma y gráfico de dispersión del índice FAR	44
Figura 19 Histograma y gráfico de dispersión del índice SR	45
Figura 20 Histograma y gráfico de dispersión del índice POD	46
Figura 21 Histograma y gráfico de dispersión del índice POFD	47
Figura 22 Histograma y gráfico de dispersión del índice CSI	48
Figura 23 Histograma y gráfico de dispersión del índice GSS	49
Figura 24 Histograma y gráfico de dispersión del índice OR	50
Figura 25 Histograma y gráfico de dispersión del índice ORSS	51
Figura 26 Porcentaje de datos faltantes y número de <i>hit</i> por EMA	52
Figura 27 Distribución por EMA de los valores de precipitación asociados a los <i>hit</i>	54
Figura 28 Distribución de los <i>hit</i>	55
Figura 29 Esquema altitudinal de las EMAs con base en la clasificación por provincias fisiográficas	56
Figura 30 Comparación de las estimaciones del GPM con los valores mínimos registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona montañosa	57
Figura 31 Comparación de las estimaciones del GPM con los valores máximos registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona montañosa	57
Figura 32 Comparación de las estimaciones del GPM con los valores promedio registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona montañosa	58
Figura 33 Comparación de las estimaciones del GPM con los valores mínimos registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona plana	59
Figura 34 Comparación de las estimaciones del GPM con los valores máximos registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona plana	59
Figura 35 Comparación de las estimaciones del GPM con los valores promedio registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona plana	60

Tablas

Tabla 1 Valores de incertidumbre de los pluviómetros utilizados en las EMAs	9
Tabla 2 Estaciones localizadas dentro de la zona de estudio	9
Tabla 3 Capacidad de detección del instrumento Microwave Imager (GMI) del GPM	13
Tabla 4 Especificaciones de diseño del instrumento Dual-frequency Precipitation Radar (DPR)	16
Tabla 5 Fragmento del archivo que contiene los valores de precipitación correspondientes a los intervalos temporales definidos a partir de la Hora parámetro	33
Tabla 6 Índices utilizados en el análisis categórico	35

Resumen

Este trabajo consiste en la validación de las estimaciones de precipitación obtenidas del producto 2BCMB del Satélite GPM (*Global Precipitation Measurement*) de la NASA, utilizando como referencia las mediciones de la red de pluviómetros de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs) del Servicio Meteorológico Nacional, para el período del 1 de enero de 2015 al 31 de octubre de 2017. La zona de estudio tiene un área de 325,000 km² y comprende una porción de los estados de Veracruz, Tabasco, Oaxaca, Chiapas y Campeche.

Se utilizaron los datos de 21 EMAs y los registros de 705 pasos del satélite que fueron extraídos y manipulados mediante el lenguaje de programación *Python*, el sistema de gestión de bases de datos *PostgreSQL 10* y el *software QGIS 3.0*. La validación de los registros está basada en análisis dicotómicos fundamentados en una tabla de contingencia que considera únicamente cuatro posibilidades en la comparación: *hit* (el pluviómetro y el satélite registran), *false alarm* (el pluviómetro no registra, pero el satélite sí), *miss* (el pluviómetro registra, pero el satélite no) y *null* (el pluviómetro no registra y el satélite tampoco). Además, se extrajeron los valores de los *hit*, diferenciando los que se registraron en montaña de los medidos en zonas planas, y se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman para ambos casos.

En total se hicieron 14,805 comparaciones puntuales, de las cuales 3,209 pudieron ser categorizadas con base en los criterios de la tabla de contingencia. Los resultados muestran que los índices están condicionados por el bajo número de estaciones cubiertas en cada paso del satélite, y que hay una mayor concordancia entre las estimaciones remotas y de los pluviómetros cuando los valores *null* son incluidos. Por otra parte, las estimaciones obtenidas mediante el producto 2BCMB son inferiores a las registradas en superficie en un 74% de los casos, observándose una menor correlación entre las mediciones registradas en la zona montañosa con respecto a las que se obtuvieron en la zona plana.

1. Introducción

La interpretación de la distribución e intensidad de la precipitación depende en gran medida de los instrumentos y la temporalidad con la que se realicen las mediciones. Los valores de acumulaciones de lluvia a escala climatológica requieren de redes de pluviómetros menos densas, aunque estas no necesariamente capturan eventos extremos de pequeña escala o la variabilidad en terrenos complejos (Kidd *et al.*, 2017). Para el caso de las estimaciones de eventos de precipitación, es fundamental conocer la certidumbre que ofrecen los instrumentos y hacer uso de otras fuentes que permitan subsanar los problemas derivados de la distribución de estaciones en superficie y cuestiones técnicas de los equipos.

Desde la segunda mitad del siglo XX, los avances en la tecnología espacial han permitido acceder a datos de precipitación de forma indirecta y, con ello, favorecer el entendimiento hidrológico, meteorológico y climatológico. El radar de precipitación (PR) a bordo del satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) fue el primer radar que midió la precipitación desde el espacio como parte de una misión conjunta entre Japón y los Estados Unidos (Kozu *et al.*, 2001). El TRMM inició su actividad en noviembre de 1997 y dejó de registrar datos en abril de 2015. Para darle continuidad al registro, en febrero de 2014 entró en funcionamiento el satélite GPM (*Global Precipitation Measurement*), que mejoró las mediciones de precipitación mediante la implementación de un algoritmo combinado, diseñado para reducir las incertidumbres en las estimaciones de precipitación al integrar información complementaria del radar de precipitación de frecuencia dual GPM (DPR) y el generador de imágenes de microondas GPM (GMI) en un producto de precipitación físicamente consistente (Greco *et al.*, 2016).

Los productos satelitales que estiman precipitación utilizan instrumentos asociados con determinadas longitudes de onda del espectro electromagnético; sin embargo, los productos más exitosos en la actualidad se basan en combinaciones de observaciones de infrarrojos y microondas (Ebert *et al.* 2007). A cada producto se le asocia un algoritmo basado en inferencias sobre la física y microfísica de las nubes y, aunque son de gran ayuda, tienen una

resolución y precisión limitadas, por lo que es necesaria su evaluación (Castro, 2014). La información satelital es sometida a un proceso de verificación denominado Plan de Implementación Científica de Validación Terrestre (GVSIP) que incluye información sobre campañas de muestreo de campo, instrumentos y gestión de datos (Petersen y Schwaller, 2008).

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es el organismo encargado de realizar las mediciones de variables meteorológicas a través de la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas, conformada por 189 estaciones, de las cuales 23 se encuentran dentro del área de estudio considerada para el presente trabajo. La confiabilidad de las mediciones de precipitación está determinada por la densidad y localización de los pluviómetros, las horas a las que se registran las mediciones y la incapacidad del instrumento de diferenciar el tipo de precipitación, de manera que los datos obtenidos a partir de las mediciones en superficie limitan la caracterización de su distribución e intensidad y, por lo tanto, los productos generados por percepción remota, específicamente a través de satélites, pueden ser una herramienta complementaria al generar información de zonas en donde la cobertura de pluviómetros es baja o inexistente.

a. Planteamiento del problema

La confiabilidad de las mediciones de precipitación está determinada por la densidad y localización de los pluviómetros, las horas a las que se registran las mediciones y la incapacidad del instrumento de diferenciar el tipo de precipitación, de modo que los datos obtenidos a partir de las mediciones en superficie limitan la caracterización de su distribución e intensidad y, por lo tanto, la interpretación que pueda derivar de ellos.

b. Justificación

Los productos generados por percepción remota, específicamente a través de satélites, permiten tener acceso a información de superficie de zonas en donde la cobertura de

pluviómetros es baja o inexistente. Actualmente, es posible tener acceso a la información generada por el GPM que, a diferencia de su antecesor (TRMM), posee la capacidad para medir lluvia ligera por medio del radar de precipitación de frecuencia dual de banda Ku / Ka (DPR) y un multicanal Microwave Imager (GMI). En caso de probar que los datos del GPM son confiables, podrían realizarse estudios en diferentes campos del conocimiento que se encuentran limitados por la calidad y cantidad de las mediciones que se realizan en superficie.

c. Hipótesis

Las estimaciones de precipitación obtenidas mediante percepción remota pueden complementar a las registradas en las estaciones de superficie y mejorar la base de datos en la región de estudio.

d. Objetivo general

Validar los registros de precipitación obtenidos a través de satélite con respecto a las mediciones que se realizan con la red de pluviómetros, para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2015 y el 31 de octubre de 2017, en una porción del Sureste de México.

e. Objetivos específicos

- Comparar los eventos puntuales de precipitación registrados en los pluviómetros contra los detectados por el satélite, mediante pruebas dicotómicas basadas en una tabla de contingencia.
- Comparar las estimaciones de precipitación diferentes de cero medidas en las estaciones de superficie contra las que registró el satélite a través de los coeficientes de correlación de Spearman y Pearson.

- Determinar la influencia que ejerce la localización geográfica de las Estaciones Meteorológicas Automáticas en la comparación de los eventos puntuales de precipitación.

Estructura de la Tesis

La presente investigación consta de 8 apartados. El primero define sus alcances y ofrece una primera aproximación a la problemática; el segundo aborda los aspectos teóricos sobre las mediciones de precipitación que dan soporte al trabajo, y el contexto geográfico de la zona de estudio. En el tercero se describen los datos empleados, sus fuentes y características. En el cuarto apartado se explica la metodología utilizada tanto para la conversión de los datos en formatos específicos, como para el proceso de validación. Posteriormente, se muestran los resultados seguidos de la discusión, encaminados a resolver el problema y comprobar la hipótesis. Finalmente se escriben las conclusiones y referencias útiles para esta investigación.

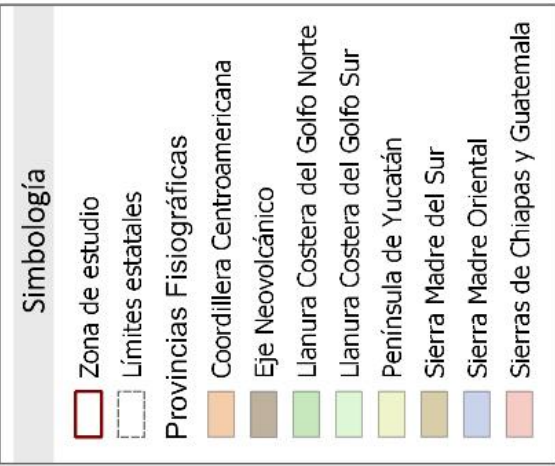
2. Marco teórico

a. Zona de estudio

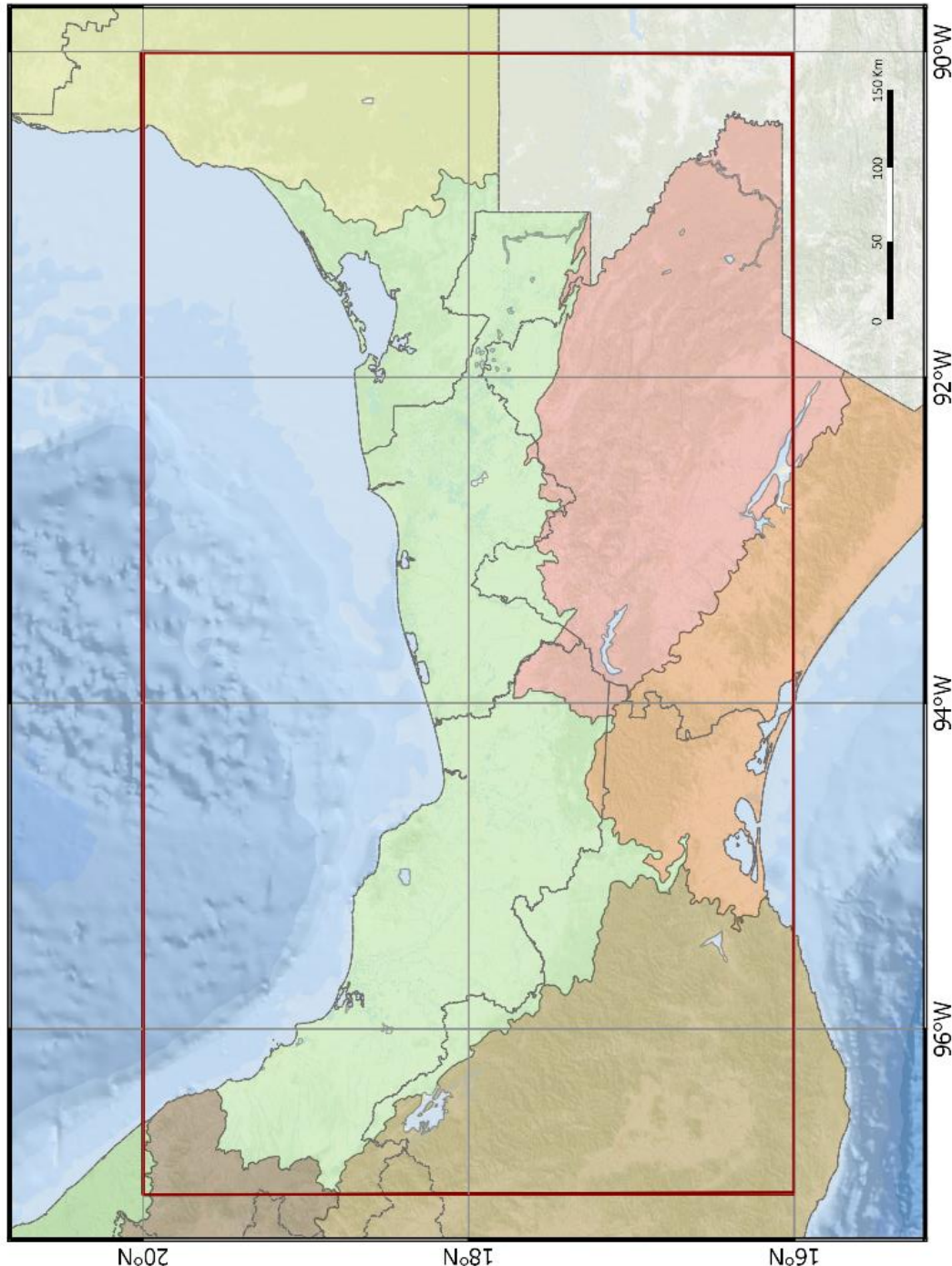
La zona de estudio se localiza en la región sureste de la República Mexicana, sus coordenadas extremas son 90° a 97° de longitud oeste y de 16° a 20° de latitud Norte. Comprende una porción de los estados de Veracruz, Tabasco, Oaxaca, Chiapas y Campeche. Fisiográficamente se sitúa en una parte de las provincias Llanura Costera del Golfo Sur, Sierra Madre del Sur, Eje Neovolcánico, Sierras de Chiapas y Guatemala, Cordillera Centroamericana y Península de Yucatán (Mapa 1), y abarca una superficie de aproximadamente 325,000 km². Por sus características topográficas y su continentalidad, dominan en la zona plana y en la montañosa al sureste los climas cálidos húmedos y subhúmedos, con temperatura media anual mayor que 22°C, lluvias en verano y precipitaciones del mes más seco inferiores que 60 mm. En la Sierra Madre del Sur hay una mayor diversidad, teniendo un clima templado subhúmedo con temperatura media anual de 12°C a 18°C y precipitaciones en el mes más seco menores que 40 mm, así como semiárido cálido con lluvias en verano y temperaturas del mes más frío superiores a 18°C (García, 1998).

b. Medición de precipitación en superficie

La precipitación es definida como todas aquellas partículas acuosas en fase líquida o sólida que se originan en la atmósfera y caen en la superficie terrestre (AMS, 2019). La intensidad de precipitación se refiere a la cantidad de precipitación caída sobre una unidad de superficie horizontal por unidad de tiempo (OMM, 2012). Para este trabajo únicamente será considerada la precipitación líquida registrada tanto por los pluviómetros como por el satélite, cuyas unidades de medición de acumulación son los milímetros, y las de intensidad son los milímetros por hora. La descripción del funcionamiento y características del instrumento se presentan a continuación.



Sistema de referencia espacial: WGS84



Mapa 1 | Delimitación y fisiografía de la zona de estudio.

i. Pluviómetros

Un pluviómetro es un instrumento diseñado para medir la altura de agua de precipitación en un punto (OMM, 2012). Su importancia ha sido histórica, por lo que se tienen registros de mediciones en China en el siglo XIII y en Corea en el siglo XV (Torres, 2018). Existe una gran variedad de pluviómetros basados en diferentes principios de medición; sin embargo, el de balancín es actualmente el más utilizado (Figura 1). Este tipo de pluviómetro consiste en un recipiente, dividido en dos compartimientos, que se coloca en equilibrio inestable sobre un eje horizontal; en su posición normal, el recipiente reposa sobre uno de sus topes, lo que impide que se vuelque completamente. El agua de lluvia es transferida desde un embudo colector ordinario al compartimiento superior; una vez recogido un determinado volumen de lluvia, el objeto colector pierde estabilidad y se inclina hacia su segunda posición de reposo. Los compartimientos del recipiente son de forma tal que el agua puede salir entonces del compartimiento superior que ha vuelto a su posición (Artajo y Senosiain, 2010).

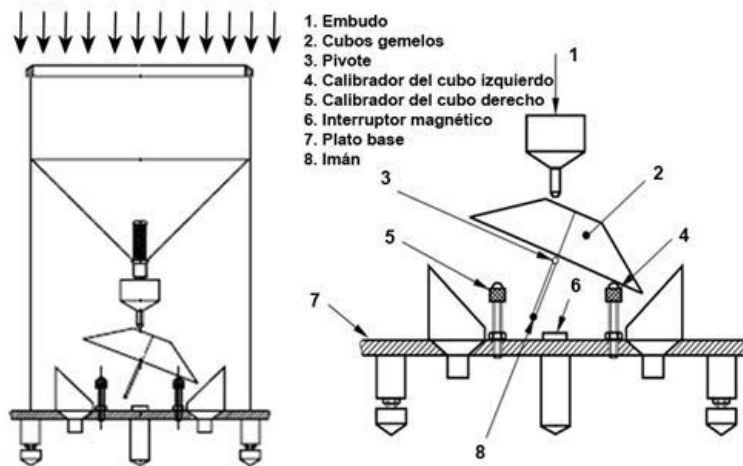


Figura 1 | Esquema del pluviómetro de balancín (Méndez *et al*, 2013).

ii. Estaciones Meteorológicas Automáticas

En la zona de estudio, los registros de precipitación son tomados a través de un conjunto de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs) que se encuentran bajo la administración del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Están conformadas por un grupo de sensores

que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas (SMN, 2018). Los instrumentos para medir precipitación siguen los principios de un pluviómetro de balancín, con la diferencia de que cada vez que bascula el balancín, un imán produce una señal eléctrica en un sensor, lo cual se traduce en una cuenta transmitida a un acumulador de datos (Guijarro, 2002). La red cuenta con 189 EMAs distribuidas en todo el país, de las cuales 23 se encuentran dentro de la zona de estudio. Es importante señalar que la incertidumbre de las mediciones de precipitación se asocia en gran medida a las características de los instrumentos (Tabla 1). Las estaciones útiles para este estudio provienen de tres fabricantes distintos: *Campbell Scientific*, *FTS* y *Vaisala* (Tabla 2).

Para el caso de los pluviómetros de marca *Campbell Scientific*, el fabricante señala que la precisión de las mediciones está determinada no sólo por factores como la fricción del soporte sino también por la tasa de llenado del recipiente. Cuando la lluvia es intensa, el recipiente puede comenzar a volcar cuando el agua necesaria se ha colectado pero, mientras el recipiente se aleja del embudo de salida, un volumen extra se habrá recogido y perdido a través de derrames (Campbell Scientific, 2010).

Los fabricantes de los pluviómetros *FTS* indican que su diseño se caracteriza por tener una superficie interior que arroja el agua mejor que los basculantes metálicos y no permite que recoja polvo o desechos pequeños; además, los rodamientos *Jeweled* proporcionan mínima fricción, lo que da como resultado una alta sensibilidad para captar con precisión incluso eventos muy pequeños de lluvia y evitan que el mecanismo se desgaste con el tiempo (*FTS*, 2018).

Los pluviómetros *Vaisala* se caracterizan por tener un dispositivo de sifón que se adapta a la base del embudo para controlar la tasa del flujo en los cubos. Al asegurar una tasa de flujo constante en el cubo basculante, la calibración se facilita y mejora la precisión. El llenado alterno y la descarga continúan siempre que la lluvia caiga y en cada inclinación, un imán cierra momentáneamente los contactos de un interruptor de láminas (*Vaisala*, 2017).

Fabricante	Incertidumbre dada por el fabricante	Incertidumbre en mm h ⁻¹
Campbell Scientific	4% para lluvias de 25 mm h ⁻¹	1
	8% para lluvias de 133 mm h ⁻¹	1
FTS	± 2% para lluvias de 2 in/h	1.01
Vaisala	2% para lluvias de 1 l/h	0.02

Tabla 1 | Valores de incertidumbre de los pluviómetros utilizados en las EMAs. Campbell Scientific (2010), FTS (2018) y Vaisala (2017).

	Estación	Estado	Marca
1	Yohaltum	Campeche	Campbell Scientific
2	Monclova	Campeche	Campbell Scientific
3	Los Petenes	Campeche	FTS
4	Escárcega	Campeche	FTS
5	Cd. Del Carmen	Campeche	Sin dato
6	Campeche	Campeche	Vaisala
7	Palenque	Chiapas	FTS
8	Montes Azules	Chiapas	FTS
9	Lagunas de Montebello	Chiapas	FTS
10	C. Sumidero	Chiapas	FTS
11	Miahuatlán	Oaxaca	Sin dato
12	Matías Romero	Oaxaca	FTS
13	Benito Juárez	Oaxaca	FTS
14	Paraíso	Tabasco	Vaisala
15	Pantanos de Centla	Tabasco	FTS
16	C. Usumacinta	Tabasco	Sin dato
17	Los Tuxtles I	Veracruz	FTS
18	Los Tuxtles II	Veracruz	FTS
19	La Cangrejera	Veracruz	FTS
20	Córdoba	Veracruz	Campbell Scientific
21	Cd. Alemán	Veracruz	FTS
22	Acayucan	Veracruz	Campbell Scientific
23	Alvarado	Veracruz	FTS

Tabla 2 | Estaciones localizadas dentro de la zona de estudio, Estado en el que se ubican y marca del pluviómetro con el que realizan las estimaciones de precipitación.

Por otra parte, la caracterización de la precipitación depende de la precisión en las mediciones y de la densidad de los instrumentos. Lebel *et al.* (1987) demostraron que, en el caso de una cuenca de 600 Km² con una densidad de aproximadamente un pluviómetro cada

20 a 25 km², la varianza de la precipitación media va del 10 al 15%; sin embargo, cuando se utilizan solo los pluviómetros automáticos, la densidad se reduce a un pluviómetro por cada 60 km² y la varianza aumenta al 30 o 40%, es decir, el error de medición de la precipitación puede ser fácilmente del 50% dependiendo de la densidad de sensores. La consideración anterior implica que, en el caso de tormentas de tipo convectivo, las redes pluviométricas tradicionales no son suficientes para garantizar su seguimiento (Erena *et al.*, 2012).

c. Medición de precipitación por percepción remota

Chuvieco (1996) define a la percepción remota como la ciencia de adquirir y procesar información de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, gracias a la interacción de la energía electromagnética que existe entre el sensor y la Tierra. La posibilidad de obtener información de los objetos, en este caso la superficie terrestre sin estar en contacto con ella, convierte a la percepción remota en una de las herramientas más utilizadas en diferentes disciplinas. En el caso de la meteorología, los satélites han permitido avanzar significativamente en el conocimiento de la atmósfera desde la década de 1960 con los satélites TIROS y, posteriormente, con los GOES-8 y 10, METEOSAT 5, 6 y 7, NOAA 12, 14, TRMM y GPM, entre otros.

i. Global Precipitation Measurement (GPM)

El satélite GPM es parte de una misión diseñada específicamente para unificar y mejorar las mediciones de precipitación de una constelación de sensores operacionales y de investigación con el objetivo de proporcionar estimaciones con altas resoluciones espaciales y temporales. Los datos del GPM proporcionan información sobre la estructura y la intensidad de la precipitación; observaciones de huracanes a medida que pasan de los trópicos a las latitudes medias; datos útiles para la evaluación de riesgos por inundaciones, deslizamientos de tierra y sequías; insumos para mejorar los modelos climáticos; e información sobre la productividad agrícola, el hambre y la salud pública (Skofronick-Jackson *et al.*, 2017).

El GPM fue lanzado el 27 de febrero de 2014, dando continuidad a la labor que realizó el TRMM desde 1997 y hasta abril de 2015. Se sitúa a una altitud de 407 km y se caracteriza

por tener una órbita no sincronizada con el sol, con una inclinación de 65 grados respecto al ecuador, lo que le permite obtener mediciones que coinciden con otros sensores y facilitan la calibración sobre el 90% del planeta (Hou *et al.*, 2014). La inclinación de la órbita también le da la posibilidad de muestrear en latitudes donde se produce casi toda la precipitación y tomar datos en diferentes momentos del día.

El *Core Spacecraft* del GPM fue desarrollado y probado internamente en el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA. Los productos generados por el GPM se caracterizan por dar estimaciones más precisas, especialmente de lluvias ligeras y precipitación sólida (Kidd y Huffman, 2011), y ofrecer datos de precipitación unificados de una constelación de radiómetros de microondas a través del uso de la temperatura de brillo intercalibrada y una base de datos consistente con las mediciones combinadas de radar y radiómetro obtenidas por el Observatorio Central GPM.

La cobertura espacial del GPM es mayor en comparación con la del TRMM: el primero abarca de 68° Norte a 68° Sur y el último de 37° Norte a 37° Sur (Figura 2). Los avances tanto en la instrumentación como en la forma de obtener los datos y la cobertura, permiten mejorar el conocimiento de los procesos de precipitación respecto al tipo y al contenido de agua líquida, al proporcionar información microfísica más detallada.

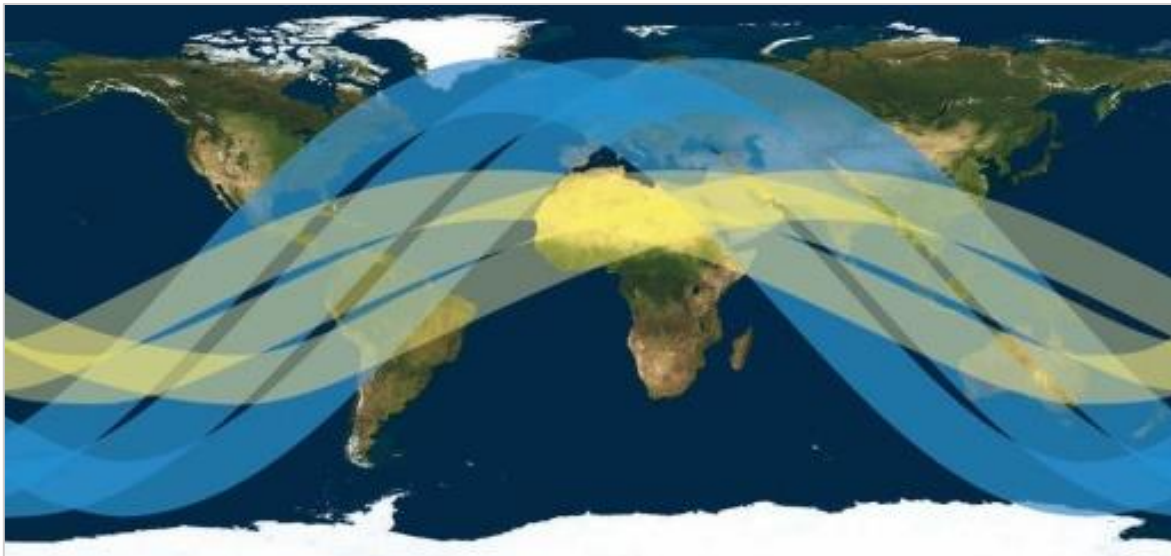


Figura 2 | Diseño de orbitas satelitales. Las líneas azules representan la trayectoria del GPM y las amarillas la del TRMM. Nasa (2019).

ii. Instrumentación

El *Core Spacecraft* se compone de un radiómetro de microondas (*Microwave Imager, GMI*) y un radar de precipitación de doble frecuencia (*Dual-frequency Precipitation Radar, DPR*) (Figura 3) que varían en cobertura espacial como se muestra en la Figura 4. Los instrumentos DPR y GMI tienen la capacidad de caracterizar las propiedades físicas de las partículas que precipitan mediante sus firmas de emisión y dispersión. A continuación se presenta una descripción técnica de ambos instrumentos.

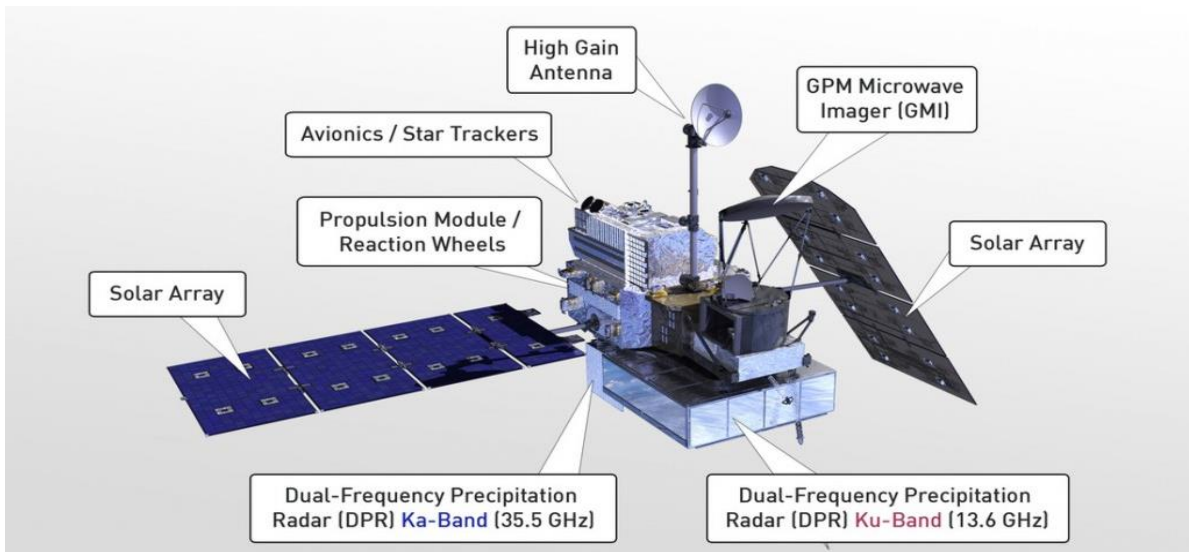


Figura 3 | Instrumentación del satélite GPM. Nasa (2019).

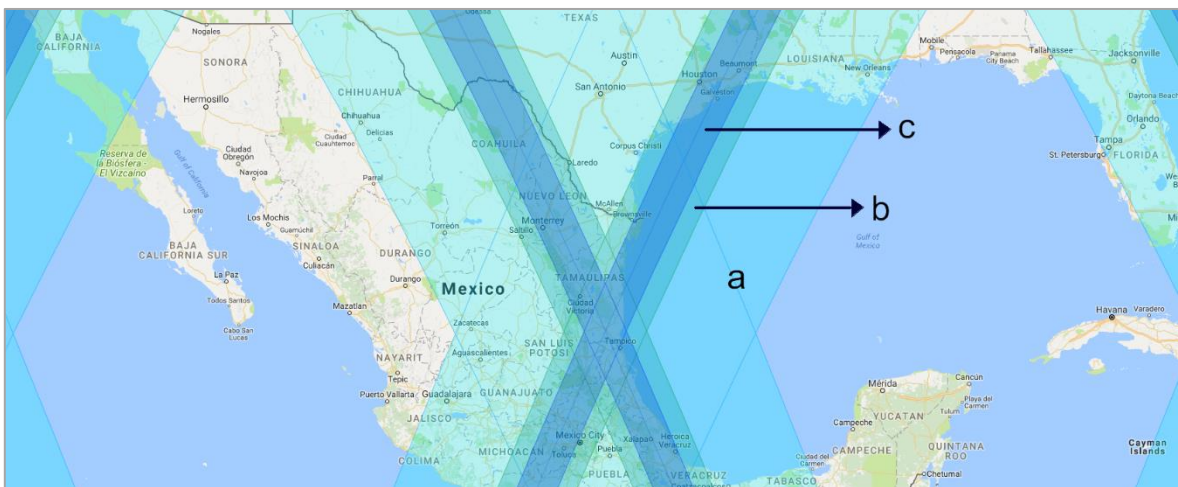


Figura 4 | Esquema de la cobertura espacial de los instrumentos DPR y GMI en una trayectoria. a) GMI; b) banda Ku-DPR; y c) banda Ka-DPR. Nasa (2019).

Microwave Imager (GMI)

El GMI fue desarrollado y construido por *Ball Aerospace and Technology Corporation* bajo contrato con el Centro de Vuelo Espacial Goddard (GSFC) de la NASA. Es un escáner cónico que se caracteriza por usar trece canales para medir la intensidad de la radiación de microondas emitida por la superficie de la tierra y la atmosfera (frecuencia de 10 a 183 GHz). Además de los canales similares a los del *Microwave Imager* (TMI) del TRMM, el GMI tiene cuatro canales de longitud de onda milimétrica de alta frecuencia (alrededor de 166 y 183 GHz); por esta razón, proporciona una resolución espacial significativamente mejorada sobre la del TMI. De acuerdo con Hou (2014), estas frecuencias fueron optimizadas para detectar y diferenciar precipitaciones intensas, moderadas y ligeras (Tabla 3).

Canal	Fenómeno detectado
10 Ghz	Precipitación líquida
19-37 GHz	Precipitación de ligera a moderada sobre el océano
21 GHz	Corrección por la emisión de vapor de agua
89 GHz	Partículas de hielo por precipitación sobre el océano y la tierra
166 GHz	Precipitación ligera típica fuera de los trópicos
183 GHz	Pequeñas partículas de hielo (nevadas) y estimación de lluvias ligeras

Tabla 3 | Capacidad de detección del instrumento Microwave Imager (GMI) del GPM. Hou (2014).

El ángulo que define el cono barrido por el GMI está a 48.5 grados, lo que representa un ángulo de incidencia sobre la Tierra de 52.8 grados a 904 km sobre la superficie, idéntico al de su antecesor TMI. Rota a 32 revoluciones por minuto y obtiene mediciones de brillo radiométrico de microondas en un sector de 140 grados (Figura 5). El sector angular restante se usa para realizar la calibración, es decir, hacer mediciones del “espacio frío” como un referente para la calibración caliente.

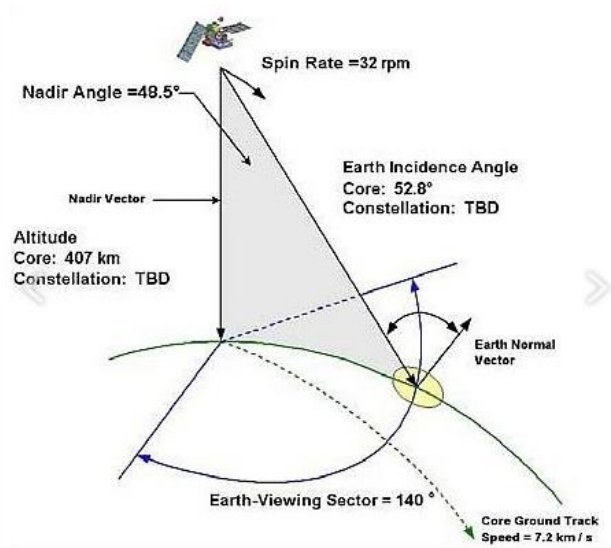


Figura 5 | Esquema que ilustra los parámetros de posición utilizados en el barrido del GMI. Nasa (2019).

El barrido de 140 grados equivale a una franja de 904 km sobre la superficie de la Tierra. Sólo las porciones centrales de la franja GMI coinciden con las del radar, y sus mediciones se obtienen con diferencias de 67 segundos debido a la geometría y el movimiento del satélite (Figura 6).

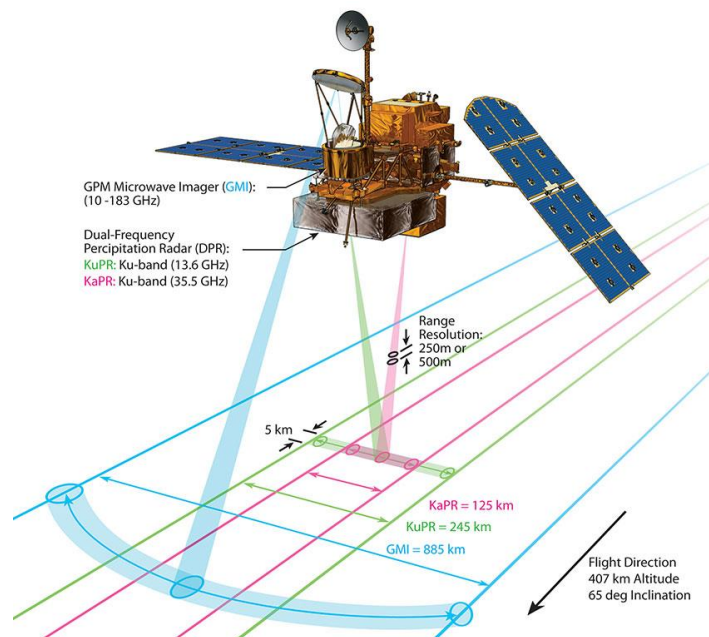


Figura 6 | Esquema de superposición del barrido DPR- GMI. Nasa (2019).

Dual-frequency Precipitation Radar (DPR)

El DPR fue desarrollado por la Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA) y el Instituto Nacional de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (NICT) en Japón, y consiste en un radar de precipitación que opera en la banda Ku (λ_{KuPR}) con barrido de 245 km que opera a 13.6 GHz y una banda Ka (λ_{KaPR}) con barrido de 120 km que opera a 35.5 GHz. Ambas se alinean de modo que la ubicación de la “huella” de 5 km en la Tierra sea la misma. Los datos recopilados de las unidades KuPR y KaPR proporcionan observaciones tridimensionales de la lluvia y también una estimación precisa de la tasa de precipitación (NASA, 2018).

Aunque la banda Ku es muy similar a la que se tenía en el TRMM, el instrumento del GPM tendrá una mayor precisión como resultado de un mayor número de muestras independientes (utilizadas para obtener la potencia de retorno promedio) y una mayor sensibilidad debido a la mayor potencia de pico transmitida para lograr un umbral de detección mínimo de 0.5 mm h^{-1} (Hou, 2014).

Además de ofrecer una mayor sensibilidad a la lluvia ligera, un avance clave del DPR del GPM sobre el radar del TRMM es su capacidad para proporcionar estimaciones cuantitativas de la distribución del tamaño de partículas de precipitación (PSD) de la parte superpuesta de la franja Ku y Ka sobre un rango de intensidades de precipitación hasta aproximadamente 15 mm h^{-1} . La caracterización del parámetro de tamaño y la concentración numérica se pueden utilizar para refinar las suposiciones *a priori* en los algoritmos de recuperación. En general, las mediciones de DPR ofrecerán nuevos conocimientos físicos sobre los procesos microfísicos: evaporación, colisión-coalescencia y agregación; y mayor capacidad para diferenciar la fase la precipitación, así como el contenido de agua líquida. En la Tabla 4 se muestran las especificaciones del diseño.

Item	KuPR	KaPR
Swath Width	245 kilometers (km)	120 kilometers (km)
Range Resolution	250 meters (m)	250/500 meters (m)
Spatial Resolution	5 km (Nadir)	5 km (Nadir)
Beam Width	0.71 degrees	0.71 degrees
Transmitter	128 Solid State Amplifiers	128 Solid State Amplifiers
Peak Transmit Power	1013 Watts (W)	146 Watts (W)
Pulse Repetition Freq. (In nominal operations mode)	4100 to 4400 Hertz	4100 to 4400 Hertz
Pulse Width	two 1.667 microseconds (μ s) pulses	two 1.667 microseconds (μ s) pulses in matched beams two 3.234 microseconds (μ s) pulses in interlaced scans
Beam Number	49	49 (25 in matched beams and 24 in interlaced scans)

Tabla 4 | Especificaciones de diseño del instrumento Dual-frequency Precipitation Radar (DPR). Nasa (2019).

iii. Algoritmo

Durante el tiempo de funcionamiento del TRMM, fueron desarrollados varios algoritmos para estimar la precipitación mediante la combinación de observaciones de radar y de radiómetro de microondas. Haddad *et al.* (1997) utilizaron un enfoque bayesiano para ajustar la atenuación integrada al trayecto en las columnas casi verticales del barrido del radar, basándose en las estimaciones independientes de reflectividad de superficie y las mediciones del radiómetro de microondas. Posteriormente se formuló un enfoque variacional para la estimación radar-radiómetro de la precipitación del TRMM, en el que se usó un parámetro de distribución de tamaño de partícula de precipitación para optimizar la atenuación integrada en cada perfil de radar y que representa una normalización de la lluvia (Osion y Masunaga, 2016). Masunaga y Kummerow (2005) desarrollaron una metodología combinada de algoritmos basada en simulaciones de modelos de *cloud-resolving* y un procedimiento de búsqueda iterativo que determinó cuales eran las observaciones precalculadas más consistentes en comparación con las observaciones reales.

A pesar de que el GPM puede ser considerado una extensión del TRMM, los algoritmos combinados existentes para este último no pueden procesar fácilmente la información del nuevo satélite. Para utilizar el algoritmo del TRMM sería necesaria la inclusión de un término específico para la banda Ka bajo el método de máxima verosimilitud funcional (Greco *et al.*, 2004; Munchak y Kummerow 2011). Dado que este método también es coherente con la estimación del radar de doble frecuencia, se considera el ajuste más apropiado para hacer uso de las nuevas capacidades de observación del GPM. Por otra parte, para reducir los inconvenientes del uso de modelos complejos se utiliza un procedimiento de minimización estadística.

El algoritmo combinado radar-radiómetro del GPM tiene dos funciones básicas: la primera es proveer las estimaciones más precisas de alta resolución que pueden ser obtenidas por una plataforma espacial, tanto de la tasa de precipitación en superficie como de su distribución en el perfil vertical. La segunda es generar una colección representativa de estimaciones globales de precipitación que puedan ser usadas para hacer una calibración cruzada con todos los radiómetros pasivos de microondas en la constelación GPM (Olson *et al.*, 2016).

El algoritmo se compone de tres módulos primarios que abarcan desde la entrada de los datos del sensor satelital hasta los datos de salida como estimaciones de precipitación. El módulo ambiental (*Environment module*) establece el entorno de fondo en las distribuciones de precipitación que serán estimadas; el módulo de radar (*Radar module*) produce arreglos de perfiles de solución consistentes con el radar para cada huella espacial del DPR; y el módulo de radiómetro (*Radiometer module*) modifica los arreglos de precipitación derivados del radar para ser más consistentes con las observaciones del GMI. Las salidas del algoritmo son la media y la desviación estándar del arreglo filtrado DPR-GMI de los perfiles de precipitación estimados en cada huella del DPR (Figura 7).

A continuación, se describen los módulos del algoritmo con base en Olson *et al* (2016):

Módulo ambiental (EM)

La función básica del EM es producir campos de parámetros ambientales en la resolución de muestreo del DPR, tomando una órbita de las reflectividades del DPR (Nivel 2) y una órbita de las temperaturas de brillo de GMI (Nivel 1C). Para este módulo se requieren datos ambientales complementarios que incluyen la presión, temperatura, densidad de vapor, contenido de agua líquida en la nube, temperatura de superficie y velocidad del viento a 10 metros de altitud. Estos datos son proporcionados por un submódulo del Algoritmo Radar Nivel 2, que interpola los análisis y pronósticos de la Agencia Meteorológica Japonesa (JMA) a las áreas definidas por el DPR. El EM toma también como insumo una base de datos geográfica estática que incluye cobertura de agua superficial, la cual se obtiene de la máscara tierra-agua de MODIS con resolución de 250 m e información de elevación de la superficie terrestre derivadas de la Misión topográfica SRTM30 (*Shuttle Radar Topography Mission*) las cuales posteriormente son reproyectadas en el sistema de información geográfica de la NASA *Land Information System* (LIS) en una malla de 1x1 Km y, finalmente, los datos se promedian para ajustar a la escala del DPR de 5x5 km.

Se utiliza un estimador bayesiano para los parámetros ambientales que requiere bases de datos de respaldo que sean consistentes y describan las relaciones entre los parámetros ambientales y las temperaturas de brillo de microondas en las frecuencias/polarizaciones del canal GMI. Las salidas del EM son estimaciones de agua precipitable total en la columna atmosférica (TPW), el camino líquido en la columna de la nube (CLPW), la temperatura superficial (Tsfc) y la velocidad del viento a una altitud de 10m (U10m), que se interpolan en regiones de precipitación para crear un campo completo de parámetros ambientales a través de la banda Ku.

Módulo de radar (RM)

La función principal del RM es estimar conjuntos de parámetros ambientales y de precipitación consistentes con los datos de entrada en cada ubicación de la huella DPR, utilizando un enfoque *Ensemble Kalman Filtering* (EnKF). Para ello, se introducen las salidas del módulo ambiental: TPW, CLPW, Tsfc y U10m.

En este módulo también son considerados otros parámetros que resultan del Algoritmo de Radar Nivel 2 como los perfiles calibrados de reflectividad de las bandas λ_{Ku} y λ_{Ka} y la detección de precipitación. El RM también se basa en los coeficientes de absorción gaseosa/nube tabulados y en los parámetros de dispersión única que se han calculado previamente con el propósito de mejorar la eficiencia computacional del algoritmo. Los coeficientes de absorción gaseosa en las bandas Ku y Ka, así como las frecuencias de los canales GMI, se calculan como funciones de la presión, temperatura y densidad de vapor. Los coeficientes de absorción de agua de nube/hielo a las mismas frecuencias se calculan como funciones de temperatura y contenido equivalente de agua líquida.

Debido a que la precipitación en todas las fases produce dispersión y absorción/emisión de microondas, y dado que la distribución del tamaño de las partículas, la fase y la temperatura de la precipitación determinan sus características de dispersión masiva y absorción/emisión, se utilizan bases de datos separadas para tabular las propiedades de dispersión única de precipitaciones.

Las salidas del módulo de radar son 1) ensambles de campos 3D de presión, temperatura, humedad, contenido de agua en la nube, y de factores involucrados en la distribución del tamaño de las partículas; y 2) campos 2D de temperatura superficial y velocidad del viento a 10 metros, consistentes con los perfiles de reflectividad de las bandas Ka y Ku, las estimaciones de las atenuaciones integradas de las mismas bandas y sus incertidumbres.

Módulo de radiómetro (RMM)

Su función principal es crear nuevos conjuntos de parámetros ambientales y de precipitación, consistentes con los datos de entrada generados por el módulo de radar para cada ubicación de la huella del DPR, utilizando un enfoque EnKF.

Con base en los datos de presión, temperatura, vapor de agua, agua de nube y los involucrados en la distribución del tamaño de las partículas, el módulo del radiómetro deriva los parámetros de dispersión única para cada miembro del conjunto en las frecuencias de canal GMI. Además, los campos de temperatura superficial y velocidad del viento a 10 metros, asociados con los conjuntos, se utilizan para calcular la emisividad de la superficie del océano con base en un modelo denominado FASTEM4.

La temperatura atmosférica y las propiedades de dispersión única, así como la temperatura de la superficie y las emisividades en cada ubicación de la huella DPR, se ingresan en un modelo de transferencia radiativa para calcular las temperaturas de brillo de microondas en esa ubicación. Las salidas del módulo de radiómetro son: a) campos de presión, temperatura, humedad y contenido de agua en la nube; b) valores relacionados con la distribución del tamaño de las partículas: factor de forma (μ), intersección de la distribución normalizada (N_w) y diámetro medio del volumen (D_o); c) conjuntos 2D de temperatura superficial y velocidad del viento a 10 m, compatibles con los perfiles de reflectividad de las bandas Ka y Ku, las estimaciones de las atenuaciones integradas de las mismas bandas y sus incertidumbres; y d) campos de temperatura de brillo del GMI y sus incertidumbres.

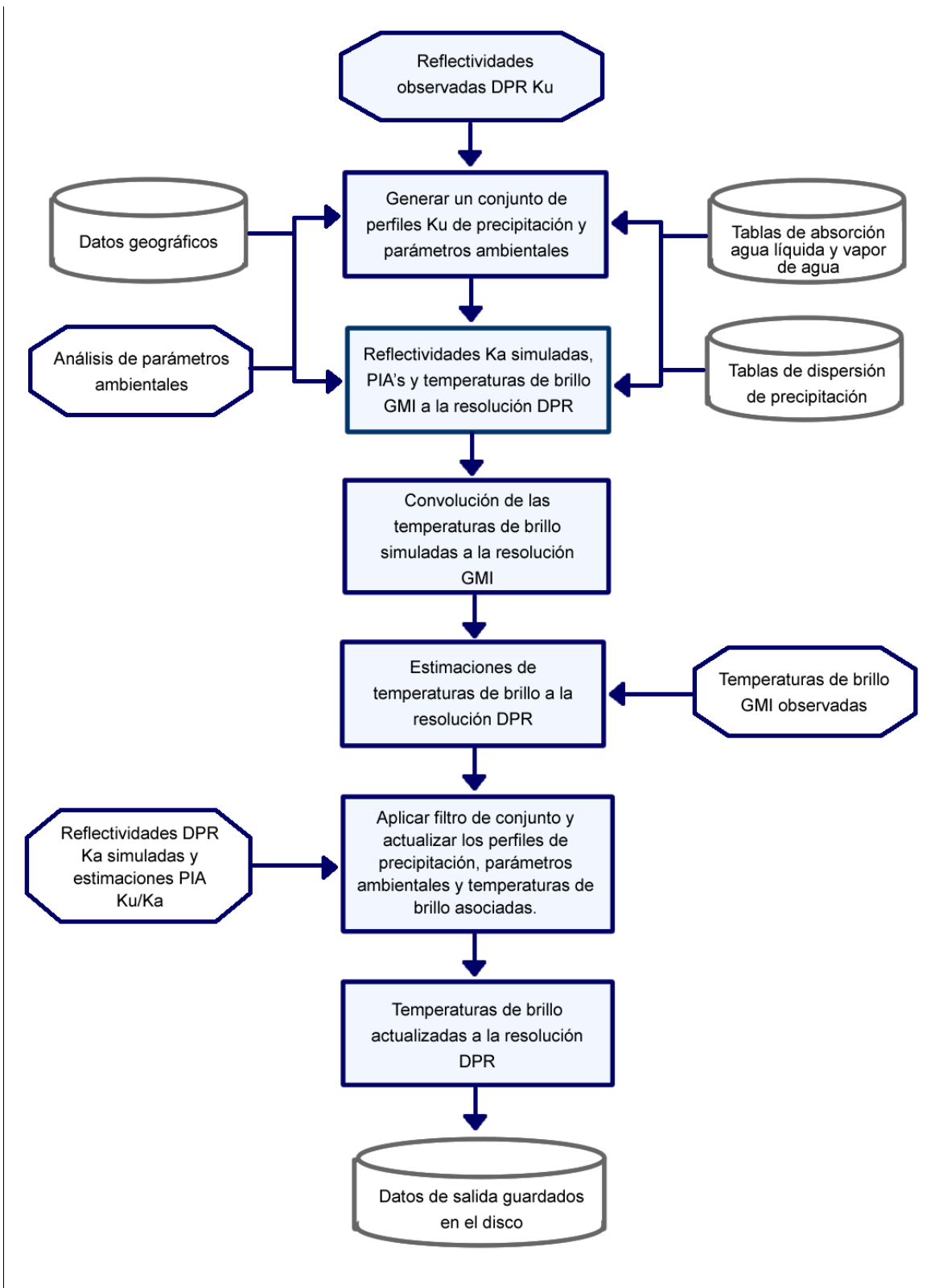


Figura 7 | Esquema del procesamiento del Algoritmo Combinado del GPM. Elaborado con base en Olson et al. (2016).

iv. Validación de productos satelitales

Los algoritmos del satélite a través de los cuales se obtienen los datos de precipitación son sometidos a un proceso de validación y calibración basado tanto en mediciones de otros sensores remotos como en instrumentos de superficie. En el caso del GPM se utiliza una técnica de coincidencia de geometría, basada en la determinación de la intersección de los rayos DPR individuales con cada uno de los barridos del radar terrestre. Además, se cuenta con 60 puntos de control en superficie distribuidos en Estados Unidos, el sureste de Asia y Brasil (NASA, 2015). La red de validación del GPM denominada VN (*Validation Network* por sus siglas en inglés) entró en funcionamiento en 2006 con el objetivo de dar sustento al algoritmo de recuperación de precipitación antes de que el GPM fuera lanzado, y que posteriormente se usara para validar las mediciones y los productos obtenidos desde el espacio (Schwaller y Morris, 2011).

Trabajos como los de Islam *et al.* (2012); Montero *et al.* (2012); y Chen y Li (2016) evidencian que es fundamental la validación de los productos de satélite para cada zona de estudio, debido a la influencia que puedan ejercer la estacionalidad y las características geográficas particulares en las estimaciones de precipitación. Esta influencia podría reflejarse en la subestimación o sobrestimación de la ocurrencia de eventos de precipitación o en la cantidad de lluvia superficial, tal como se muestra en los trabajos de Kubota *et al.* (2007), Sapiano y Arkin (2008), Dinku *et al.* (2010), Chen *et al.* (2014), Castro (2014), Dinku *et al.* (2014), Prakash *et al.* (2015) y Asurza *et al.* (2018).

Existen diversas metodologías para validar las estimaciones de precipitación de los productos satélites utilizando como referencia generalmente lecturas de pluviómetros, las que, de acuerdo con Jiménez (2016), pueden ser usadas para remover errores sistemáticos de datos menos precisos de satélites, y estos luego pueden ser usados para calcular precipitación en áreas donde no se dispone de mediciones en superficie. Idealmente deberían seleccionarse para la validación de datos satelitales zonas con altas densidades de pluviómetros que permitan calibrar y después validar los datos, tal como lo plantean Nanding *et al.* (2015) y Rozante *et al.* (2010). Es necesario señalar que es posible la utilización de otros recursos

tecnológicos, como los disdrómetros como remplazo de los pluviómetros (Krajewski y Smith, 2002).

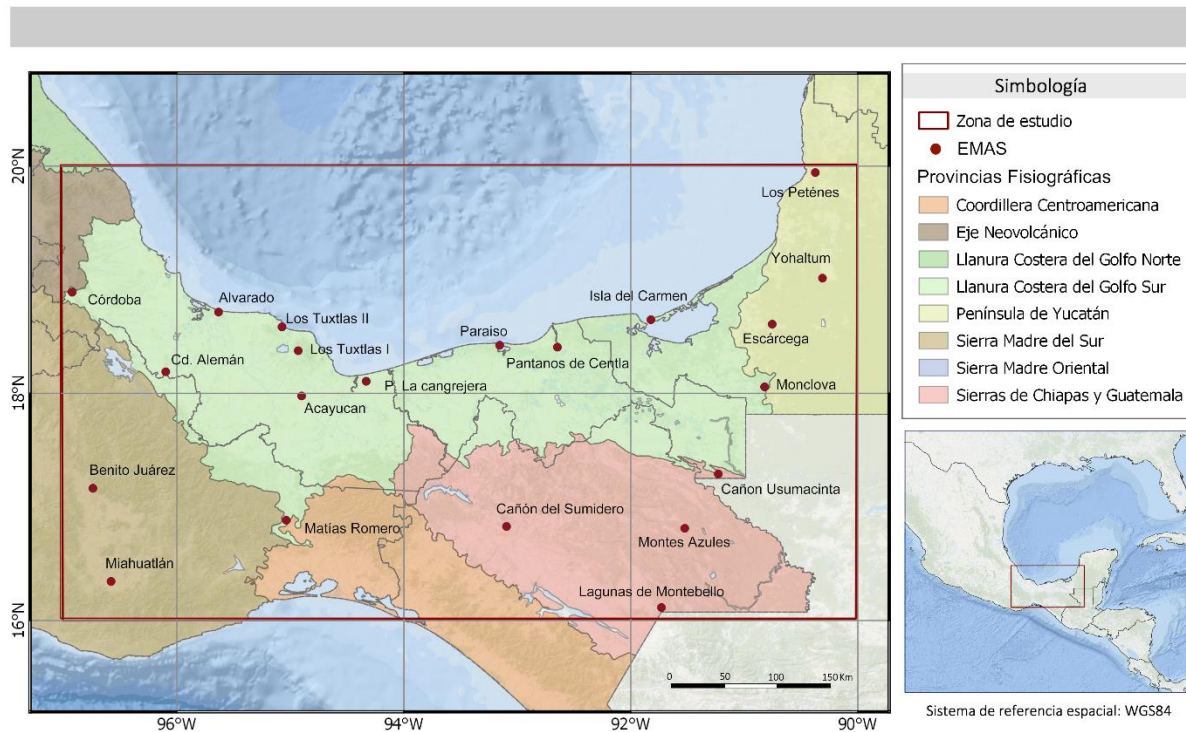
Las comparaciones entre las estimaciones de satélites y estaciones meteorológicas en superficie generalmente utilizan métodos de interpolación que permiten crear una malla con valores continuos de precipitación con la misma resolución espacial que los satélites, y presentan una solución a la problemática de las comparaciones entre valores puntuales y por áreas, como lo mencionan Ebert *et al.* (2007), Li y Shao (2010) y Vallejos *et al.* (2016).

Por otra parte, se han hecho validaciones de los productos de satélite para determinar qué tan útiles pueden ser como insumos de modelos hidrológicos de inundaciones, ocurrencia de deslizamientos asociados a patrones de precipitación o ciclones tropicales (Chiang *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2013; Hong *et al.*, 2006). En 2002, Collier consideró que el error detectado en los datos obtenidos a través de percepción remota no permitía incluirlos en los modelos destinados a hacer pronóstico de precipitaciones e inundaciones, pero que el entendimiento del error y su inclusión en los ajustes a los algoritmos ofrecía una solución. Para Huges (2006), este error se basaba principalmente en la baja densidad de estaciones en superficie, en que los datos no se encontraran completos y en que los satélites no eran sensibles a las características topográficas de los sitios.

3. Materiales

a. Datos de superficie

La base de datos de precipitación registrados en superficie fue proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional y consiste en los registros de las 21 Estaciones Meteorológicas Automáticas localizadas en la zona de estudio que, hasta el 1 de noviembre de 2017, se encontraban en funcionamiento. Las mediciones de precipitación están dadas cada 10 minutos y las unidades utilizadas son los milímetros. Los archivos tienen extensiones *.xls* y *.csv*. El 70% de las EMAs se localizan en la zona plana dentro de las provincias Llanura Costera del Golfo Sur y Península de Yucatán, y el 30% restante en zona con topografía compleja (Mapa 2).



Mapa 2 | Distribución de EMAs sobre provincias fisiográficas.

b. Datos de satélite

Los datos de precipitación generados por el satélite GPM se obtuvieron del producto combinado de radar-radiómetro 2BCMB de Nivel 2. Los archivos están escritos como una estructura de doble barrido: el primero, denominado NS, contiene 49 rayos que coinciden con la banda Ku del *Dual-frequency Precipitation Radar*; y el segundo, MS, contiene 25 rayos que coinciden con la banda Ka del mismo instrumento (NASA, 2017).

Para esta investigación se utilizaron únicamente los datos del barrido MS. Estos se encuentran en un formato HDF5 (*Hierarchical Data Format*) y están organizados de forma matricial en función del recorrido completo de la órbita (Figura 8). Las estimaciones de precipitación corresponden a la variable “surfPrecipToRate” y proporcionan registros de intensidad de precipitación, es decir, las unidades en las que se encuentran son milímetros por hora.

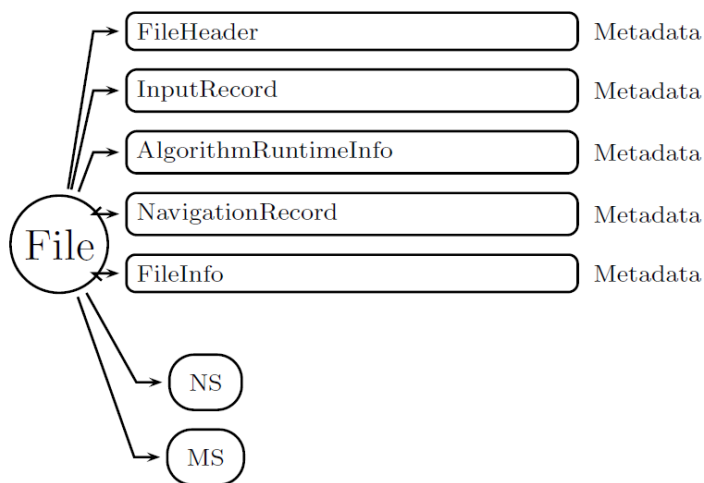


Figura 8 | Estructura del formato de datos del producto combinado Nivel 2 DPR-GMI. Nasa (2017).

4. Métodos

a. Procesamiento de datos

i. Datos de satélite

Los productos 2BCMB fueron descargados de la plataforma STORM de la NASA con un filtro espacial de 16° a 20° latitud norte y 90° a 97° longitud oeste, y un filtro temporal del 1 de enero de 2015 al 31 de octubre de 2017. Se utilizó el visualizador *HDF View* para analizar la estructura jerárquica del formato HDF5 y se observó que el filtro geográfico aplica únicamente para la selección de los pasos del satélite por la zona de estudio, pero los archivos conservan los datos de las órbitas completas. Por ello, fue necesario extraer los valores de interés y, posteriormente, darles un formato adecuado para el análisis, utilizando el lenguaje de programación *Python*.

El proceso basado en *Python* consistió en extraer las variables latitud, longitud, precipitación y las horas del paso del satélite inicial (Hora 1) y final (Hora 2), que corresponden al momento en el que el GPM atraviesa los 16° y 20° de latitud, para después almacenarlos en un archivo delimitado por comas. Además, se realizó un filtro para seleccionar aquellos en donde se había registrado al menos un pixel con precipitación, resultando un total de 705 archivos.

Los archivos delimitados por comas se exportaron al software *QGIS* para recrear la trayectoria del GPM (Figura 9). Debido a que el proceso de validación de las estimaciones de precipitación está basado en comparaciones puntuales, y los puntos de la malla del satélite no coinciden exactamente con la localización de las EMAs, fue necesario convertir cada coordenada del satélite en un área de 5x5 Km tomándola como el punto central de cada celda (Figura 10) y, de esta forma, obtener los valores de precipitación correspondientes a las estaciones en superficie.

Para verificar que los resultados del proceso fueran correctos, se seleccionaron 15 archivos. Para cada uno se generó una imagen mediante el visualizador de la NASA *Orbit Viewer* (Figura 11) y las imágenes se georreferenciaron en *QGIS* para, posteriormente, sobreponer los

archivos creados con base en los puntos (Figura 12). Se observó que el ajuste es casi perfecto a excepción de los bordes, debido a la diferencia de resoluciones entre el archivo raster y el vectorial.

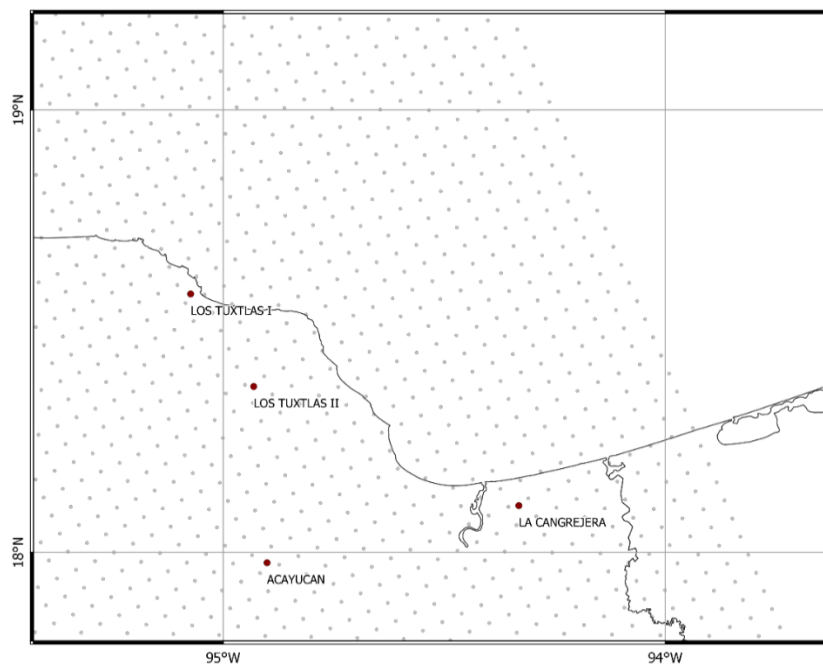


Figura 9 | Proyección puntual de la trayectoria de un paso del satélite mediante el software *QGIS* utilizando como base el archivo delimitado por comas. Cada uno de los puntos grises tiene asociado un valor de precipitación estimado por el GPM. Los puntos rojos representan las EMAs. Datos correspondientes al paso del satélite el 30 de mayo de 2017.

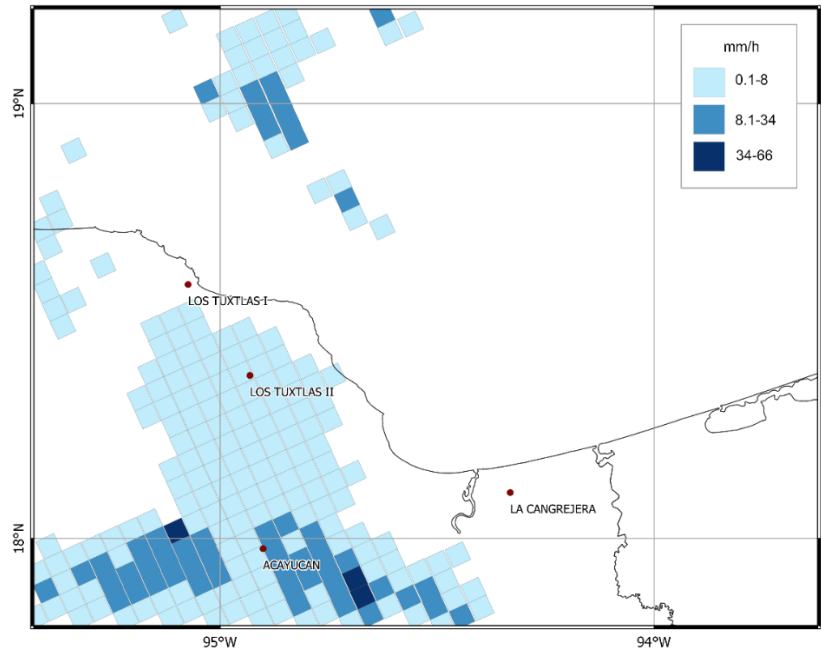


Figura 10 | Conversión de la proyección puntual en una malla con la misma resolución espacial del satélite (5x5 km). Los diferentes tonos azules representan valores de intensidad de precipitación (mm h^{-1}) cuyos intervalos se muestran en la parte superior derecha. Los puntos rojos simbolizan las EMAs. Datos correspondientes al paso del satélite el 30 de mayo de 2017.

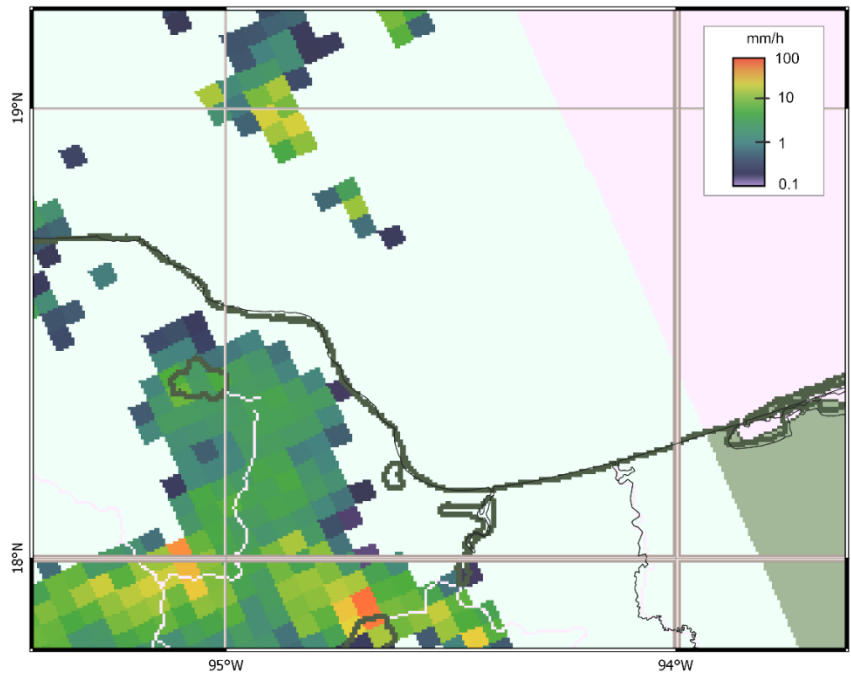


Figura 11 | Imagen de la trayectoria del satélite visualizada mediante el software *Orbit Viewer* de la NASA. Los colores de la malla representan intensidades de precipitación cuyos intervalos se muestran en la parte superior del gráfico. Datos correspondientes al paso del satélite el 30 de mayo de 2017.

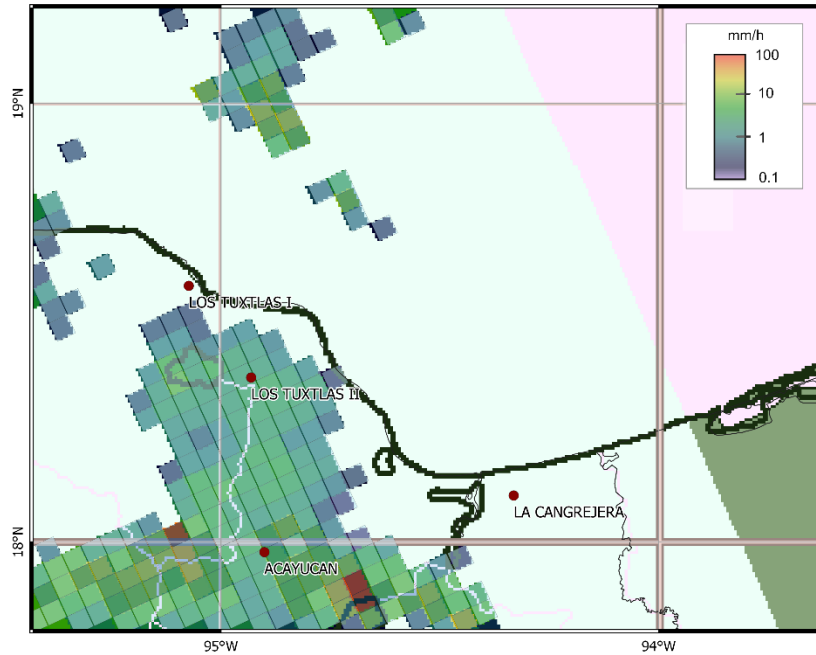


Figura 12 | Superposición de la malla recreada con el software *QGIS* sobre la imagen obtenida con el visualizador de la NASA como parte del proceso de verificación. Los colores de la malla representan intensidades de precipitación (mm h^{-1}). Datos correspondientes al paso del satélite el 30 de mayo de 2017.

El proceso de reconstrucción de la malla se repitió para cada uno de los 705 archivos del satélite y, posteriormente, se extrajeron mediante *QGIS* los valores de precipitación para cada EMA tomados del pixel sobre el que se localizaba la estación. Como resultado, se obtuvo un archivo con extensión *.xlsx* con los datos de cada paso del satélite: fecha, nombre, horas en la que inicia y termina su paso por la zona de estudio y el valor de precipitación. Si el satélite no pasó por la estación, se le asignó una F a la celda.

Finalmente, con el objetivo de definir una hora para seleccionar los datos de superficie, se calculó la diferencia entre la Hora 1 y la Hora 2, se dividió entre dos y el valor se sumó a la Hora 1. El resultado fue definido como hora parámetro (Hora P).

ii. Datos de superficie

Para extraer los datos de precipitación generados por las EMAs se homologó el encabezado, fecha, nombre y tipo de cada archivo (55 en total). Debido a que los datos de precipitación de los pluviómetros están dados cada 10 minutos, fue necesario tomar dos consideraciones para definir el criterio temporal de comparación: el primero está asociado con el tiempo del paso del satélite sobre la zona de estudio, y el segundo se relaciona con la duración de los eventos de precipitación.

Para la primera consideración es importante mencionar que se utilizó la variable denominada de “superficie” del producto 2BCMB, que toma como base las estimaciones cercanas a superficie (*Near surface*) del producto 2ADPR (Nivel 2). A pesar de que en el algoritmo son tomados en cuenta los valores de velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie, en la documentación de los productos no se especifica cómo se determina el valor “cerca de superficie” y, por lo tanto, a qué altura corresponde la estimación que da el satélite. Iguchi *et al.* (2010) muestran un gráfico con esta variable para el método que utiliza el GPM en la clasificación de precipitación, denominado DFR (*Dual Frequency ratio*), donde se establece por debajo de los 500 m. Considerando que este es el punto donde el satélite mide la precipitación, y tomando un espectro de tamaños de gotas que van desde los 0.5 mm hasta los 6 mm con velocidades terminales de 1.98 m s^{-1} y 9.14 m s^{-1} , respectivamente (Best, 1950), las gotas que mide el satélite tardarían entre 55 segundos y 4 minutos en alcanzar la superficie.

El satélite tarda aproximadamente 65 segundos en desplazarse por la zona de estudio, por lo que fue necesario contemplar algunos minutos previos, tomando en cuenta que podría coincidir su paso con que el pluviómetro se vaciara y no hubiera registro en superficie. Derivado de estas suposiciones, se eligieron nueve órbitas con la finalidad de determinar el intervalo temporal que mejor representara los eventos de precipitación en superficie. La selección de las órbitas se realizó utilizando los siguientes criterios: mayor número de

estaciones cubiertas, mayor número de registros de precipitación y eventos con registros relativamente continuos.

Al observar los datos de los 17 eventos seleccionados correspondientes a nueve orbitas diferentes, se tomó la hora parámetro del satélite como el valor central de un intervalo de 30 minutos de la siguiente forma:

- Si el valor de las unidades en los minutos es menor que cinco, se tomará la medición diez minutos antes del múltiplo inferior inmediato. Por ejemplo:

Hora GPM	Múltiplo inferior	Medición inicial
04:22	04:20	04:10
22:34	22:30	22:20
07:31	07:30	07:20

- Si el valor de las unidades en los minutos es mayor que cinco, se tomará la medición del múltiplo inferior inmediato. Por ejemplo:

Hora GPM	Múltiplo inferior	Medición inicial
04:26	04:20	04:20
22:38	22:30	22:30
07:37	07:30	07:30

Para el caso del tiempo posterior al paso del satélite:

- Si el valor de las unidades en los minutos es menor que cinco, se tomará la medición del múltiplo inferior inmediato y diez minutos más. Por ejemplo:

Hora GPM	Múltiplo inferior	Medición intermedia y final
04:22	04:20	04:20 04:30
22:34	22:30	22:30 22:40
07:31	07:30	07:30 07:40

- Si el valor de las unidades en los minutos es mayor que cinco, se tomará la medición del múltiplo superior inmediato y diez minutos más. Por ejemplo:

Hora GPM	Múltiplo superior	Medición intermedia y final
04:26	04:30	04:30 04:40
22:38	22:40	22:40 22:50
07:37	07:40	07:40 07:50

En resumen:

Hora GPM	Hora de los registros de superficie considerados
04:22	04:10
	04:20
	04:30
22:34	22:20
	22:30
	22:40
22:38	22:30
	22:40
	22:50
07:37	22:30
	22:40
	22:50

El cálculo de las horas para cada paso del satélite, partiendo de la Hora P, se realizó con el lenguaje de programación *Python*, en donde se repitieron los nombres de los archivos, el valor de la Hora P y la estimación de precipitación del GPM. El resultado fue una base de datos de 2115 filas por 21 columnas con la estructura que se muestra en la Tabla 5.

Nombre		Fecha y hora estimada		Hora P	ACAYUCAN	ALVARADO	BENITO	SUMIDERO	ALEMAN	CORDOBA	ESCARCEGA	CARMEN	CANGREJERA	MONTEBELLO	PETENES	TUXTLAS1	TUXTLAS2
S060708	E073939	4786	1/1/2015 6:30	6:35	-1	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
S060708	E073939	4786	1/1/2015 6:40	6:35	-1	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
S060708	E073939	4786	1/1/2015 6:50	6:35	-1	0	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
S152748	E170021	8106	2/8/2015 16:10	15:56	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1
S163448	E180722	8589	2/9/2015 17:30	17:39	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	-1	-1
S163448	E180722	8589	2/9/2015 17:40	17:39	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	-1	-1
S163448	E180722	8589	2/9/2015 17:50	17:39	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	-1	-1
S074704	E091936	9050	2/10/2015 8:40	8:51	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	3.67899	-1	-1	0	-1	-1
S074704	E091936	9050	2/10/2015 8:50	8:51	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	3.67899	-1	-1	0	-1	-1
S074704	E091936	9050	2/10/2015 9:00	8:51	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	3.67899	-1	-1	0	-1	-1
S153230	E170502	5539	2/18/2015 15:50	16:00	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.722775	-1	-1	0	0	-1	-1
S153230	E170502	5539	2/18/2015 16:00	16:00	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.722775	-1	-1	0	0	-1	-1
S153230	E170502	5539	2/18/2015 16:10	16:00	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0.722775	-1	-1	0	0	-1	-1

Tabla 5 | Fragmento del archivo que contiene los registros de precipitación correspondientes a los intervalos temporales definidos a partir de la Hora parámetro. Los valores -1 corresponden a los casos en los que no se tiene registro porque el satélite no pasó por la estación en superficie. Los cero representan los casos en donde el satélite pasó por la estación, pero no registró precipitación. Las mediciones de precipitación están dadas en unidades de intensidad (mm h^{-1}).

Los archivos de precipitación de las EMAs se exportaron a *PostgreSQL* de manera individual, para luego generar una base completa de las mediciones de los pluviómetros. Así mismo, se exportó la base de datos del GPM y se unió con la de superficie mediante el proceso *Join*, con la finalidad de obtener los pares de datos necesarios para la comparación.

b. Validación

La validación de los datos se realizó con base en análisis dicotómicos ampliamente utilizados en el campo de la meteorología, principalmente para pronósticos (*e.g.* Roebber, 2009; Tartaglione, 2010; Wilks, 2011; Chaudhuri y Middey, 2012;). Se fundamentan en una tabla de contingencia (Figura 13) que considera únicamente cuatro posibilidades en la comparación de registros de precipitación: *hit* (el pluviómetro y el satélite registran), *false alarm* (el pluviómetro no registra, pero el satélite sí), *miss* (el pluviómetro registra, pero el satélite no) y *null* (el pluviómetro no registra y el satélite tampoco). La tabla de contingencia es una forma útil de ver qué tipos de errores se están cometiendo, por lo que un sistema de pronóstico perfecto solo produciría *hit* y *null*, pero no *miss* ni *false alarm* (WWRP, 2017) y se aplicaría este criterio para un sistema de validación perfecto.

		Detecciones	
		Satélite	
		Si	No
Observaciones	Superficie	Hit	Miss
	No	False alarm	Null

Figura 13 | Estructura de una tabla de contingencia.

La primera etapa en la validación consistió en comparar los registros del GPM contra los de superficie en cada estación (3 registros en el intervalo de media hora) por cada paso del satélite, y asignarles una categoría con base en la tabla de contingencia. La clasificación se realizó en *PostgreSQL* a partir de los siguientes criterios:

1. Si el registro en superficie es mayor que cero y también el del satélite, es un *hit* y se representa en la base de datos con una H.
2. Si el registro en superficie es mayor que cero y el de satélite es igual a cero, es un *miss* y se representa en la base de datos con una M.
3. Si el registro en superficie es igual a cero y el de satélite es mayor que cero, es un *false alarm* y se representa en la base de datos con una F.
4. Si los registros de superficie y del satélite son iguales a cero, es un *null* y se representa en la base de datos con una N.

A todas las comparaciones que no cumplieran con esos criterios, es decir, en las que el satélite no pasara por la estación o que en superficie no existiera el registro, se les asignó una X. En total se obtuvieron 2115 clasificaciones (3 por cada paso del satélite); sin embargo, para realizar el análisis dicotómico se definieron criterios jerárquicos que permitieran obtener una sola categoría por cada paso del GPM y son descritos a continuación:

- a) Si en al menos una de las tres comparaciones de cada evento se registró un *hit*, entonces se le asigna una H.
- b) Si no registró ningún *hit* en las tres estimaciones, pero sí un *miss*, se le asigna una M.
- c) Si no se registraron *hit* ni *miss* pero sí *false alarm*, entonces el evento es F.
- d) Si los tres fueron *null* se asigna N.
- e) Si los tres registros fueron X, no son tomados en cuenta para el cálculo de los índices dicotómicos.

Utilizando los criterios descritos anteriormente se generó una nueva base de datos que contiene los resultados de las 705 categorizaciones basadas en la tabla de contingencia por cada paso del satélite. Posteriormente, se realizó el conteo del número de *hit*, *miss*, *false alarm* y *null* por cada paso del GPM para calcular y graficar los índices para el análisis dicotómico (Tabla 6).

Índice	Abreviatura	Ecuación	Puntajes	
			Mínimo	Máximo
<i>Accuracy</i>	AC	$Accuracy = H + N / T$	0	1
<i>Bias score</i>	BIAS	$BIAS = H + F / H + M$	0	∞
<i>False alarm ratio</i>	FAR	$FAR = F / H + F$	0	1
<i>Success ratio</i>	SR	$SR = H / H + F$	0	1
<i>Probability of detection</i>	POD	$POD = H / H + M$	0	1
<i>Probability of false detection</i>	POFD	$POFD = F / N + F$	0	1
<i>Critical success index</i>	CSI	$TS = H / H + M + F$	0	1
<i>Gilbert skill score</i>	GSS	$ETS = H - Hr / H + M + F - Hr$ $Hr = (H + M)(H + F) / T$	-1/3	1
<i>Odds ratio</i>	OR	$OR = H * N / M * F$	0	∞
<i>Odds ratio skill score</i>	ORSS	$ORSS = (H * N) - (M * F) / (H * N) + (M * F)$	-1	1

Tabla 6 | índices utilizados en el análisis categórico. En las ecuaciones H=*hit*, M=*miss*, F=*false alarm* y N=*null*. Elaborado con base en WWRP (2017).

La segunda etapa de la validación consistió en comparar numéricamente las estimaciones del pluviómetro y del satélite; para ello se extrajeron de la base de datos los *hit*, es decir, los registros en donde ambos instrumentos midieron valores de precipitación diferentes de cero y posteriormente se homologaron las unidades a mm h⁻¹. Se obtuvieron un total de 77 pares de datos y se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman (Tabla 7) utilizando el lenguaje de programación Python.

a	b
$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right]}}$ $-1 \leq \gamma \leq 1$	$\gamma_s = \frac{\frac{n^3 - n}{12} - \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{2}}{\sqrt{\left(\frac{\eta^3 - \eta}{12} \right) \left(\frac{\eta^3 - \eta}{12} \right)}} = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{\eta^3 - \eta}$ $-1 \leq \gamma_s \leq 1$

Tabla 7 | a) Ecuación para el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Donde X y Y representan las estimaciones de precipitación en superficie y detectadas por el satélite respectivamente. b) Ecuación para el cálculo del coeficiente de correlación de Spearman. Donde η es el número de datos y d_i^2 es la diferencia de rangos entre las variables de precipitación medidas en superficie y detectadas por el satélite.

5. Resultados

En el período comprendido entre el 1 de enero de 2015 al 31 de octubre de 2017, el satélite GPM pasó 705 veces por la zona de estudio dentro de la que se localizan las 21 Estaciones Meteorológicas Automáticas utilizadas para esta investigación y, en cada paso del satélite, se cubrió un máximo de 11 estaciones, como se muestra en la Figura 14. Dado que para cada paso del satélite se tomaron 3 registros en superficie, se compararon 44,415 mediciones que posteriormente fueron clasificadas con base en la tabla de contingencia, como se describe en la metodología, obteniendo una categoría por cada paso del GPM para cada estación. De los 14,805 registros resultantes, sólo en 3,209 casos ambos instrumentos midieron precipitaciones iguales o mayores que cero, es decir, en 11,576 no había registro en superficie o el paso del satélite no coincidió geográficamente con las estaciones.

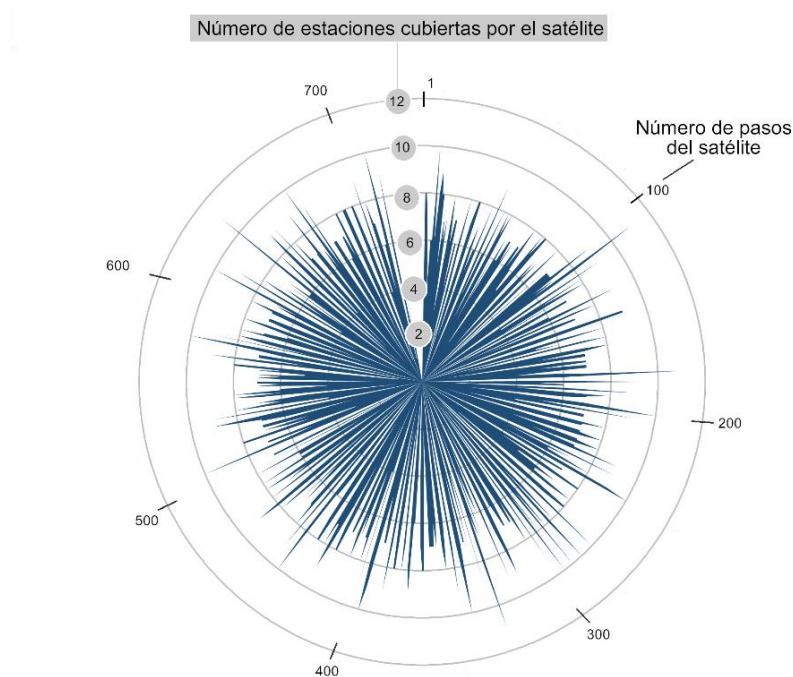


Figura 14 | Cobertura de EMAs por el GPM. La longitud de la línea representa el número de estaciones cubiertas y los valores mostrados en el círculo exterior corresponden a cada uno de los pasos del satélite (del 1 al 705 en el sentido de las manecillas del reloj).

En el 89% de las 3,209 mediciones, tanto el satélite como el pluviómetro registraron cero y sólo en el 2.4 % ambos instrumentos midieron valores de precipitación diferentes de cero. En el caso de los *miss* y *false alarm* muestran porcentajes de 3.7 y 4.3 con respecto al total (ver Figura 15).

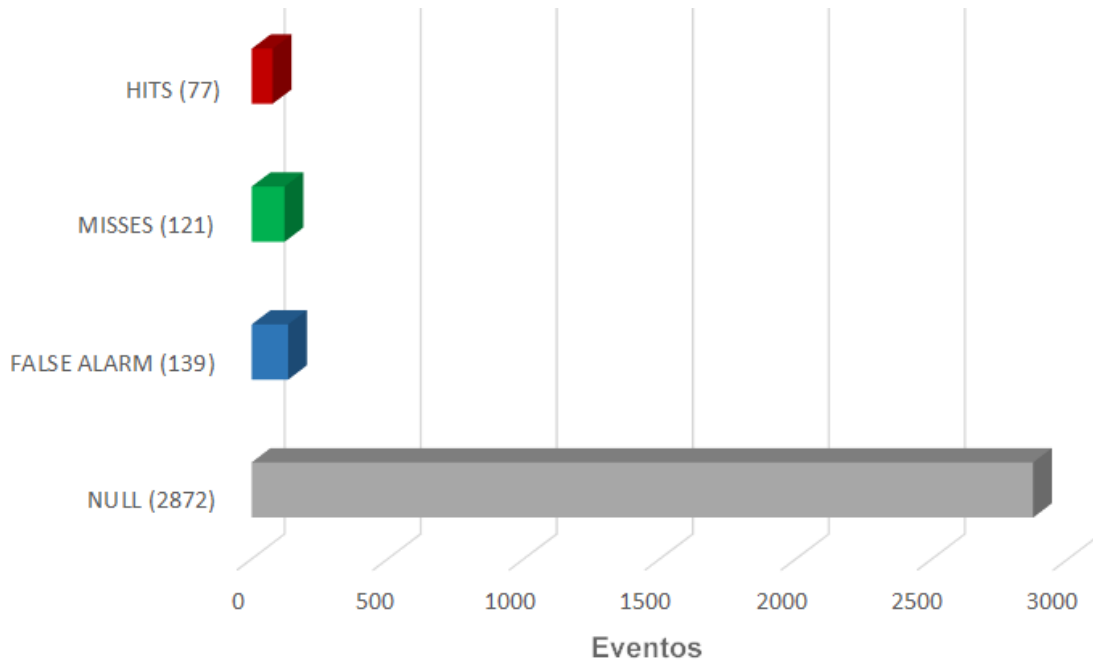
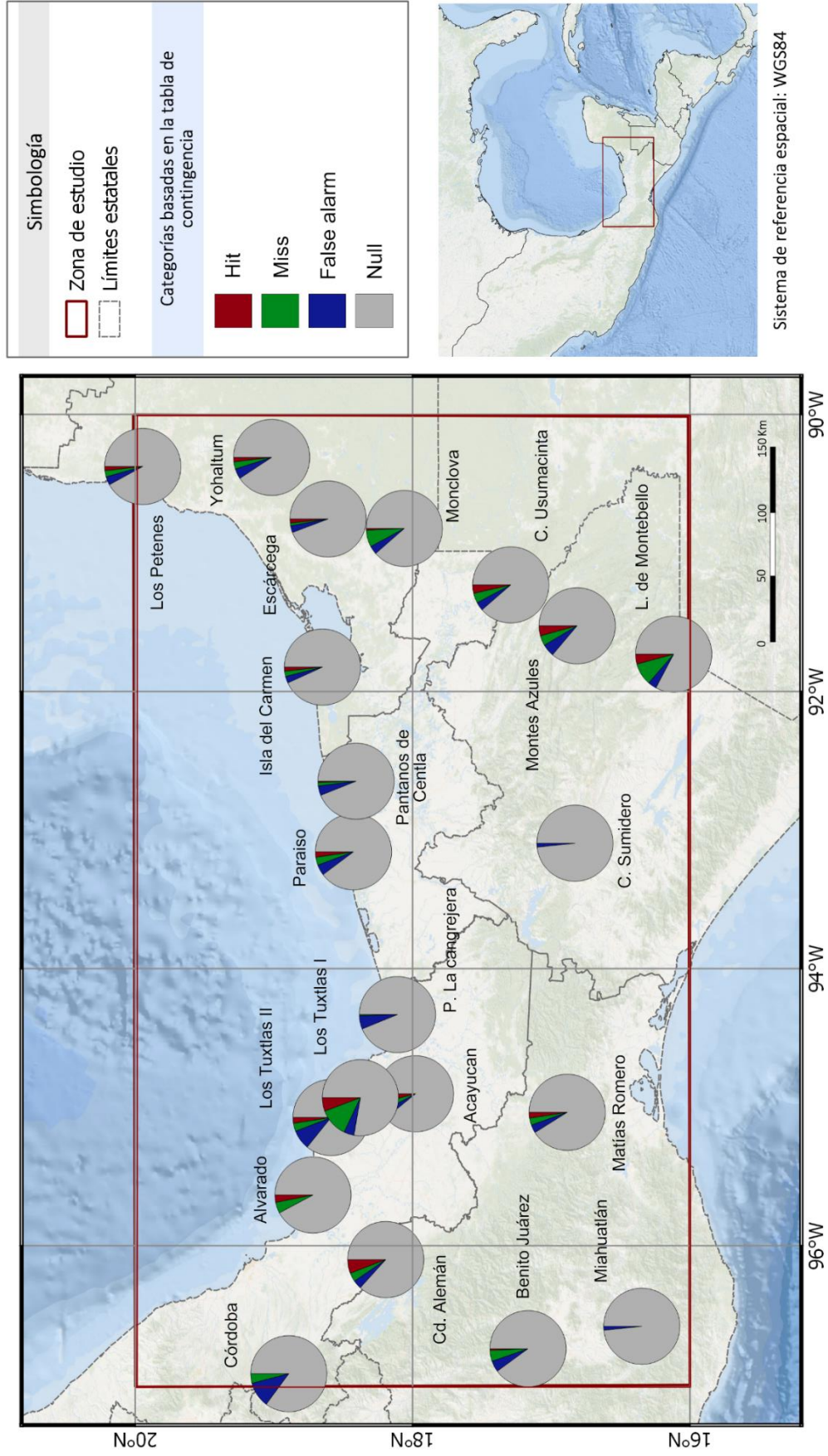


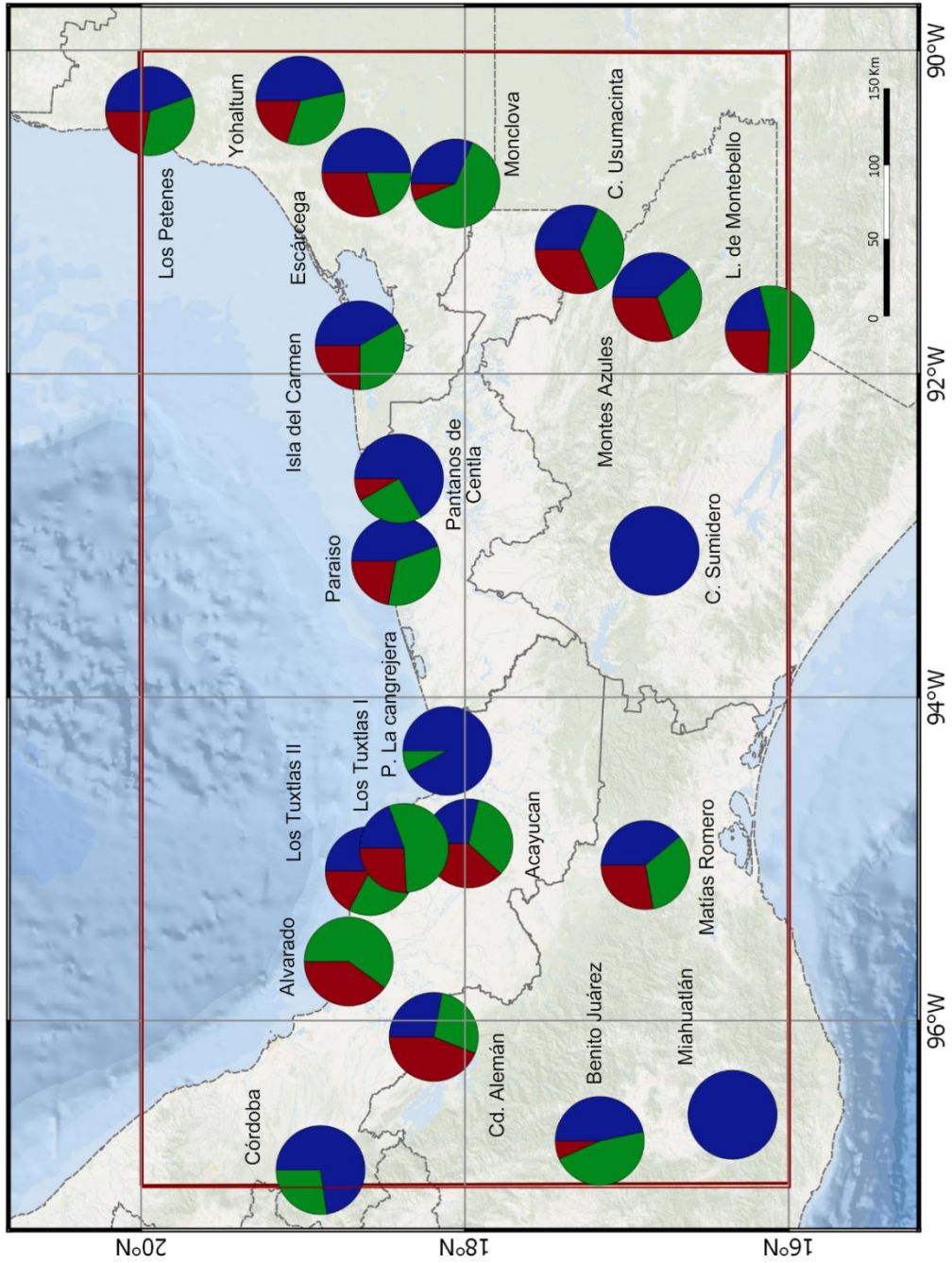
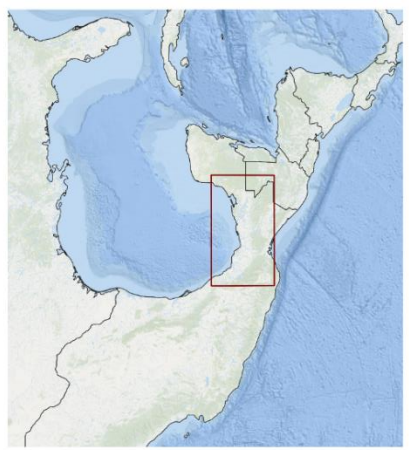
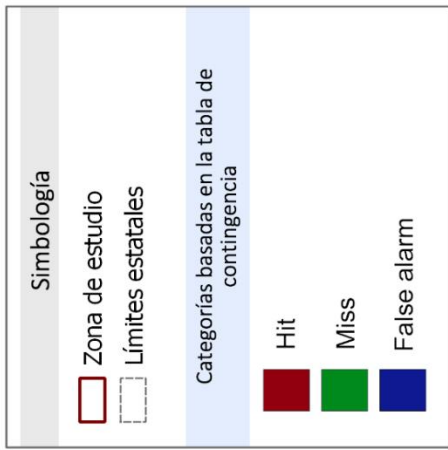
Figura 15 | Distribución de los resultados del proceso de categorización basado en la tabla de contingencia.

Se elaboró un mapa con los resultados obtenidos de la clasificación basada en la tabla de contingencia con el objetivo de determinar si había alguna tendencia en las mediciones asociada a la distribución geográfica de las estaciones. En el Mapa 3 se observa que los *null* se distribuyen en proporciones parecidas en las 21 estaciones, de manera que para esta categoría no es posible hacer alguna inferencia sobre la influencia de la topografía en las estimaciones de precipitación. En el Mapa 4 no se incluyeron en la representación los *null*. Se observa que en las estaciones Cañón del Sumidero y Miahuatlán, localizadas en la porción sur que corresponde a la zona montañosa, únicamente se registraron *false alarm*; esto puede ser explicado por la falta de registros de los pluviómetros y, por lo tanto, la cantidad de información con la que se realiza la validación es menor. Las estaciones Córdoba y Presa La

Cangrejera no presentaron ningún *hit*, y en el caso de la estación Alvarado no se registraron *false alarm*; sin embargo, es necesario señalar que, aunque gráficamente podría parecer una de las estaciones en las que hay mayor congruencia entre los instrumentos, los resultados para la estación se derivan solamente de cinco registros.



Mapa 3 | Distribución espacial de los resultados del proceso de categorización basado en la tabla de contingencia.



Mapa 4 | Distribución espacial de los resultados del proceso de categorización basado en la tabla de contingencia en el que no se encuentran incluidos los null

A continuación, se muestran los resultados del cálculo de los índices para el análisis dicotómico:

Accuracy (AC)

Ecuación: $H+N/T$

Puntaje mínimo-máximo: 0 — 1

El índice *Accuracy* permite conocer la exactitud con la que el satélite detecta precipitación. En el cálculo, los *null* ejercen una fuerte influencia positiva, es decir, mientras mayor sea el número de *null*, el cociente es cada vez más cercano a uno. En la Figura 16a se observa una frecuencia por encima de 500 con puntajes superiores a 0.8, lo que indica una alta correspondencia entre las mediciones del satélite y del pluviómetro al considerar tanto los casos en los que se detecta precipitación, como aquéllos en donde ambos instrumentos miden cero. Por otra parte, hay aproximadamente 100 registros en los que la precisión va de 0.5 a 0.8, esta disminución puede asociarse al incremento de los *miss* y *false alarm* en cada uno de los pasos del GPM. Los únicos dos casos en los que se obtuvo un valor de cero en el índice son los que no presentaron *hit* ni *null* en ninguna de las estaciones cubiertas por el satélite (Figura 16b).

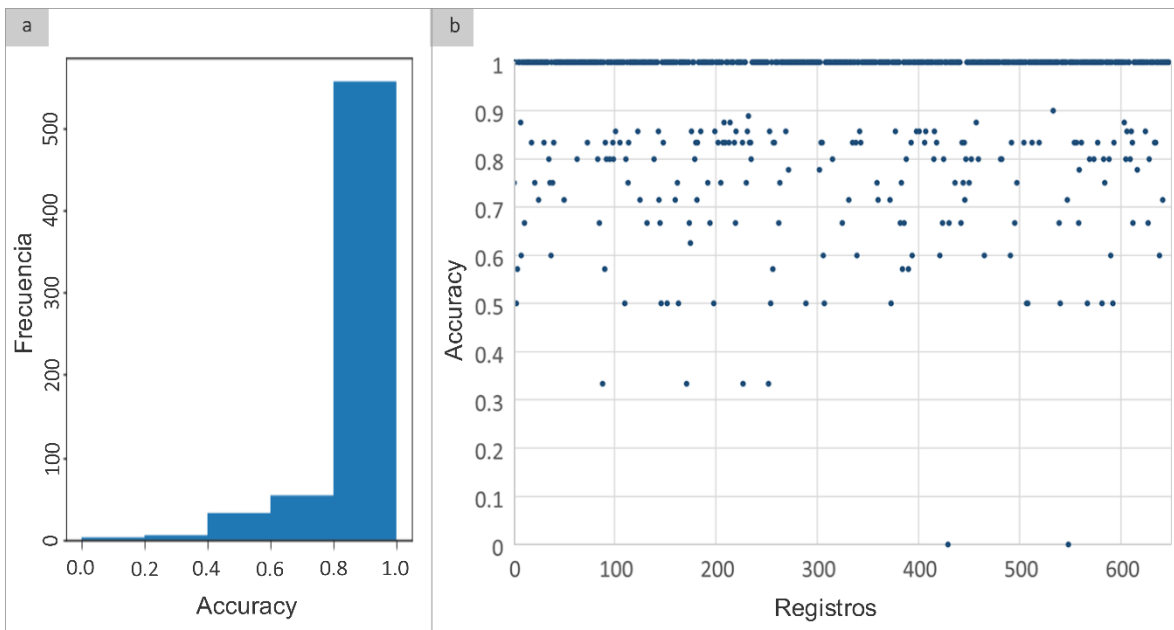


Figura 16 | a) Histograma del índice AC; b) Dispersión de los resultados del índice AC.

BIAS score (BIAS)

Ecuación: $H+F/H+M$

Puntaje mínimo-máximo: $0 - \infty$

El índice BIAS mide el sesgo de frecuencia de los eventos en los que el satélite detectó precipitación con respecto a los del pluviómetro que tuvieron una observación positiva. Los *null* no están incluidos y, por ello, cuando los valores calculados tienden a incrementar significa que el satélite está sobreestimando. Se observa una frecuencia más alta en los valores cercanos a cero (Figura 17a) lo que indica que hay una proporción menor de *false alarm* con respecto a los *miss* en la mayoría de los casos. Los que obtuvieron un puntaje de uno tienen el mismo número de *miss* y de *false alarm*; por ello, no es posible hacer suposiciones respecto a las mediciones de ambos instrumentos. Los pasos del satélite que registran los valores de BIAS mayores a uno (Figura 17b) representan menos de 20 casos y son aquéllos en los que el número de *false alarm* es mayor que el de *miss*.

c

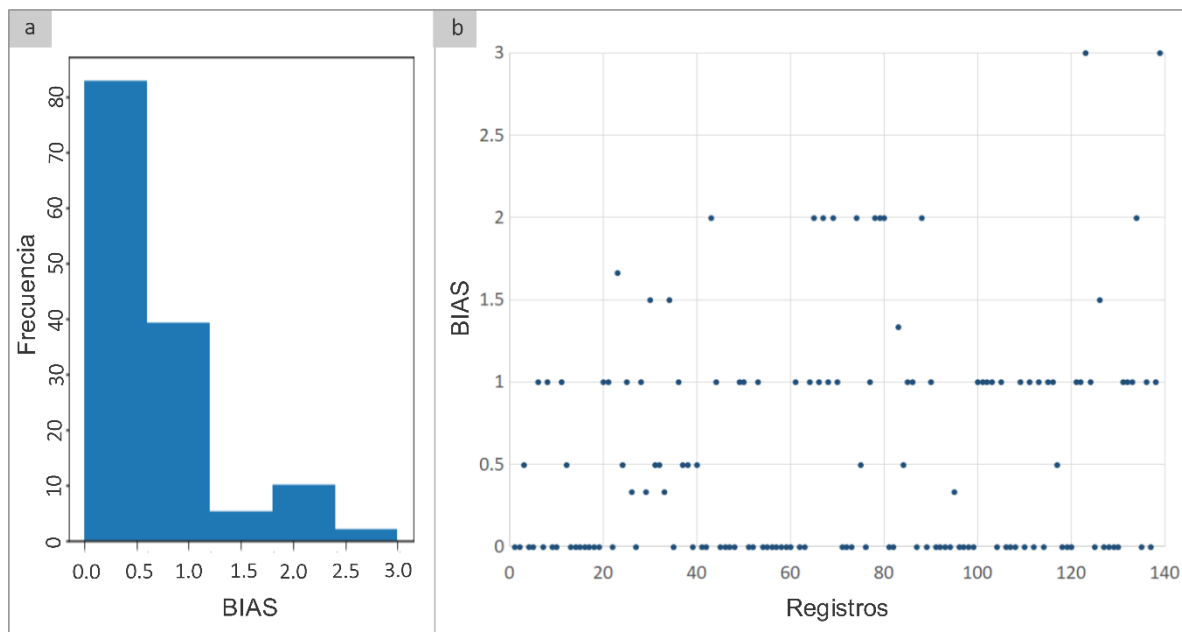


Figura 17 | a) Histograma del índice BIAS; b) Dispersión de los resultados del índice BIAS.

False alarm ratio (FAR)

Ecuación: $F/H+F$

Puntaje mínimo-máximo: 0 — 1

False alarm ratio sirve para evaluar la fracción de los eventos en los que el satélite detectó precipitación, pero en superficie la estimación fue cero. Este índice es sensible a los *false alarm*, pero no toma en cuenta los *miss*. En las Figuras 18a y 18b se observa que la mayor parte de pasos del satélite tienen puntajes de uno, lo que indica que la proporción de *false alarm* con respecto a la de *hit* es mayor. Si el puntaje es cero, significa que en ese paso del satélite no se presentaron *false alarm*. La proporción de los eventos en donde el satélite detecta precipitación y el pluviómetro no, es 2:1. Los puntos que se observan en la parte central con valores entre 0.2 y 0.7 están asociados a los casos en donde hay un incremento de *hit* con respecto a los *false alarm*.

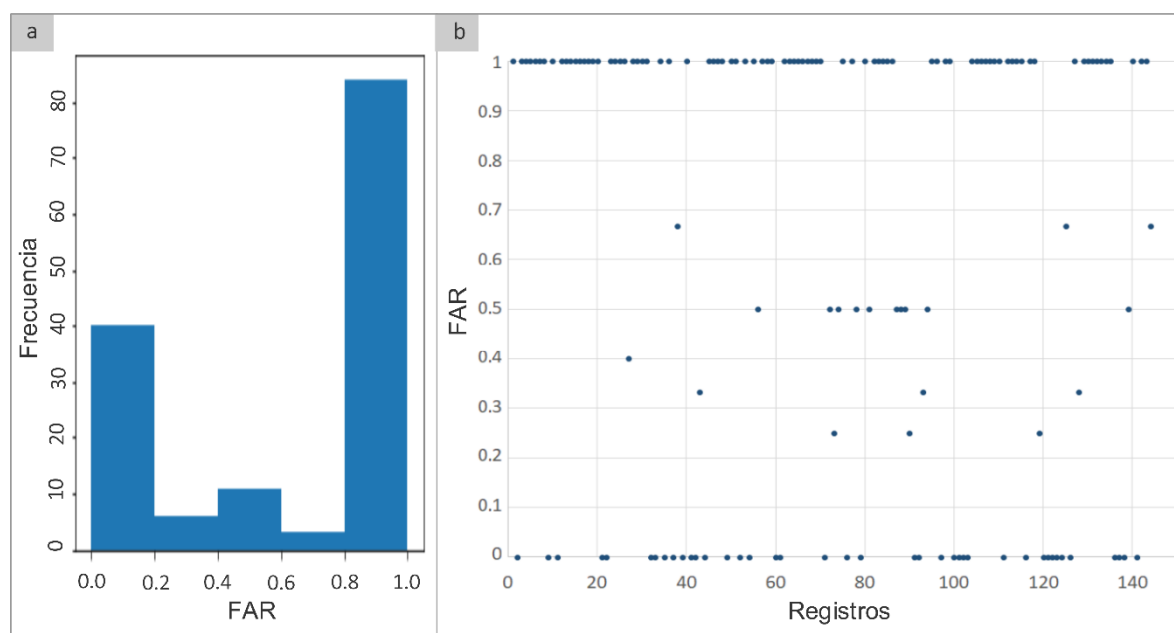


Figura 18 | a) Histograma del índice FAR; b) Dispersión de los resultados del índice FAR.

Success ratio (SR)

Ecuación: $H/H+F$

Puntaje mínimo-máximo: 0 — 1

Este índice permite conocer la fracción de los eventos de precipitación que fueron detectados por el satélite y también se registraron en superficie. Mediante el histograma (Figura 19a) puede observarse que el número de eventos en los que fracasa la detección de precipitación mediante el satélite es el doble de los eventos en donde se tiene éxito. Los pasos del GPM con puntajes de uno (Figura 19b) representan aquéllos en los que no hubo *false alarm* y el satélite y el pluviómetro al menos detectaron precipitación en una estación. Los que tienen valor cero son aquéllos en donde no se registraron *hit* y corresponden a poco más de 80 casos. En los que se obtuvo puntajes superiores a 0.3 e inferiores a 0.8 hay un número mayor de *false alarm*.

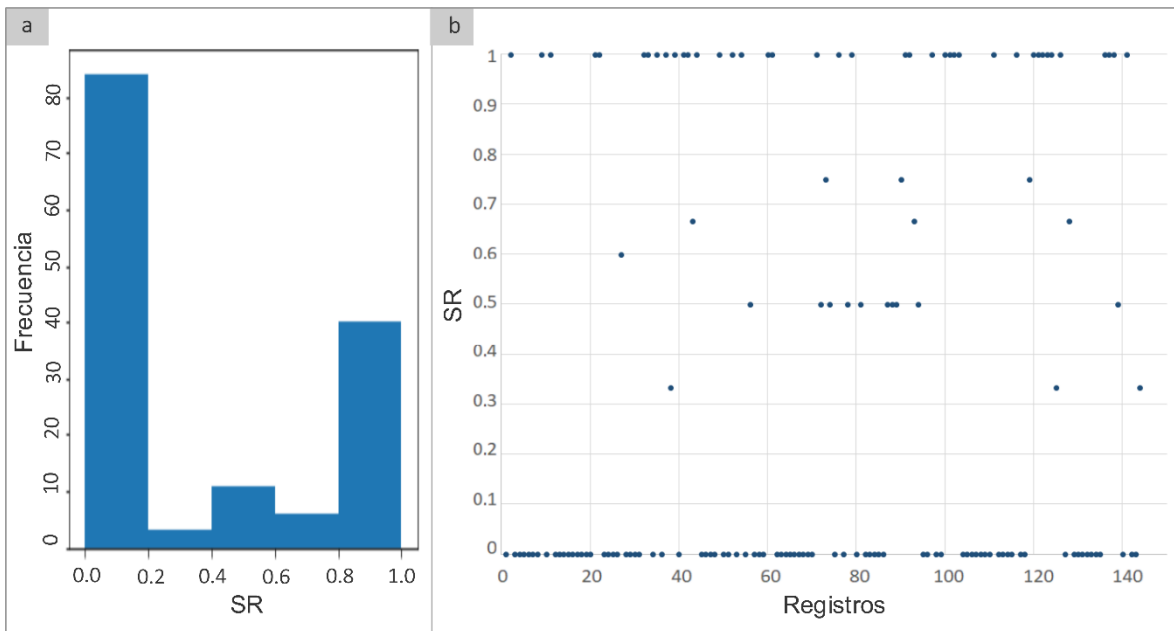


Figura 19 | a) Histograma del índice SR; b) Dispersión de los resultados del índice SR.

Probability of detection (POD)

Ecuación: $H/H+M$

Puntaje mínimo-máximo: 0 — 1

Este índice es útil para conocer qué fracción de los registros en los que se observó precipitación fue correctamente detectada por el satélite. Es sensible a los *hit* pero ignora los *false alarm*. Se observa un comportamiento similar al de *success ratio* debido a que el número de *false alarm* y *miss* únicamente difiere en 18. La mayor frecuencia se encuentra en los pasos de satélite con puntaje cero lo que evidencia un número mayor de *miss* con respecto a los *hit* (Figura 20a). Los que obtuvieron puntaje perfecto son aquellos en donde no se presentaron *miss*, es decir, en ningún caso se detectó precipitación en superficie y el satélite no la registró (Figura 20b). El número de pasos del satélite en donde la probabilidad de detección es baja son cercanos al doble de los que fueron correctamente detectados.

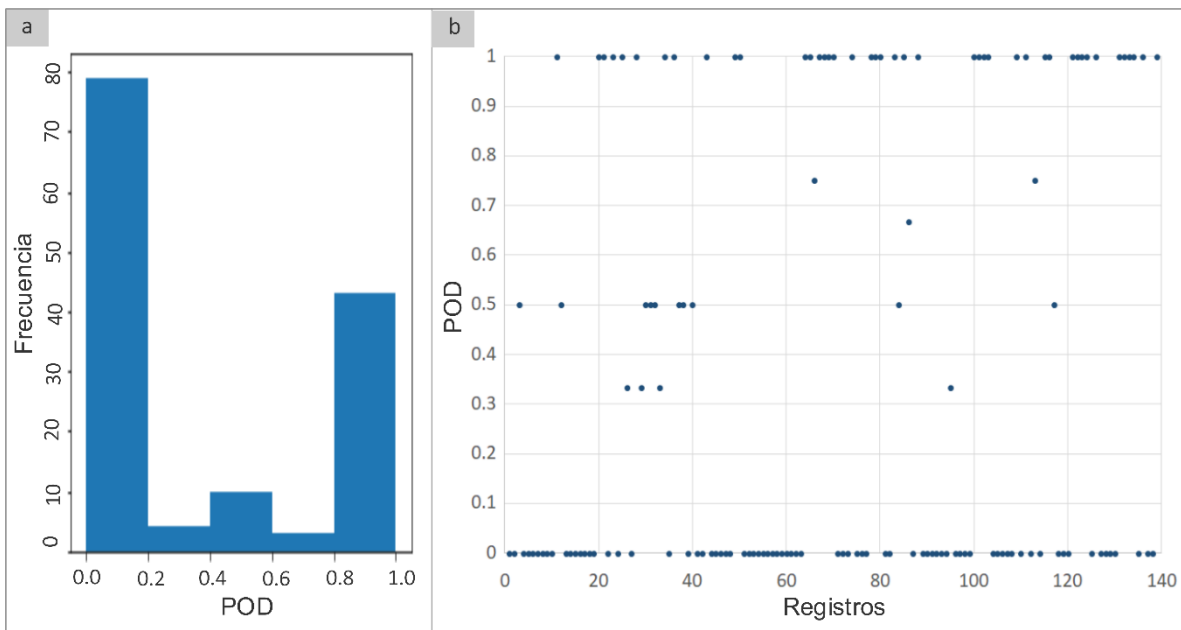


Figura 20| a) Histograma del índice POD; b) Dispersión de los resultados del índice POD.

Probability of false detection (POFD)

Ecuación: $F/N+F$

Puntaje mínimo-máximo: 0 — 1

Este índice sirve para conocer la fracción de los eventos en los que no se registró lluvia en superficie pero que fueron incorrectamente detectados por el satélite. Se observa una alta frecuencia de los pasos del GPM con puntajes perfectos, es decir, iguales a cero; esto se debe a que la proporción de los *false alarm* con respecto a los *null* es menor que 5%, lo que ejerce una fuerte influencia positiva (Figura 21a). Se tiene una frecuencia mucho menor de los casos en donde el satélite registra precipitación y el pluviómetro no. En el gráfico se muestran únicamente dos pasos del satélite con puntajes de uno, lo que significa que sólo registraron falsas alarmas (Figura 21b).

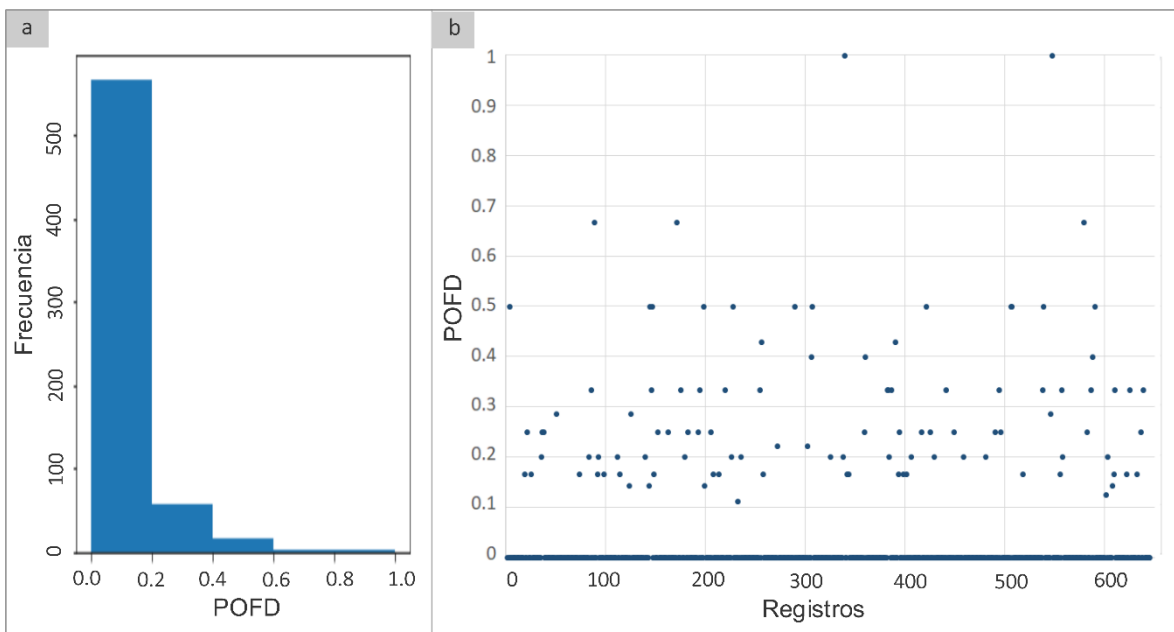


Figura 21 | a) Histograma del índice POFD; b) Dispersión de los resultados del índice POFD.

Critical Success Index (CSI)

Ecuación: $H/H+M+F$

Puntaje mínimo-máximo: 0 — 1

Este índice mide los eventos en los que el pluviómetro registró precipitación y que fueron correctamente detectados por el satélite. Es considerado un índice de precisión cuando se han eliminado los *null*. En las Figuras 22a y 22b se observa que la mayor frecuencia corresponde a los pasos del satélite que obtuvieron un puntaje de cero, lo que indica que para más de la mitad de los casos que pudieron ser calculados no hay ningún *hit* y únicamente en poco más de 20 casos las estimaciones del satélite coincidieron con las de los pluviómetros. Los pasos del GPM que tienen las puntuaciones más bajas se asocian con aquellos casos en los que hay un número menor de *hit* en comparación con los *miss* y *false alarm*. Los que se concentran en el valor medio son aquéllos en los que la suma de los *miss* y *false alarm* son numéricamente iguales a los *hit*, y los que están por encima de 0.5 corresponden a los que presentan un número mayor de *hit*.

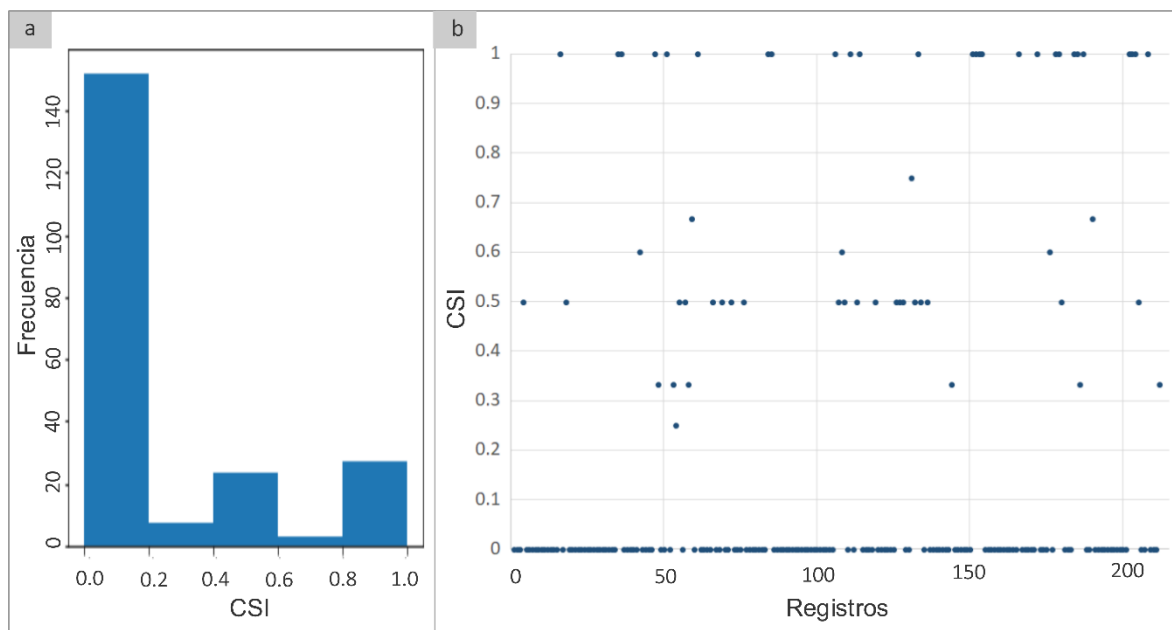


Figura 22 | a) Histograma del índice CSI; b) Dispersión de los resultados del índice CSI.

Gilbert skill score (GSS)

Ecuación: $H-R/H+M+F-R$, donde $R=(H+M) (H+F) /T$

Puntaje mínimo-máximo: $-1/3 - 1$

Mide la fracción de los eventos observados que fueron detectados por el satélite, ajustados por los *hit* y asociados con una posibilidad aleatoria. Este índice es sensible a los *hit*. En las Figuras 23a y 23b se observa que en ningún paso del satélite se alcanza el puntaje perfecto y que la mayor frecuencia corresponde a los que obtuvieron cero, lo que indica que no hay habilidad en la detección del satélite.

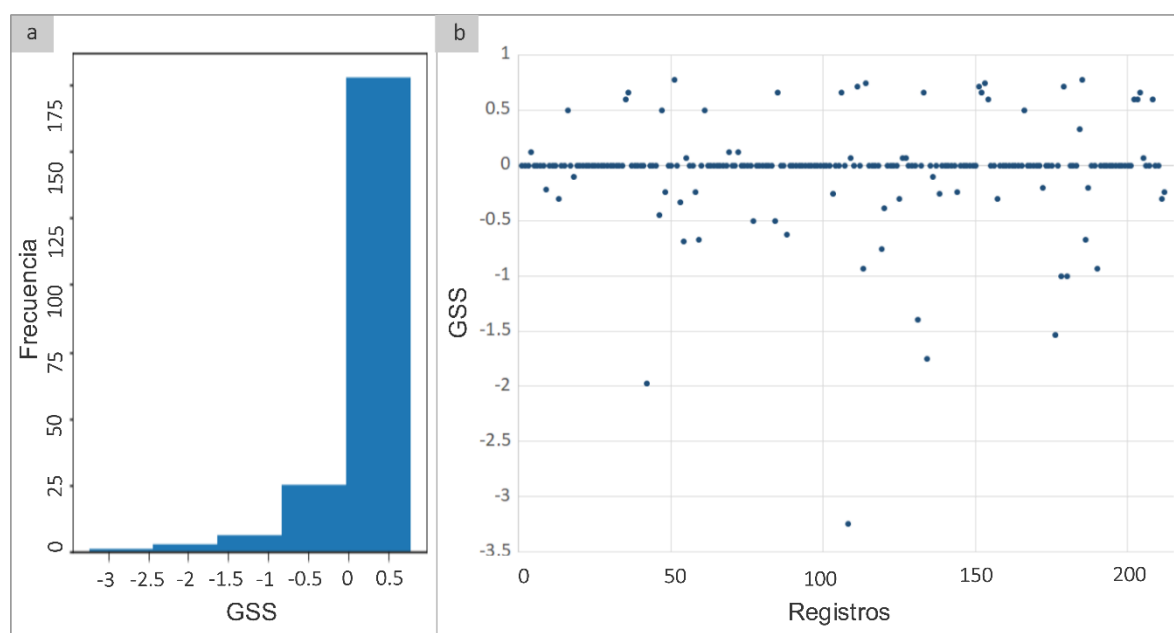


Figura 23| a) Histograma del índice GSS; b) Dispersión de los resultados del índice GSS.

Odds ratio (OR)

Ecuación: $H*N/M*F$

Puntaje mínimo-máximo: $0 - \infty$

Odds Ratio es útil para medir la proporción de probabilidades de que una detección de precipitación por el satélite sea correcta o no. Toma en cuenta las probabilidades previas y no puede ser calculado para los casos en donde alguna de las celdas de la tabla de contingencia sea cero. La mayor frecuencia se encuentra en los valores con cero, que representan los casos en que al menos una celda en la tabla de contingencia no registró precipitación (Figura 24a). En la Figura 24b se observa que únicamente tres de los pasos del satélite tuvieron resultados de 2, 8 y 12; el valor indica el número de veces que es más probable que pueda realizarse una detección correcta a una incorrecta.

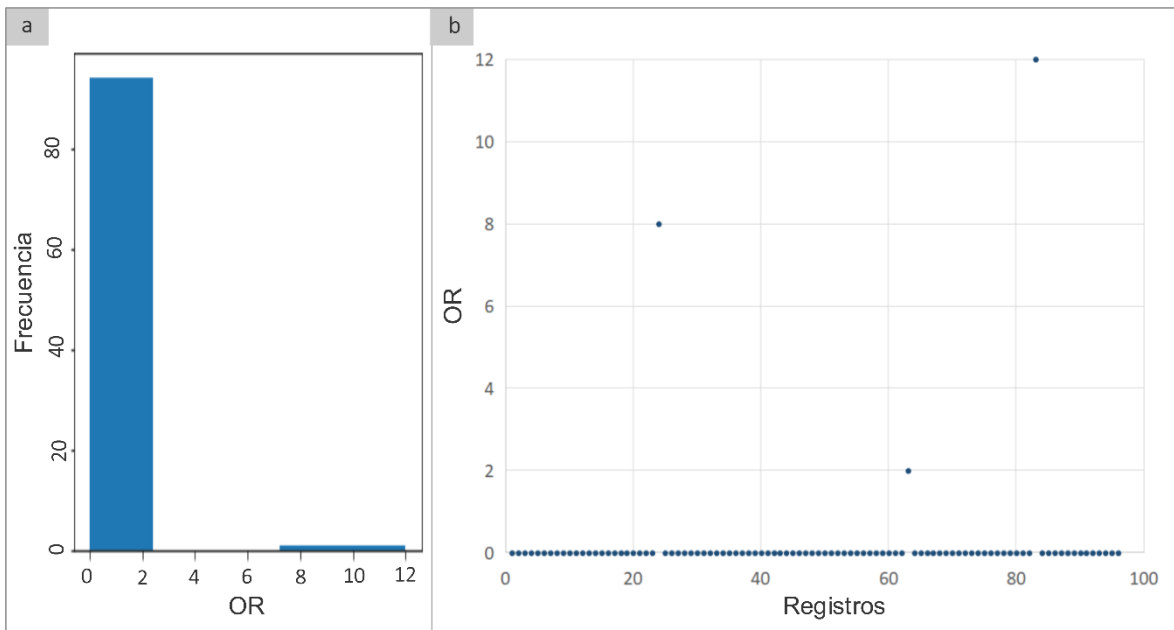


Figura 24 | a) Histograma del índice OR; b) Dispersión de los resultados del índice OR.

Odds ratio skill score (ORSS)

$$\text{Ecuación: } (H*N)-(M*F)/(H*N)+(M*F)$$

Puntaje mínimo-máximo: -1 — 1

Este índice es útil para conocer cuál es la mejora de la detección frente al azar. Una restricción en el cálculo debida a la ecuación es que no puede haber dos celdas de la tabla de contingencia que tengan valores de cero en las siguientes combinaciones: *hit* y *miss*, *hit* y *false alarm*, *null* y *miss* y *null* y *false alarm*. Es por ello que el cálculo sólo pudo realizarse para 70 de los 705 pasos del satélite. Los resultados muestran que la mayor frecuencia se concentra en los puntajes con uno (Figuras 25a y 25b), que representa que la detección del satélite mejora cuando se involucra el azar, mientras que para 12 pasos del GPM ocurre lo contrario.

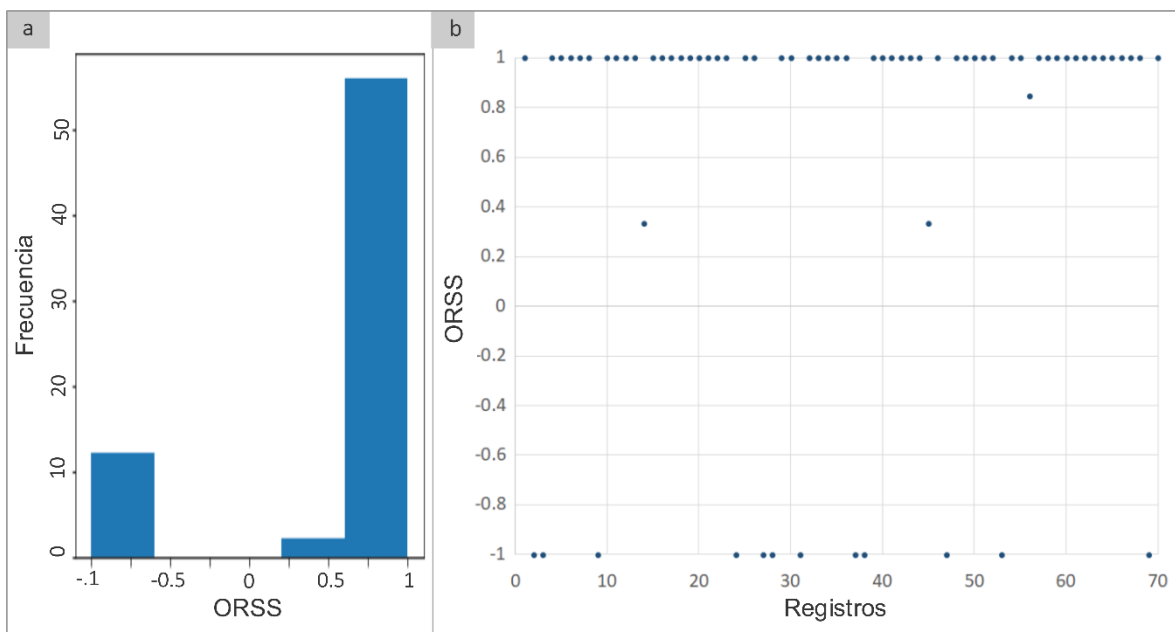


Figura 25| a) Histograma del índice ORSS; b) Dispersión de los resultados del índice ORSS.

Los resultados de la segunda etapa de validación se basan en los casos en donde el satélite y el pluviómetro registraron valores diferentes de cero (Ver Anexo 1). Es importante señalar que los *hit* no corresponden en todos los casos a pasos del satélite independientes, es decir, pueden corresponder a la misma trayectoria del GPM pero a diferentes estaciones.

El número de *hit* es muy bajo con respecto al total de pares de datos comparados; esto se debe en gran medida a que los registros de las EMAs no se encontraban completos, como se puede observar en la Figura 26, en donde es evidente la correspondencia entre las estaciones que registraron el mayor número de *hit* con las que tienen el menor porcentaje de datos faltantes. La estación Ciudad Alemán tuvo 11 *hit* y más del 95% de los datos; situaciones similares son Montes Azules, Lagos de Montebello y Los Tuxtlas II. El caso contrario está representado por las estaciones Alvarado, Córdoba, Miahuatlán y Paraíso, en donde no se tiene más del 50% de los registros de precipitación. A pesar de que la estación Presa La cangrejera tiene los datos completos, no se registró ningún *hit*.

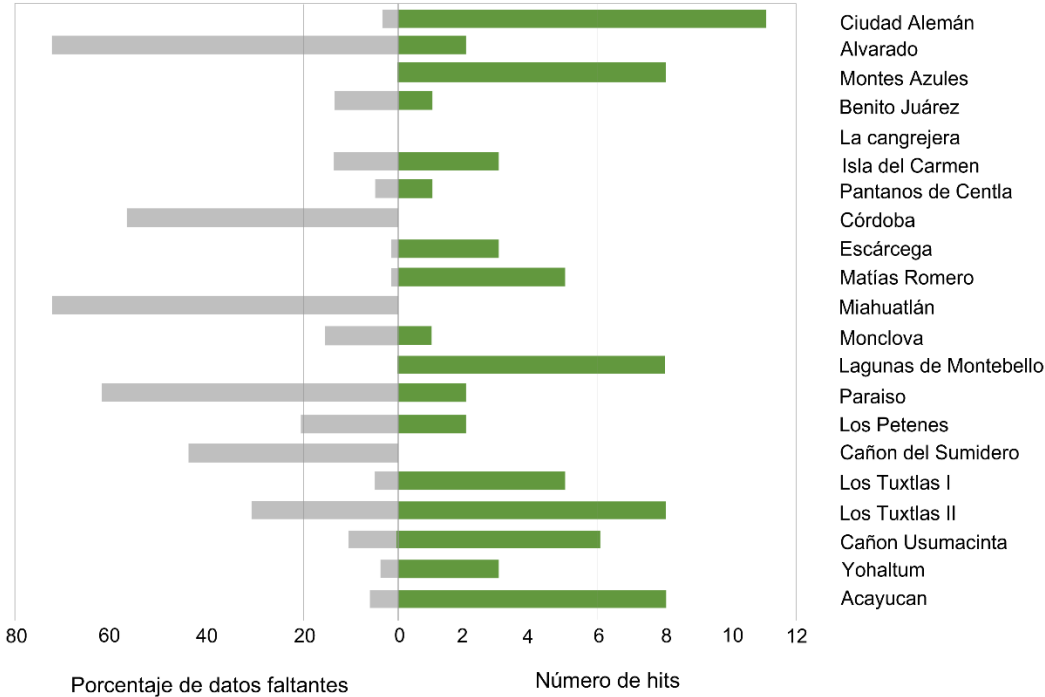


Figura 26 | Porcentaje de datos faltantes y numero de *hit* por EMA.

El análisis de los valores de los 77 *hit* muestra intervalos variables de precipitación, por cada evento de 30 minutos que pueden ir de 0 hasta 50 mm h⁻¹. En la Figura 27 están representados 75 de los 77 eventos debido a que los dos faltantes presentaban estimaciones de tres desviaciones estándar por encima de la media. Se puede observar que en el 26% de los eventos la precipitación detectada por el satélite es más alta que el valor máximo registrado por los pluviómetros; en el 36% tiene un valor mayor que el promedio (lo que en este trabajo se denomina como promedio es la intensidad de precipitación en el periodo muestreado); y en el 77% es mayor que la estimación mínima en superficie. Por otra parte, la mayoría de los valores se concentran por debajo de los 20 mm h⁻¹ y es posible observar que, en los intervalos de precipitación inferiores a 10 mm h⁻¹ medidos por los pluviómetros, el satélite detecta valores muy parecidos; y en los casos en los que el intervalo de precipitación registrado en superficie es mayor que 10 mm h⁻¹ las mediciones del GPM tienden a encontrarse cerca del límite inferior.

En la Figura 28 se observa la distribución de las mediciones de precipitación cuyos valores mínimos son diferentes de cero. Es posible corroborar que las estimaciones de superficie son superiores a las de satélite y que hay un mejor ajuste a la pendiente cuando los intervalos de precipitación medidos en superficie son pequeños. Es necesario señalar que el comportamiento lineal de los valores del satélite por encima de uno se debe al ajuste de la escala Log del gráfico cuando los valores son muy cercanos.

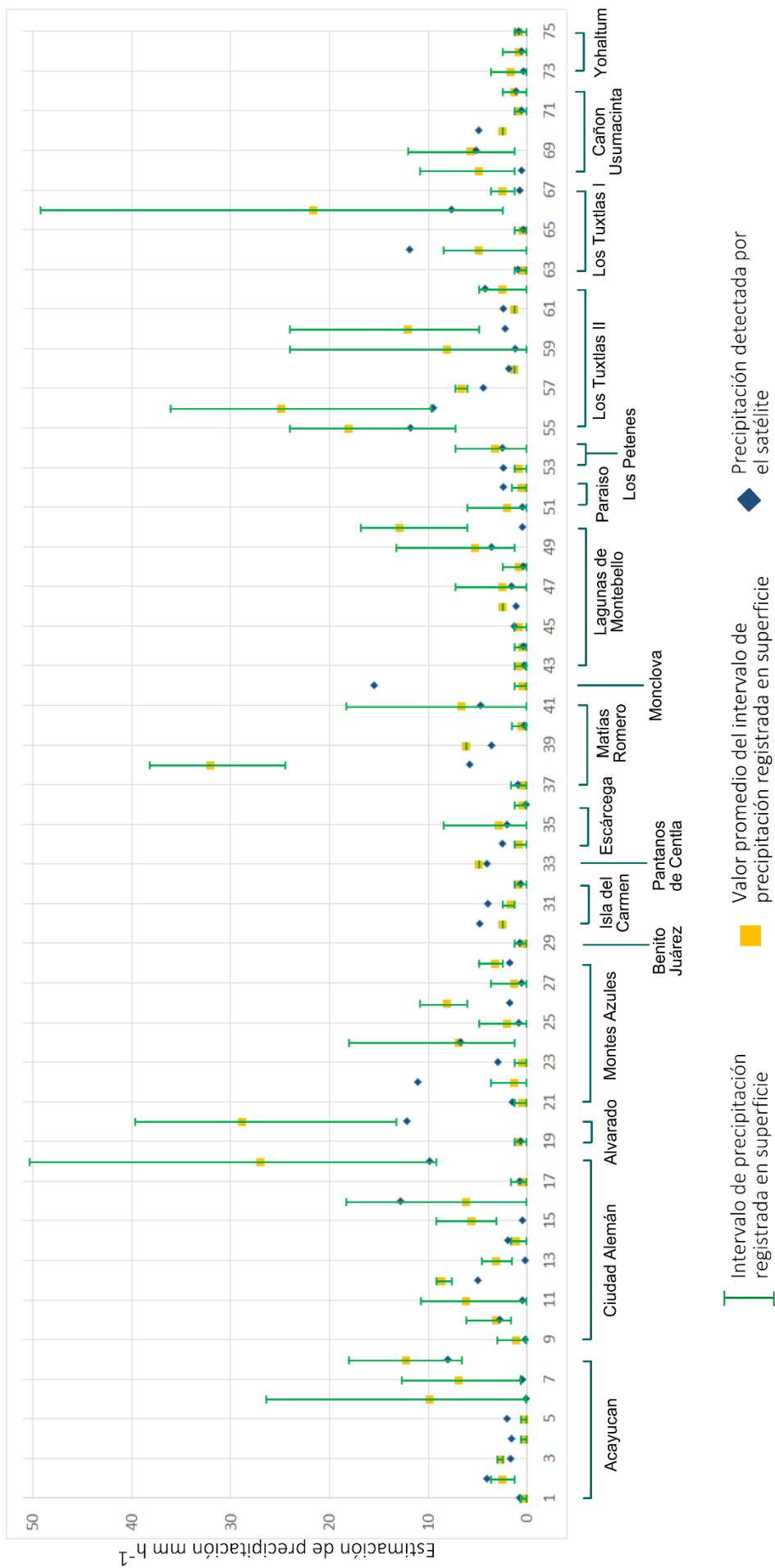


Figura 27 | Distribución por EMA de los valores de precipitación asociados a los hit.

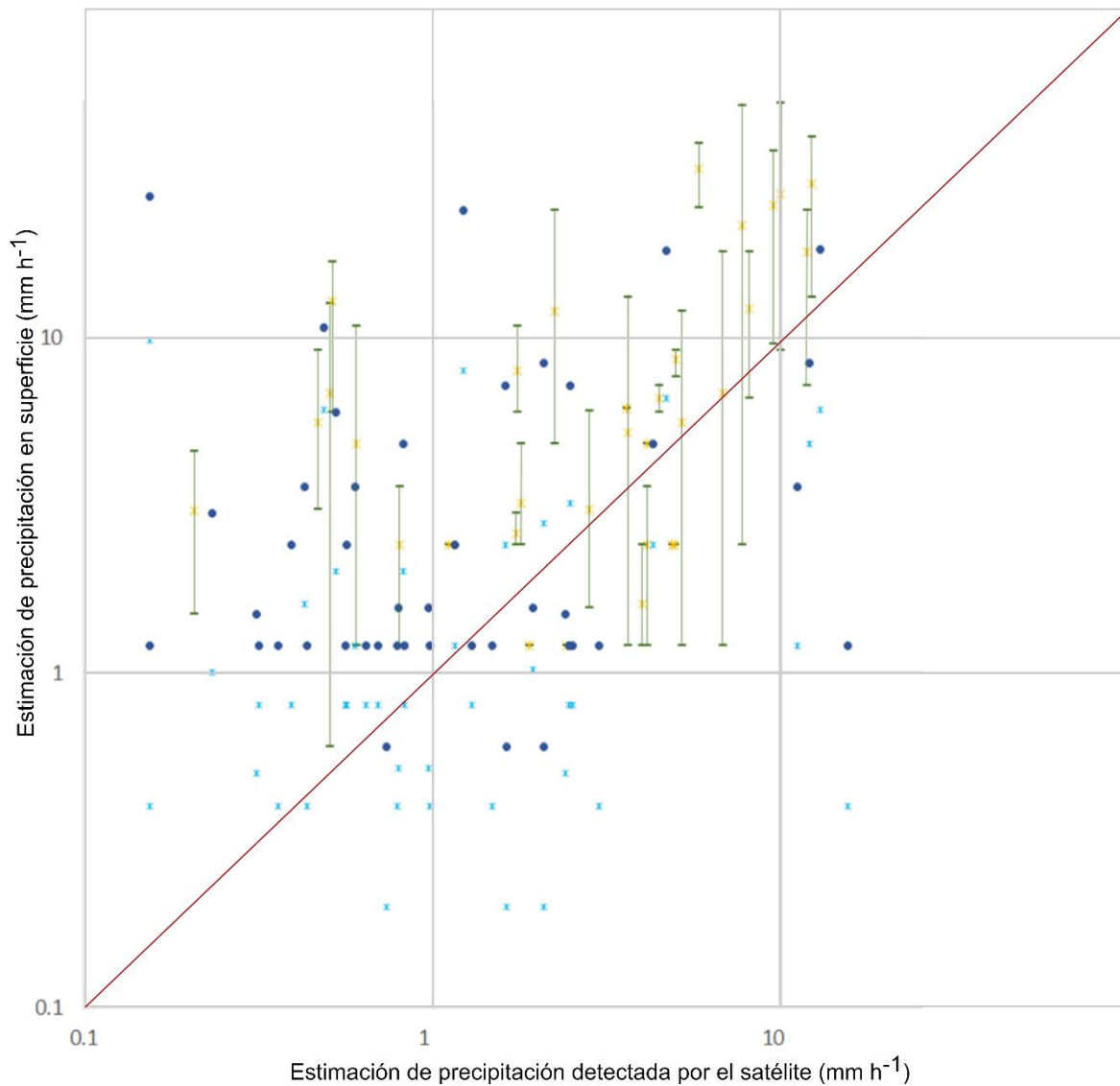


Figura 28 | Distribución de los *hit*. Para su representación, los *hit* se clasificaron en dos grupos: GRUPO 1) aquéllos cuyo valor mínimo de precipitación en los tres registros del pluviómetro es cero, y GRUPO 2) aquéllos cuyo valor mínimo de precipitación en los tres registros del pluviómetro es diferente de cero. Todos los símbolos representados en el gráfico utilizan como valor en el eje x las estimaciones de precipitación del satélite. Para el GRUPO 1, los valores tomados en el eje y son: el valor máximo de precipitación medido en superficie (puntos azules) y el promedio de los valores de precipitación medidos en superficie (asteriscos azul claro). Para el GRUPO 2, los valores tomados en el eje y son: los valores mínimos y máximos registrados en superficie (intervalo verde) y los promedios de las estimaciones de los pluviómetros (asteriscos amarillos). La línea continua representa la relación 1:1 entre las estimaciones de precipitación en superficie y las detectadas por el satélite.

Se realizó un análisis de las estaciones en función de su localización dentro de las provincias fisiográficas para saber si la altitud influía de forma significativa en las estimaciones de precipitación. Para ello, se elaboró un perfil altitudinal de las estaciones (Figura 29) y se observó que las elevaciones de las EMAs localizadas en las provincias Península de Yucatán y Llanura Costera del Golfo Sur son menores a 200 m s. n. m. a excepción de los Tuxtlas II y Córdoba, de modo que deben ser analizadas de forma particular. Para el caso de las que se ubican en la zona montañosa, la estación Montes Azules es la que se encuentra a menor altitud con poco más de 600 m s. n. m.

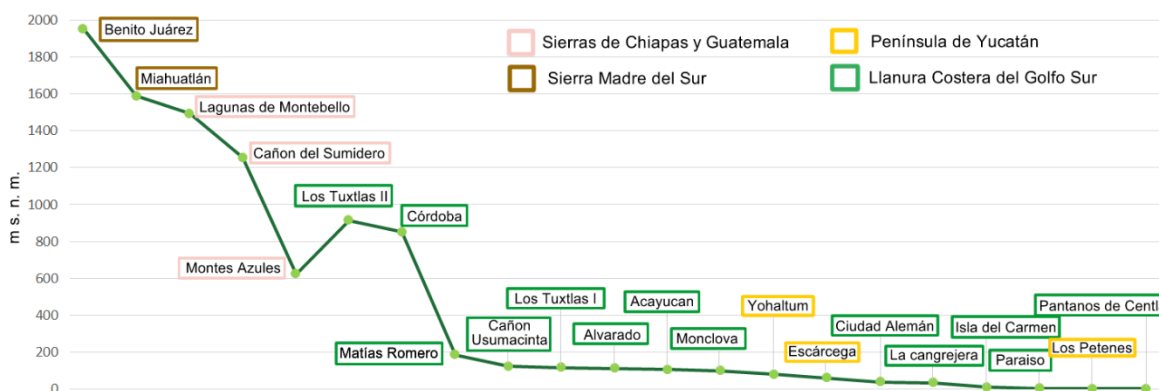


Figura 29 | Esquema altitudinal de las EMAs con base en la clasificación por provincias fisiográficas.

El análisis de los *hit* registrados en las EMAs que se localizan en provincias fisiográficas montañosas muestra que las comparaciones numéricas solo pueden realizarse en tres de las cinco estaciones disponibles, debido a que en las estaciones Sumidero y Miahuatlán no se registraron *hit*.

Montaña

Después de comparar las mediciones del satélite con los máximos, mínimos y promedios de los pluviómetros, se encontró que las mediciones del satélite en la estación Montes Azules registran 10 mm h^{-1} por encima de las estimaciones mínimas de superficie (Figura 30). Esta diferencia se invierte al comparar con los valores máximos (Figura 31), y muestra una mayor concordancia con los valores promedio (Figura 32). En la estación Lagunas de Montebello se observa que, en la mayoría de los casos, el satélite da estimaciones mayores cuando se

compara con los valores mínimos en superficie, y que en cinco de los siete casos hay diferencias pequeñas en las mediciones de los dos instrumentos; sin embargo, para dos de los casos los pluviómetros registraron valores por más del doble de las estimaciones del GPM.

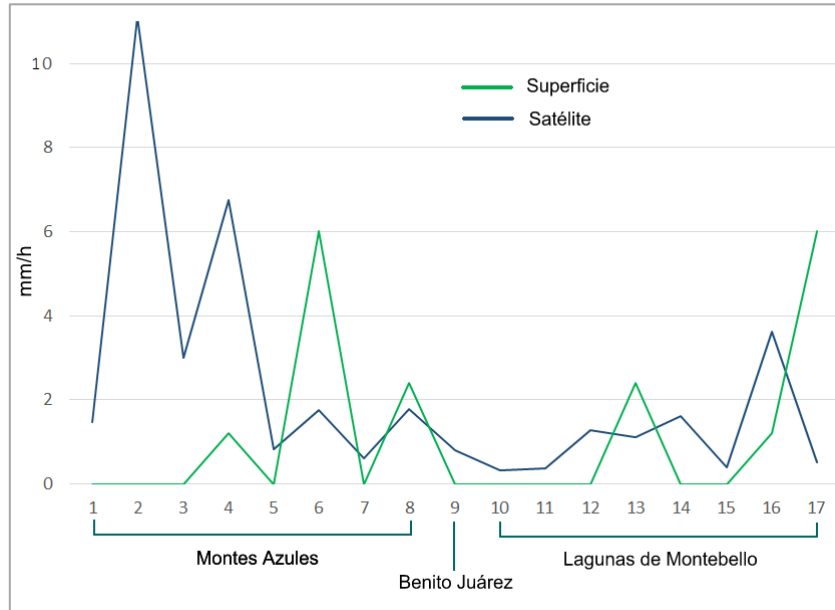


Figura 30 | Comparación de las estimaciones del GPM con los valores mínimos registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona montañosa.

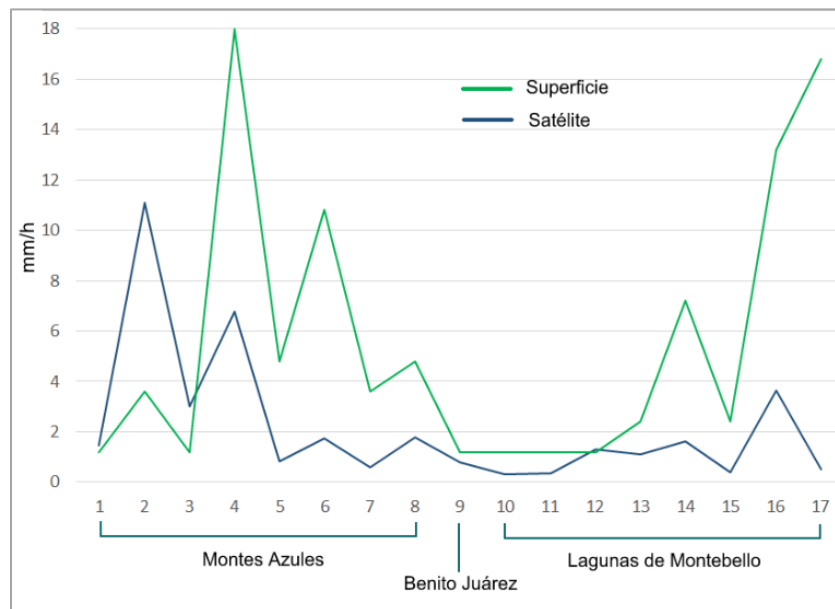


Figura 31 | Comparación de las estimaciones del GPM con los valores máximos registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona montañosa.

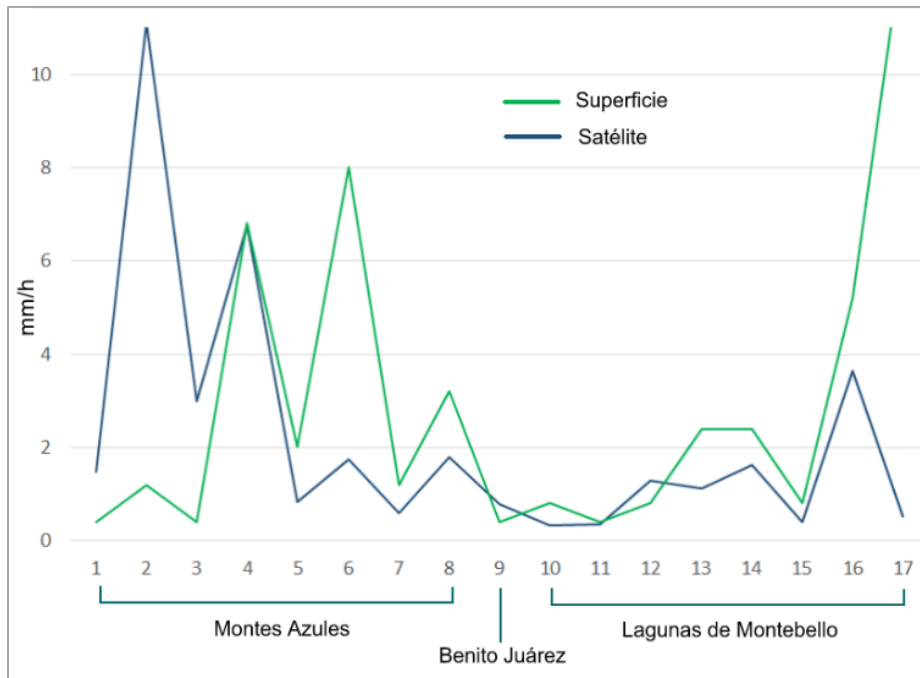


Figura 32 | Comparación de las estimaciones del GPM con los valores promedio registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona montañosa.

Zona plana

Las estaciones que se localizan en la zona plana representan el 76% del total y en ellas se registraron 60 de los 77 *hit*. Los resultados muestran que, al comparar los valores del GPM con los mínimos en las estaciones Acayucan, Matías Romero y los Petenes, se presenta una tendencia de los pluviómetros a subestimar (Figura 33). Las diferencias más grandes se encuentran entre los valores del satélite y las mediciones máximas del pluviómetro (Figura 34) con diferencias de 40 mm h⁻¹ en estaciones como Cd. Alemán, Alvarado y los Tuxtles I y II, y la tendencia es una sobreestimación del pluviómetro con respecto al satélite. Para el caso de la comparación con los promedios se observa un mejor ajuste entre las mediciones de los dos instrumentos (Figura 35) y el único evento en donde el satélite sobreestima por cerca de 80 mm h⁻¹ puede considerarse como atípico.

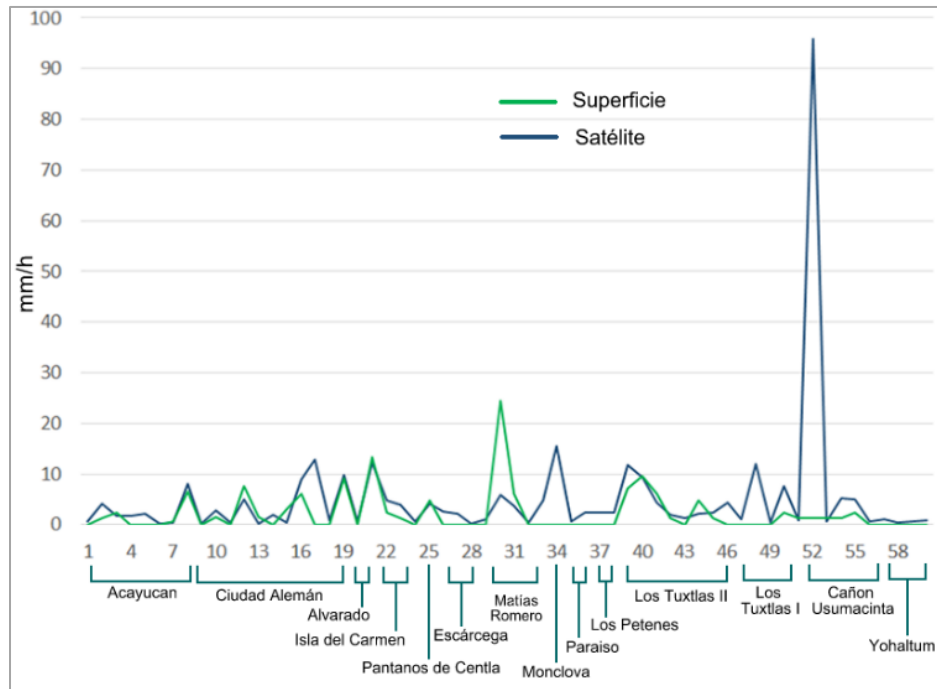


Figura 33 | Comparación de las estimaciones del GPM con los valores mínimos registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona plana.

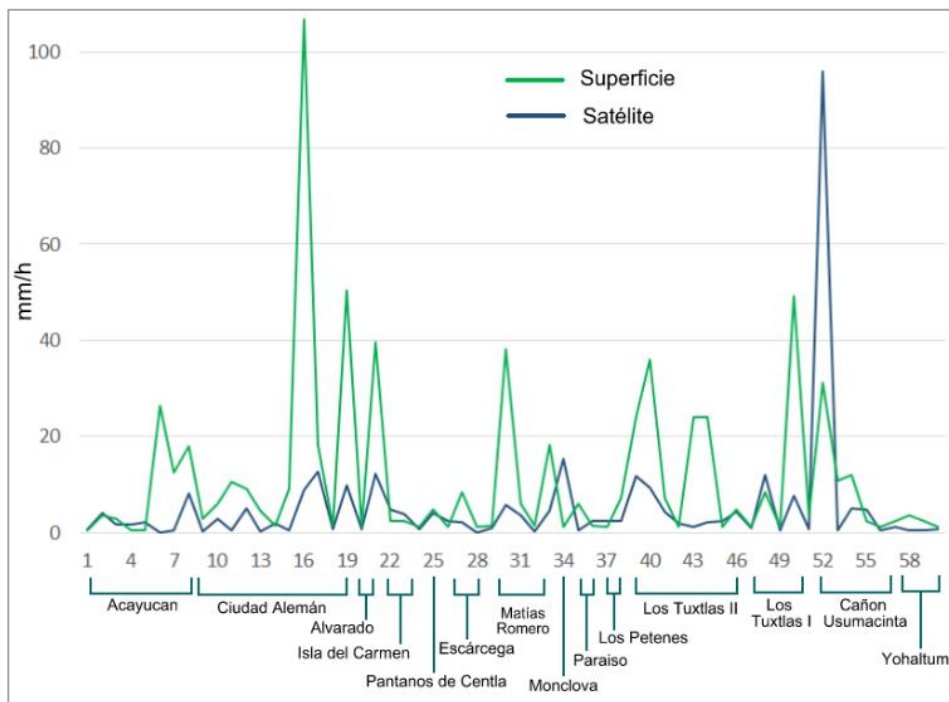


Figura 34 | Comparación de las estimaciones del GPM con los valores máximos registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona plana.

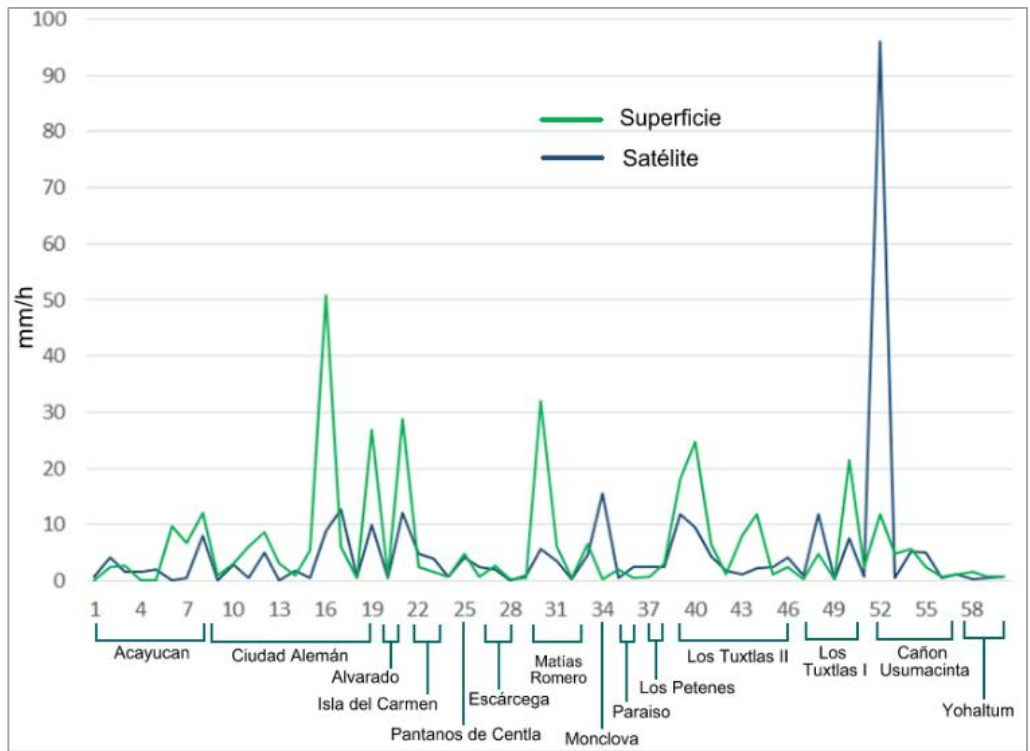


Figura 35 | Comparación de las estimaciones del GPM con los valores promedio registrados en superficie en las estaciones localizadas en la zona plana.

Finalmente, los resultados de las correlaciones calculadas a partir de los coeficientes de Spearman y Pearson (Tabla 8) presentan valores máximos de 0.5 y 0.6 en la comparación de los registros en las estaciones localizadas en la zona plana. En el caso de las mediciones de las estaciones en la región montañosa se encontró que la máxima correlación (0.4) corresponde con los valores máximos registrados por los pluviómetros. La comparación de los registros completos muestra las correlaciones más altas entre los registros del GPM y los valores mínimos en el caso de Spearman, y los promedio en el caso de Pearson.

Coefficiente de correlación	Estimación	Llanura	Montana	Registros completos
Spearman	Mínimo	0.50	0.26	0.44
	Maximo	0.39	0.40	0.37
	Promedio	0.46	0.32	0.42
Pearson	Mínimo	0.44	-0.11	0.39
	Maximo	0.52	0.26	0.51
	Promedio	0.56	0.06	0.52

Tabla 8 | Coeficientes de correlación calculados para las estaciones en la zona plana, montaña y para los registros completos.

6. Discusión

La densidad de las Estaciones Meteorológicas Automáticas en la zona de estudio es muy baja considerando que se tienen únicamente 23 en una superficie de aproximadamente 325,000 km², equivalentes a una densidad de una estación por cada $\approx 14,000$ km². A pesar de que su localización es heterogénea y responde a criterios estratégicos, resulta insuficiente para la caracterización de la precipitación e impide generar valores de lluvia en superficie a partir de métodos de interpolación, de manera que la información proporcionada por sensores remotos resulta de gran utilidad.

La elección de una metodología de comparación puntual permite realizar la validación de datos de precipitación de sensores remotos cuando no se tiene continuidad espacial en la información; sin embargo, requiere consideraciones respecto a los valores que deberían ser tomados en superficie debido a diferencias temporales en las estimaciones de ambos instrumentos. El paso del satélite por la zona de estudio tiene una duración de aproximadamente un minuto, de modo que la selección de un intervalo de 30 minutos basada en el análisis de eventos de precipitación ofrece un amplio rango de tolerancia que incrementa la certidumbre de que los valores tomados en superficie corresponden a los que detecta el satélite.

Un gran inconveniente en las validaciones se deriva del alto nivel de coincidencia que requieren, es decir, se necesita que el diseño de la órbita del GPM cubra la zona de estudio, que tenga los registros completos y que en el momento en el que pasa se registre un evento de precipitación. Esto debe coincidir con que la estación correspondiente en superficie haya estado en funcionamiento, tenga los registros completos y, preferentemente, haya medido lluvia. Por ello, aunque se contaba con 705 archivos de pasos del satélite y más de 2,000,000 de registros de superficie, la cifra de validaciones a partir de la tabla de contingencia fue de 3,209 y se realizaron únicamente 77 comparaciones numéricas.

El análisis dicotómico resulta de gran utilidad cuando se busca determinar si los instrumentos detectan o no un evento de precipitación, pero no permite la evaluación de la exactitud de las estimaciones. Los índices utilizados para este tipo de análisis tienen un mejor desempeño cuando las comparaciones se realizan en áreas con datos continuos que cuando se tiene únicamente información puntual. Realizar una categorización con base en los criterios de la tabla de contingencia por cada paso del satélite da la posibilidad de conocer su desempeño en todas las estaciones cubiertas en función de su resolución espacial y reduce el peso de la falta de datos en superficie.

En las mediciones a las que se les pudo asignar una categoría en la tabla de contingencia se encontró un alto porcentaje de *null* (89%) en comparación con los *miss* y *false alarm* y, aunque en estos casos no hay valores de precipitación que puedan compararse numéricamente, resulta un buen indicador de la congruencia entre las estimaciones de superficie y de satélite. Esto se encuentra representado a través de los índices AC y POFD, en los que el resultado muestra una alta correspondencia entre las mediciones de ambos instrumentos derivada de la influencia positiva del número de *null*.

En los índices FAR, POD, SR, CSI, GSS, OR y ORSS predominan los resultados negativos, es decir, hay un alto porcentaje de pasos del satélite que obtienen valores asociados al fracaso en la detección con respecto a los que tienen éxito; esto puede deberse, por una parte, al bajo número de *hit* y, por otra, a las restricciones en los cálculos derivados de las ecuaciones que originan que pueda evaluarse únicamente una fracción de los eventos (p. ej. ORSS y OR). En el BIAS el bajo número de *hit* aunado al peso que tienen los *miss* y los *false alarm* en la ecuación impide hacer suposiciones con respecto a los instrumentos. Es necesario señalar que todas las interpretaciones dependen de una generalización de los resultados.

El bajo número de pares de datos para comparar limita la evaluación de la influencia de la topografía en las mediciones de precipitación. Además, se debe considerar no sólo la localización de la estación dentro de una provincia fisiográfica sino el valor altitudinal que le corresponde y las condiciones meteorológicas locales para entender la fuente de la incertidumbre en los datos y, con ello, ajustar los que se obtienen a través de sensores

remotos. Las bajas correlaciones entre las mediciones de ambos instrumentos en la zona montañosa se relacionan directamente con la falta de datos y la calidad de los que sí se tienen.

Se registraron 77 casos en los que ambos instrumentos detectaron valores de precipitación diferentes de cero. Se puede asociar un número mayor de *hit* con un porcentaje menor de datos faltantes en las mediciones en superficie. Tal es el caso de las estaciones Cd. Alemán, Montes Azules, Lagunas de Montebello y Acayucan, de manera que el haber tenido tan pocos registros útiles para la comparación numérica no debe asociarse directamente a la calidad de detección del satélite, sino a problemas en la toma de datos en las estaciones en superficie.

Las comparaciones puntuales muestran mayor correspondencia entre las mediciones de ambos instrumentos cuando las intensidades de precipitación son inferiores a 10 mm h^{-1} . Sin embargo, la tendencia en las mediciones muestra que el satélite subestima los registros de pluviómetros y, cuando las diferencias entre el valor mínimo y máximo de lluvia registrada en el intervalo de 30 minutos es mayor que 10 mm h^{-1} , los valores del satélite presentan un mejor ajuste a la estimación más baja de los pluviómetros. Los resultados que parten de una clasificación en función de las características topográficas se ven afectados porque en la zona montañosa sólo se localizan cinco estaciones de las 21 disponibles y en dos de ellas no se registró ningún *hit*.

Los datos obtenidos en la zona montañosa registran estimaciones de precipitación máximas del pluviómetro de 18 mm h^{-1} y del satélite de 11 mm h^{-1} , a diferencia de la zona plana, en donde ambos instrumentos registraron valores por encima de los 90 mm h^{-1} . Los coeficientes de correlación de Spearman y Pearson muestran bajas correlaciones de las mediciones en la montaña, siendo la más alta cuando se relaciona con los valores máximos tomados en superficie; el caso contrario ocurre en la zona plana, en donde las correlaciones más altas se encuentran en los mínimos y en el promedio de los valores tomados en el intervalo.

Por otra parte, las estaciones Los Tuxtlas II y Córdoba se localizan en la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur; sin embargo, se encuentran por encima de los 800 m s. n. m.,

de modo que no es suficiente utilizar el criterio de clasificación a partir de las provincias fisiográficas para evaluar la influencia de la topografía en las estaciones. Además, debe considerarse la estacionalidad y el tipo de precipitación.

7. Conclusiones

Derivadas del trabajo anterior se pueden enlistar las siguientes conclusiones:

- La cifra de registros útiles para el análisis categórico y las comparaciones numéricas es muy baja como resultado de la densidad de EMAs, la falta de datos y el alto nivel de coincidencia requerido para la validación.
- La metodología basada en comparaciones puntuales tiene limitaciones relacionadas con la discontinuidad espacial de las estimaciones de precipitación por pluviómetros y con la temporalidad de registro en superficie que mejor representa la medición del satélite.
- Los resultados del análisis categórico muestran una alta congruencia entre las estimaciones de los pluviómetros y del satélite al incluir los *null*.
- El bajo número de estaciones cubiertas en cada paso del satélite condiciona los resultados obtenidos a través de los índices dependientes únicamente de los *hit*, *miss* y *false alarm*, en los que la tendencia muestra que el satélite fracasa en la detección de precipitación.
- Las comparaciones numéricas de los 77 eventos de precipitación muestran que el satélite subestima en el 24% de los casos el valor mínimo de las estimaciones de precipitación registrada en superficie, el 75% del valor máximo y el 64% del valor promedio.
- La correlación entre los registros de precipitación en montaña es más baja con respecto a los ocurridos en la zona plana; sin embargo, la baja disponibilidad de estaciones y registros impide determinar en qué medida la topografía influye en las diferencias de las estimaciones de ambos instrumentos.

Las estimaciones de precipitación obtenidas mediante el satélite GPM son de gran utilidad para complementar la base de datos de superficie, al estar basadas en el algoritmo mejorado del satélite TRMM; sin embargo, se recomienda validar los datos con estaciones confiables,

es decir, que tengan registros completos (al menos el 70%), además de considerar si se localizan en zonas planas o con topografía compleja, antes de su implementación. El producto 2BCMB utilizado en esta investigación es uno de los múltiples productos meteorológicos generados a partir de percepción remota y muestra una tendencia a subestimar los datos de precipitación con respecto a las mediciones de los pluviómetros de las EMAs, de manera que sería de gran utilidad comparar las estimaciones del 2BCMB con las de otros productos del mismo satélite que utilicen diferentes algoritmos y sensores, para determinar cuál ofrece las mejores estimaciones.

8. Referencias

American Meteorological Society (AMS). (2019). Glossary: Precipitation. Disponible en: <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitation>

Artajo, X., & Senosiain, V. (2010). Pluviómetro de Cazoletas. Tesis de Licenciatura. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones. España.

Asurza Véliz, F. A., Ramos Taipe, C. L., Casimiro, L., & Sven, W. (2018). Evaluación de los productos Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y Global Precipitation Measurement (GPM) en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Huancané, Perú. *Scientia Agropecuaria*, 9(1), 53-62.

Best, A. C. (1950). The size distribution of raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 76(327), 16-36.

Campbell Scientific Ltd. (2010). User Manual. Tipping Bucket Raingauge. UK.

Castro Loayza, E. S. (2014). Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en región Costa, Sierra y Oriente del Ecuador. Tesis Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca. Ecuador.

Chaudhuri, S., & Middey, A. (2012). A composite stability index for dichotomous forecast of thunderstorms. *Theoretical and Applied Climatology*, 110(3), 457-469.

Chen, Y., Ebert, E. E., Walsh, K. J., & Davidson, N. E. (2013). Evaluation of TMPA 3B42 daily precipitation estimates of tropical cyclone rainfall over Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(21), 11-966.

Chen, S., Liu, H., You, Y., Mullens, E., Hu, J., Yuan, Y., Huang, M., He, L., Luo, Y., Zeng, X., Tang, G., & Hong, Y. (2014). Evaluation of high-resolution precipitation estimates from satellites during July 2012 Beijing flood event using dense rain gauge observations. *PloS One*, 9(4), e89681.

Chen, F., & Li, X. (2016). Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China. *Remote Sensing*, 8(6), 472.

Chiang, Y. M., Hsu, K. L., Chang, F. J., Hong, Y., & Sorooshian, S. (2007). Merging multiple precipitation sources for flash flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 340(3-4), 183-196.

Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid, España: Ediciones Ralph.

Collier, C. G. (2002). Developments in radar and remote-sensing methods for measuring and forecasting rainfall. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1796), 1345-1361.

Dinku, T., Connor, S. J., & Ceccato, P. (2010). Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over mountainous regions of Africa and South America. In *Satellite rainfall applications for surface hydrology* (pp. 193-204). Springer, Dordrecht.

Dinku, T., Hailemariam, K., Maidment, R., Tarnavsky, E., & Connor, S. (2014). Combined use of satellite estimates and rain gauge observations to generate high-quality historical rainfall time series over Ethiopia. *International Journal of Climatology*, 34(7), 2489-2504.

Ebert, E. E., Janowiak, J. E., & Kidd, C. (2007). Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(1), 47-64.

Erena, M., López, J., García, P., Caro, M., Belda, F., Palenzuela, J., Toledano, F., Torralba, P., González-Barbera, G., García-Pintado, J. (2012). Estimación de precipitación combinada radar-pluviómetros y publicación mediante servicios OGC. XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Madrid.

FTS. (2018). Technical specifications. Disponible en:
<https://ftsinc.com/meteorology/products/sensors/rain-gauge/>

García, E. (1998). Climas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Formato shapefile. México.

Guijarro, J. A. (2002). Influencia de la intensidad de la precipitación en las medidas de los pluviómetros de balancín en las Islas Baleares.

Greco, M., Olson, W. S., y Anagnostou, E. N. (2004). Retrieval of precipitation profiles from multiresolution, multifrequency active and passive microwave observations. *Journal of Applied Meteorology*, 43(4), 562-575.

Greco, M., Olson, W. S., Munchak, S. J., Ringerud, S., Liao, L., Haddad, Z., Kelley, B., & McLaughlin, S. F. (2016). The GPM combined algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(10), 2225-2245.

Haddad, Z. S., Smith, E. A., Kummerow, C. D., Iguchi, T., Farrar, M. R., Durden, S. L., Alven, M., & Olson, W. S. (1997). The TRMM 'day-1' radar/radiometer combined rain-profiling algorithm. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 75(4), 799-809.

Hong, Y., Adler, R., & Huffman, G. (2006). Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment. *Geophysical Research Letters*, 33(22).

Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., & Iguchi, T. (2014). The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701-722.

Hughes, D. A. (2006). Comparison of satellite rainfall data with observations from gauging station networks. *Journal of Hydrology*, 327(3-4), 399-410.

- Iguchi, T., Seto, S., Meneghini, R., Yoshida, N., Awaka, J., & Kubota, T. (2010). GPM/DPR level-2 algorithm theoretical basis document. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA.
- Islam, T., Rico-Ramirez, M. A., Han, D., Srivastava, P. K., & Ishak, A. M. (2012). Performance evaluation of the TRMM precipitation estimation using ground-based radars from the GPM validation network. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 77, 194-208.
- Jiménez, S. (2016). Asimilación de datos de satélite para la caracterización de la lluvia ciclónica en México. Tesis Maestría en Ingeniería. Ingeniería Civil-Hidráulica, UNAM. México.
- Kidd, C., & Huffman, G. (2011). Global precipitation measurement. *Meteorological Applications*, 18(3), 334-353.
- Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., & Kirschbaum, D. B. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 69-78.
- Kozu, T., Kawanishi, T., Kuroiwa, H., Kojima, M., Oikawa, K., Kumagai, H., Okamoto, K., Okumura, M., Nakatsutka, H., & Nishikawa, K. (2001). Development of precipitation radar onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 102-116.
- Krajewski, W. F., & Smith, J. A. (2002). Radar hydrology: rainfall estimation. *Advances in water resources*, 25(8-12), 1387-1394.
- Kubota, T., Shige, S., Hashizume, H., Aonashi, K., Takahashi, N., Seto, S., Hirose, M., Takayabu, Y., Ushio, T., Nakagawa, K., Iwanami, K., Kachi, M., & Okamoto, K., (2007). Global precipitation map using satellite-borne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(7), 2259-2275.
- Lebel, T., Bastin, G., Obled, C., & Creutin, J. D. (1987). On the accuracy of areal rainfall estimation: a case study. *Water Resources Research*, 23(11), 2123-2134.
- Li, M., & Shao, Q. (2010). An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data. *Journal of Hydrology*, 385(1-4), 51-64.
- Masunaga, H., & Kummerow, C. D. (2005). Combined radar and radiometer analysis of precipitation profiles for a parametric retrieval algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22(7), 909-929.
- Méndez, L., Juan, A., Hernández González, A., Garrido Monagas, M., & Andalia Gilbert, A. (2013). Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 73-87.
- Montero-Martínez, G., Zarraluqui-Such, V., & García-García, F. (2012). Evaluation of 2B31 TRMM-product rain estimates for single precipitation events over a region with complex topographic features. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D2).

Munchak, S. J., & Kummerow, C. D. (2011). A modular optimal estimation method for combined radar–radiometer precipitation profiling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(2), 433-448.

Nanding, N., Rico-Ramirez, M. A., & Han, D. (2015). Comparison of different radar-raingauge rainfall merging techniques. *Journal of Hydroinformatics*, 17(3), 422-445.

NASA. (2015). Global Precipitation Mission (GPM). Ground Validation System. Validation Network Data Product User's Guide. Volume 2 – GPM Data Products. USA.

NASA. (2017). Global Precipitation Measurement. Precipitation Processing System. File Specification 2BCMB. Preliminary Version.

NASA (2018). GPM Spacecraft and Instruments. Disponible en:
https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/spacecraft/index.html

NASA (2019). Precipitation Measurement Mission. Disponible en:
<https://pmm.nasa.gov/GPM/flight-project/DPR>

Olson, W. S., Masunaga, H., & GPM Combined Radar-Radiometer Algorithm Team. (2016). GPM combined radar-radiometer precipitation algorithm theoretical basis document (Version 4). NASA: Washington, DC, USA.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (2012). Glosario Hidrológico Internacional. Suiza: UNESCO.

Petersen, W. A., & Schwaller, M. R. (2008). GPM Ground Validation: Science Implementation Plan—. Draft, July, 10, 2008.

Prakash, S., Mitra, A. K., AghaKouchak, A., & Pai, D. S. (2015). Error characterization of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA-3B42) products over India for different seasons. *Journal of Hydrology*, 529, 1302-1312.

Roebber, P. J. (2009). Visualizing multiple measures of forecast quality. *Weather and Forecasting*, 24(2), 601-608.

Rozante, J. R., Moreira, D. S., de Goncalves, L. G. G., & Vila, D. A. (2010). Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. *Weather and forecasting*, 25(3), 885-894.

Sapiano, M. R. P., & Arkin, P. A. (2009). An intercomparison and validation of high-resolution satellite precipitation estimates with 3-hourly gauge data. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1), 149-166.

Schwaller, M. R., & Morris, K. R. (2011). A ground validation network for the global precipitation measurement mission. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(3), 301-319.

Servicio Meteorológico Nacional. (2018). Estaciones Meteorológicas Automáticas, disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>

Skofronick-Jackson, G., Petersen, W., Berg, W., Kidd, C., Stocker, F., Kirschbaum, D., Kakar, R., Braun, S., Huffman, G., Iguchi, T., Kirstetter, P., Kummerow, C., Meneghini, R., Oki, R., Olson, W., Takayabu, Y., Furukawa, K., & Wilhelm, T. (2017). The global precipitation measurement (GPM) mission for science and society. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8), 1679-1695.

Tartaglione, N. (2010). Relationship between precipitation forecast errors and skill scores of dichotomous forecasts. *Weather and Forecasting*, 25(1), 355-365.

Torres, E. (2018), Estudio del desempeño de un disdrómetro óptico. Tesis de Licenciatura en Física. UNAM. México.

Vaisala. (2017). Technical specifications. Disponible en: <https://www.vaisala.com/es/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/weather-stations-and-sensors/rg13-rg13h>

Vallejos, A. G., Ancalle, S. A., Escalera, A. C., & Saavedra, O. C. (2016) Analyzing areal precipitation at key basins in Cochabamba using satellite-based precipitation. *Investigación y Desarrollo*, 16(1), 25-38.

Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.

World Weather Research Program (WWRP). (2017). *Forecast Verification methods Across Time and Space Scales*. 7th International Verification Methods Workshop. Berlin, Alemania. Mayo 3 de 2017.

Anexo 1 | Tabla de los registros en los que el satélite GPM y los pluviómetros de las EMAs midieron valores diferentes de cero.

No.	Nombre	Fecha	Estación	Hora parámetro	Satélite mmh ⁻¹	Superficie (mmh ⁻¹)				
						Mínimo	Máximo	Promedio		
1	S020809	E034043	14476	09/15/16	ACAYUCAN	3:12	0.7	0	0.6	0.2
2	S082738	E100010	14869	10/10/16	ACAYUCAN	8:55	4.1	1.2	3.6	2.4
3	S084014	E101245	8475	08/26/15	ACAYUCAN	9:08	1.7	2.4	3	2.6
4	S093722	E110956	13532	07/16/16	ACAYUCAN	10:05	1.6	0	0.6	0.2
5	S095116	E112350	14061	08/19/16	ACAYUCAN	10:55	2.1	0	0.6	0.2
6	S172229	E185503	14937	10/14/16	ACAYUCAN	18:26	0.2	0	26.4	9.8
7	S203122	E220354	9665	10/11/15	ACAYUCAN	21:35	0.5	0.6	12.6	6.8
8	S223959	E001232	18487	05/30/17	ACAYUCAN	23:44	8.1	6.6	18	12.2
9	S034344	E051619	18957	06/30/17	ALEMAN	4:13	0.2	0	3	1
10	S045033	E062308	20171	09/16/17	ALEMAN	5:18	2.8	1.56	6.06	3.06
11	S061346	E074620	19363	07/26/17	ALEMAN	7:18	0.5	0	10.68	6.1
12	S084014	E101245	8475	08/26/15	ALEMAN	9:08	5.0	7.62	9.12	8.62
13	S134657	E151931	20239	09/20/17	ALEMAN	14:51	0.2	1.5	4.56	3.04
14	S162910	E180143	6053	03/23/15	ALEMAN	17:33	1.9	0	1.56	1.02
15	S170742	E184016	9305	10/18/15	ALEMAN	17:36	0.5	3.06	9.12	5.58
16	S183318	E200553	13600	07/20/16	ALEMAN	19:37	8.9	6.06	106.68	50.8
17	S192238	E205509	9182	10/10/15	ALEMAN	19:51	12.9	0	18.3	6.1
18	S192746	E210019	16105	12/28/16	ALEMAN	20:32	0.8	0	1.56	0.52
19	S225400	E002634	14645	09/25/16	ALEMAN	23:58	9.9	9.18	50.28	26.92
20	S031744	E045017	13139	06/21/16	ALVARADO	4:22	0.6	0	1.2	0.8
21	S183318	E200553	13600	07/20/16	ALVARADO	19:37	12.2	13.2	39.6	28.8
22	S041113	E054347	19455	01/08/17	AZULES	5:15	1.5	0	1.2	0.4
23	S052949	E070220	9173	10/10/15	AZULES	6:34	11.1	0	3.6	1.2
24	S062443	E075717	14961	10/16/16	AZULES	6:52	3.0	0	1.2	0.4
25	S073745	E091017	15444	11/16/16	AZULES	8:42	6.8	1.2	18	6.8
26	S082932	E100205	16129	12/30/16	AZULES	8:57	0.8	0	4.8	2
27	S092000	E105233	10249	12/18/15	AZULES	10:24	1.7	6	10.8	8
28	S171732	E185007	9274	10/16/15	AZULES	17:45	0.6	0	3.6	1.2
29	S225332	E002604	8982	09/27/15	AZULES	23:21	1.8	2.4	4.8	3.2
30	S031744	E045017	13139	06/21/16	BENITO	4:22	0.8	0	1.2	0.4
31	S011414	E024647	13231	06/27/16	CARMEN	2:18	4.9	2.4	2.4	2.4
32	S045417	E062651	18880	06/25/17	CARMEN	5:22	4.0	1.2	2.4	1.6
33	S073521	E090755	13624	07/22/16	CARMEN	8:03	0.7	0	1.2	0.8
34	S045417	E062651	18880	06/25/17	CENTLA	5:22	4.1	4.8	4.8	4.8
35	S070838	E084109	18757	06/17/17	ESCARCEGA	7:36	2.5	0	1.2	0.8
36	S203924	E221157	16028	12/23/16	ESCARCEGA	21:43	2.1	0	8.4	2.8
37	S212802	E230036	19264	07/19/17	ESCARCEGA	21:56	0.2	0	1.2	0.4
38	S003815	E021048	17835	04/19/17	MATIAS	1:06	1.0	0	1.56	0.52
39	S031744	E045017	13139	06/21/16	MATIAS	4:22	5.8	24.42	38.1	32.02
40	S034954	E052228	20217	09/19/17	MATIAS	4:18	3.6	6.12	6.12	6.12
41	S092704	E105939	19194	07/15/17	MATIAS	10:31	0.3	0	1.5	0.5
42	S223959	E001232	18487	05/30/17	MATIAS	23:44	4.7	0	18.24	6.6
43	S232004	E005236	8220	09/08/15	MONCLOVA	0:24	15.5	0	1.2	0.4
44	S000541	E013815	14568	09/21/16	MONTEBELLO	1:10	0.3	0	1.2	0.8
45	S010126	E023359	9419	10/26/15	MONTEBELLO	2:05	0.4	0	1.2	0.4

No.	Nombre			Fecha	Estación	Hora parámetro	Satélite mmh ⁻¹	Superficie (mmh ⁻¹)		
								Mínimo	Máximo	Promedio
46	S035327	E052602	18926	06/28/17	MONTEBELLO	4:21	1.3	0	1.2	0.8
47	S051402	E064632	6637	04/30/15	MONTEBELLO	6:18	1.1	2.4	2.4	2.4
48	S055044	E072318	7882	07/19/15	MONTEBELLO	6:55	1.6	0	7.2	2.4
49	S070838	E084109	18757	06/17/17	MONTEBELLO	7:36	0.4	0	2.4	0.8
50	S071508	E084739	9812	11/20/15	MONTEBELLO	7:43	3.6	1.2	13.2	5.2
51	S192119	E205351	18656	10/06/17	MONTEBELLO	20:25	0.5	6	16.8	12.8
52	S031426	E044700	9296	10/18/15	PARAISO	4:18	0.5	0	6	2
53	S192837	E210109	9711	11/13/15	PARAISO	20:33	2.4	0	1.5	0.5
54	S012402	E025632	10664	01/14/16	PETENES	2:28	2.5	0	1.2	0.8
55	S222908	E000142	19218	07/16/17	PETENES	22:57	2.5	0	7.2	3.2
56	S051402	E064636	15038	10/21/16	TUXTLAS 2	5:42	11.8	7.2	24	18
57	S082738	E100010	14869	10/10/16	TUXTLAS 2	8:55	9.5	9.6	36	24.8
58	S084014	E101245	8475	08/26/15	TUXTLAS 2	9:08	4.4	6	7.2	6.6
59	S095116	E112350	14061	08/19/16	TUXTLAS 2	10:55	1.9	1.2	1.2	1.2
60	S125615	E142844	10796	01/22/16	TUXTLAS 2	13:24	1.2	0	24	8
61	S170742	E184016	9305	10/18/15	TUXTLAS 2	17:36	2.2	4.8	24	12
62	S172107	E185341	13117	06/19/16	TUXTLAS 2	17:49	2.4	1.2	1.2	1.2
63	S184245	E201519	7937	07/22/15	TUXTLAS 2	19:11	4.3	0	4.8	2.4
64	S005410	E022644	15813	10/12/16	TUXTLAS1	1:58	1.0	0	1.2	0.4
65	S040632	E053905	20746	10/23/17	TUXTLAS1	5:10	11.9	0	8.4	4.8
66	S061346	E074620	19363	07/26/17	TUXTLAS1	7:18	0.4	0	1.2	0.4
67	S082601	E095835	19240	07/18/17	TUXTLAS1	9:30	7.7	2.4	49.2	21.6
68	S082738	E100010	14869	10/10/16	TUXTLAS1	8:55	0.8	1.2	3.6	2.4
69	S010850	E024123	8859	09/20/15	USUMACINTA	1:37	95.9	1.2	31.2	12
70	S014353	E031625	5001	01/15/15	USUMACINTA	2:12	0.6	1.2	10.8	4.8
71	S024910	E042144	20263	09/22/17	USUMACINTA	3:17	5.2	1.2	12	5.6
72	S032757	E050031	13108	06/19/16	USUMACINTA	4:32	4.9	2.4	2.4	2.4
73	S045546	E062816	9935	11/28/15	USUMACINTA	5:24	0.6	0	1.2	0.8
74	S062443	E075717	14961	10/16/16	USUMACINTA	6:52	1.2	0	2.4	1.2
75	S012402	E025632	10664	01/14/16	YOHALTUM	2:28	0.4	0	3.6	1.6
76	S070838	E084109	18757	06/17/17	YOHALTUM	7:36	0.6	0	2.4	0.8
77	S212802	E230036	19264	07/19/17	YOHALTUM	21:56	0.8	0	1.2	0.8

Anexo 2 | Código en lenguaje Python útil para la extracción y procesamiento de datos de precipitación del satélite GPM.

Filtro geográfico y selección de variables

```
#Importar las librerías que van a utilizarse
from os import path
import basename
import os
import h5py
import numpy as np

#Asignar rutas a variables de interés
path = 'C:/Users/Berenice/Desktop/CCA/Archivos/'
rutaguarda = 'C:/Users/Berenice/Desktop/CCA/Resultado/'
total = '_total.csv'

#Enlistar y asignar todos los archivos del directorio a un arreglo
files = os.listdir(path)

#Iniciar el ciclo de extracción de datos para cada archivo
for name in files:
    NSLat = None
    NSLon = None
    NSPrec = None
    NSHor = None
    NSMin = None
    NSSeg = None
    f = None
    dataLat = None
    dataLon = None
    dataPrec = None
    dataHor = None
    dataMin = None
    dataSeg = None

#Leer los archivos, extraer los datos y asignarlos a una variable
f = h5py.File(path + name, 'r')
dataLat = f.get('NS/Latitude')
dataLon = f.get('NS/Longitude')
dataPrec = f.get('NS/surfPrecipTotRate')
dataHora = f.get('NS/ScanTime/Hour')
dataMin = f.get('NS/ScanTime/Minute')
dataSeg = f.get('NS/ScanTime/Second')

#Convertir los datos obtenidos en un arreglo
NSLat = np.array(dataLat)
NSLon = np.array(dataLon)
NSPrec = np.array(dataPrec)
NSHora = np.array(dataHor)
NSMin = np.array(dataMin)
NSSeg = np.array(dataSeg)
NumLineas = len(dataLat)
```

```

#Extraer el nombre y la extensión de los archivos y, realizar un filtro
espacial
filename_w_ext = os.path.basename(path)
filename, file_extension = os.path.splitext(filename_w_ext)
i=0
j=0
while i < NumLineas:
    f1 = NSLat[i][j]
    if (16 <= f1 <= 20):
        f2 = NSLon[i][j]
        if (f2 >= -97 and f2 <= -90):
            NSFinal = [NSLat[i][j],NSLon[i][j],NSPrec[i][j]]
            f3 = NSPrec[i][j]
            f4 = NSHora [i][j]
            f5 = NSMin [i][j]
            f6 = NSSeg [i][j]

            with open(rutaguarda+filename+".csv","a") as e:
                print >> e, ",",f1,",",f2,",",f3,",",f4,",",f5,",",f6

        if j == 48:
            i = i + 1
            j = 0

        else:
            j = j + 1

e.close()

```

Selección de pasos del satélite por la zona de estudio que registran al menos un valor de precipitación diferente de cero.

```

#Importar las librerías útiles
import pandas as pd
import numpy as np
import os
from shutil import copyfile

#Asignar rutas a variables de interés
path = 'C:/Users/Berenice/Desktop/CCA/ConPrec/'
pathsin = 'C:/Users/Berenice/Desktop/CCA/SinPrec/'

#Enlistar y asignar todos los archivos del directorio a un arreglo
files = os.listdir(path)

#Seleccionar los archivos cuyo valor máximo de precipitación es cero y
eliminarlos del directorio
for name in files:
    df= None
    df=pd.read_csv(path+name, sep=',',header=None)
    d = df.iloc[:,2].values
    ar1 = np.array(d)
    maximo = max(ar1)
    if maximo <= 0:

```

```
copyfile(path+name, pathsin+name)  
os.remove(path+name)
```

```
print("Termino")
```