



UNIVERSIDAD DE CUENCA

**UNIVERSIDAD DE CUENCA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones  
(TRMM 3B43 mensual) en Región Costa, Sierra y  
Oriente del Ecuador**

Tesis previa a la obtención del  
Título de Ingeniero Civil

**Autor:**

Edisson Santiago Castro Loayza

**Directora:**

Daniela Ballari, PhD.

**CUENCA – ECUADOR**

**2014**



# **Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en las regiones Costa, Sierra y Oriente del Ecuador**

## **Resumen**

Los datos precisos de precipitación son de vital importancia para el manejo de recursos hídricos; sin embargo, son difíciles de estimar sobre todo en regiones donde la precipitación tiene una alta variabilidad espacial y las redes de pluviómetros son escasas, como es el caso del Ecuador. Los algoritmos que utilizan las imágenes satelitales para estimar precipitación espacial son entonces de gran ayuda, aunque tienen una resolución y precisión limitada, por lo que se vuelve necesaria su evaluación para encontrar series de datos adicionales que ayuden a la caracterización de la precipitación en una zona.

El siguiente estudio constituye la evaluación de las estimaciones de precipitación del algoritmo TRMM 3B43 a escala mensual utilizando series de datos de catorce pluviómetros provenientes del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) distribuidos en las regiones Costa, Sierra y Oriente del territorio ecuatoriano durante los años 1998 y 2010. En general, los resultados del TRMM 3B43 para las estaciones en estudio capturan cualitativamente la precipitación mensual en el Ecuador. Según cálculos de errores estadísticos e índices de detección, se encontró que cuantitativamente, las regiones costanera y oriental están mejor representadas por el satélite que la región andina. La evaluación de la última versión de un algoritmo usado ampliamente en el mundo y los resultados consistentes en una región compleja, proveen una metodología de estudio y conclusiones que pueden ser utilizadas posteriormente en estudios más detallados como de calibración y corrección por sesgo de las estimaciones de precipitación.

**Palabras clave:** TRMM, TRMM 3B43, precipitación, Ecuador



## Abstract

Accurate precipitation data is of utmost importance for water resources management. However, it is difficult to estimate, especially in regions of high spatial variability and scarcity of rain gauge networks, such as Ecuador. Algorithms that use satellite outputs to estimate precipitation spatially can cope with this problem. Nevertheless, they have a limited accuracy and resolution; therefore, their evaluation is necessary in order to find additional datasets that support characterization of precipitation patterns in a region. The present research evaluates the TRMM 3B43 algorithm precipitation estimates on a monthly scale with fourteen rain gauge data series from the National Institute of Meteorology and Hydrology of Ecuador (INAMHI). Stations are distributed in the three regions of Ecuador (Costa, Sierra and Oriente) and the time series are from 1998 to 2010. In general, TRMM 3B43 estimates capture monthly precipitation qualitatively in the study region. According to the statistical errors and satellite scores calculated, the Coastal and Oriental regions are better estimated quantitatively than the Andean region. Evaluation of a newly launched algorithm that is widely used and consistent results in a complex region provide methodology and conclusions that can be extrapolated to more detailed studies in the future such as calibration and bias correction of precipitation estimates.

**Keywords:** TRMM 3B43 TRMM precipitation, Ecuador



## Índice

Portada.....	1
Resumen.....	2
Abstract.....	3
Índice.....	4
Agradecimiento .....	8
1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1. Objetivo general .....	11
1.2. Objetivos específicos .....	11
2. MARCO TEÓRICO .....	11
2.1. Métodos de observación de datos de precipitaciones (in-situ e imágenes de satélites).....	11
2.2. Estudios relacionados sobre evaluación de imágenes de satélites de precipitaciones.....	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1. Descripción de la zona de estudio .....	15
3.2. Descripción de los datos de precipitación in-situ.....	17
3.2.1. Pre-procesamiento de datos.....	20
3.3. Descripción de imágenes satelitales de precipitación TRMM 3B43 ....	21
3.4. Medidas de evaluación.....	22
3.4.1. Precipitación media mensual multianual (PMMM).....	22
3.4.2. Errores estadísticos .....	23
3.4.3. Índices de detección .....	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
4.1. Pre-procesamiento de datos .....	26
4.2. Precipitación media mensual multianual .....	28
4.3. Errores estadísticos.....	32
4.4. Índices de detección.....	36
5. CONCLUSIONES .....	41
6. REFERENCIAS.....	43
7. ANEXOS .....	46



## Lista de Tablas

Tabla 1. Datos de ubicación de las estaciones utilizadas para la evaluación. .	19
Tabla 2. Promedio del sesgo, RMSE y coeficiente de Pearson para las tres regiones y el Ecuador.....	34
Tabla 3. Índices promedio para las regiones Costa, Sierra, Oriente y el Ecuador.....	38

## Lista de Figuras

Figura 1. Mapa de precipitación media multianual (1981-2010) (INAMHI, 2013). .....	16
Figura 2. Red meteorológica del INAMHI (INAMHI, 2013). .....	18
Figura 3. Zona de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionadas.....	20
Figura 4. Curva de doble masa para las estaciones M008 y M041.....	27
Figura 5. Resultados del test de homogeneidad con el algoritmo RHtestV4 para las estaciones M007(a), M008 (b), M041(c) y M189 (d).....	28
Figura 6. Precipitación media mensual multianual para estimaciones de pluviómetros y TRMM 3B43 en las estaciones de la Costa (a), Sierra con régimen unimodal (b1), bimodal (b2) y Oriente (c). .....	32
Figura 7. Sesgo, raíz del error medio cuadrado (RMSE) y coeficiente de correlación de Pearson ( $\gamma$ ) para las estaciones de la Costa (negro), Sierra (verde) y Oriente (rojo). .....	36
Figura 8. Índices POD (a), ETS (b), FAR (c) y FBI (d) para 10, 20, 50, 100, 200, 300 y 400 mm de precipitación para las estaciones de la Costa (negro), Sierra (verde) y Oriente (rojo).....	40

## Lista de Anexos

Anexo 1. Algoritmo en R para extraer las estimaciones del satélite en la grilla correspondiente a cada estación.....	46
Anexo 2. Cálculo de errores estadísticos e índices de detección para las estaciones de la Costa, Sierra y Oriente .....	49



Universidad de Cuenca

Cláusula de propiedad intelectual

---

Yo, Edison Santiago Castro Loayza, autor de la tesis "Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en las regiones Costa, Sierra y Oriente del Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre del 2014.

---

Edison Santiago Castro Loayza

C.I: 0104360797



Universidad de Cuenca

Cláusula de derechos de autor

---

Yo, *Edisson Santiago Castro Loayza* autor de la tesis "Evaluación de Imágenes Satelitales de Precipitaciones (TRMM 3B43 mensual) en las regiones Costa, Sierra y Oriente del Ecuador" reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, octubre del 2014

---

Edisson Santiago Castro Loayza

C.I: 0104360797



## **Agradecimiento**

A todos mis profesores que compartieron sus conocimientos y en especial a la Dra. Daniela Ballari que dirigió este estudio.

A mi madre Bernardita de Lourdes, mi padre Edison, mi hermana Bernarda, mi esposa Elizabeth, mis hijas Ariana Marcela y Camila Bernarda.



## 1. INTRODUCCIÓN

Existe una creciente demanda de recursos hídricos para agricultura, generación de electricidad e industria. Por eso, es extremadamente importante entender las características de la precipitación en una región, puesto que constituye un aspecto principal en el ciclo del agua. Además, datos de precipitación precisos son necesarios para elaborar modelos hidrológicos que apoyen el manejo adecuado de recursos hídricos y estudios de cambio climático.

La estimación de precipitación es una tarea complicada en regiones como el Ecuador que cuentan con una red de pluviómetros escasa y con gran variabilidad espacial producto del relieve de alta montaña. Los pluviómetros ofrecen información del punto donde son colocados, y por consecuencia la variabilidad espacial no puede ser representada adecuadamente. Es por esto que los productos de satélites se han convertido en una valiosa herramienta para estimar precipitación, ya que proveen datos continuos espacialmente y a intervalos temporales regulares (mensuales, diarios, sub-diarios). Además son fundamentales para obtener estimaciones donde no se han colocado pluviómetros y en periodos de tiempo de los que no se tienen registros. Uno de los productos más utilizados de este tipo es el “*TRMM 3B43 Multisatellite Precipitation Analysis*” que combina estimaciones de precipitación de múltiples satélites así como con pluviómetros de control. Esta combinación de información de varios sensores es lo que aventaja este producto frente a otros (Ceccato and Dinku, 2010). Son de libre distribución y se encuentran disponibles en la versión V6 (tradicional) y V7 (actualizada). Su resolución espacial es de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (~27 Kmx27 Km) con una cobertura casi global (banda de latitud  $50^\circ\text{N-S}$ ). Su resolución temporal es cada 3 horas, aunque también se distribuyen agregaciones diarias y mensuales. Se encuentra disponible desde enero de 1998 (Huffman *et al.*, 2007).

En el Ecuador, los productos satelitales son usados como una importante fuente de predicción de clima a corto plazo (Muñoz *et al.*, 2010). Sin embargo, para poder utilizar esta herramienta con todo su potencial se vuelve imperativo realizar una



evaluación de la misma. La evaluación de los productos satelitales permite conocer los alcances que el producto puede tener para caracterizar la precipitación en la zona de estudio y sus aplicaciones consecuentes. La versión 7 del producto TRMM se usa en el presente estudio debido a que presenta mejoras en el sesgo específicamente en las regiones costaneras (Ochoa *et al.*, 2014) y según Zulkafli *et al.*(2014) también hay mejoras en cuencas andinas-amazónicas del norte de Perú.

Esta tesis evaluará el desempeño del producto satelital TRMM 3B43 V7 a escala mensual para las regiones Costa, Sierra y Oriente del Ecuador en comparación con los datos de las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI) publicadas en sus anuarios. El período de análisis es desde 1998 (año desde el cual está disponible el producto TRMM) hasta el 2010 (año hasta el cual están disponibles los anuarios de INAMHI). Para la selección de las estaciones se tomaron 4 por región (excepto en la Sierra donde se tomaron 6 estaciones) considerando que se dispongan de datos en el periodo de análisis. Si bien esta selección no responde a un muestreo aleatorio ni representativo, se considera un número reducido de estaciones (14 en total) para poder centrar la atención en las medidas de evaluación, esperándose que en futuras investigaciones se utilicen los resultados de esta tesis y se extienda la evaluación a otras estaciones y/o zonas. La evaluación será puntual en las estaciones correspondiendo con píxeles en las imágenes. La escala temporal será mensual dado que es la escala temporal en la que se encuentran publicados los datos de INAMHI y, además, esta escala temporal es útil para analizar la estacionalidad de la precipitación de la región.

Las medidas de evaluación han sido recopiladas de estudios relacionados(Feidas, 2009; Ochoa *et al.*, 2014; Scheel *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2008) y son de dos tipos. Por un lado se calculan errores estadísticos: sesgo, raíz del error medio cuadrado y coeficiente de correlación de Pearson. Estos resultados se pueden mostrar en promedio para cada estación para el período temporal de análisis. Por otro lado se utilizan índices de detección, tales como: probabilidad de detección, índice de



sesgo y falsa alarma. Para analizar la estacionalidad se realizan y comparan gráficos de precipitación media mensual multianual para ambas fuentes de datos.

### ***1.1. Objetivo general***

Evaluar las estimaciones mensuales de precipitaciones de las imágenes satelitales TRMM 3B43 Versión 7 para regiones Costa, Sierra y Oriente del Ecuador, en base a la comparación de dichas estimaciones con los datos registrados en las estaciones meteorológicas del INAMHI.

### ***1.2. Objetivos específicos***

- Obtener los datos de las estaciones meteorológicas del INAMHI y de las imágenes TRMM 3B43 V7.
- Realizar el análisis de la calidad de datos de estaciones representativas en las regiones Costa, Sierra y Oriente del Ecuador.
- Definir y aplicar medidas de comparación estación meteorológica-píxel TRMM 3B43 V7.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### ***2.1. Métodos de observación de datos de precipitaciones (in-situ e imágenes de satélites)***

Para caracterizar la precipitación es necesario contar con datos veraces observados en el terreno. Los pluviómetros cumplen con esta función y consisten en un instrumento de medición, una plataforma de recolección de datos, fuente de poder y unidad de manejo, así como de un dispositivo de comunicación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que los pluviómetros son susceptibles a errores y no son capaces de representar espacialmente la precipitación. Por tanto, es necesaria la instalación de redes de pluviómetros que presten información tan precisa, confiable y oportuna como sea posible. Su importancia incluye la evaluación de amenazas y alertas tempranas, calibración de radares, corrección



de imágenes satelitales y calibración de modelos numéricos de medición de precipitación(UCAR, 2012). En regiones como el Ecuador, donde las redes de pluviómetros son escasas debido a factores económicos e incluso con dificultad de acceso a áreas remotas, la estimación de precipitación puede ser complementada e incluso sustituida por el uso de imágenes satelitales. Por ejemplo, las estimaciones satelitales de precipitación pueden ser corregidas por sesgo con datos de precipitación provenientes de una red de pluviómetros confiable y en caso de que los productos satelitales hayan sido evaluados de manera confiable, estos resultados pueden ser utilizados en zonas donde no existan pluviómetros.

Generalmente los algoritmos que estiman precipitación combinan información de varios sensores del satélite como son los sensores infrarrojos que son probablemente los más conocidos y tienen una amplia y consistente cobertura; también se utiliza comúnmente los sensores de microondas. Una desventaja de los sensores infrarrojos es que observan solo la temperatura en la cima de las nubes, mientras que los sensores de microondas observan emisiones provenientes de agua y de hielo dentro de las nubes produciendo estimaciones más confiables pero con una resolución temporal menor (Ceccato and Dinku, 2010).Debido a las ventajas y desventajas de los sensores para estimar precipitación, se han desarrollado técnicas que usan la gran precisión de los sensores microonda y la mayor resolución y cobertura temporal de los infrarrojos; también existen métodos estadísticos que combinan información de sensores con datos de campo provenientes de pluviómetros (Ceccato and Dinku, 2010).

En lo que respecta a las imágenes satelitales es importante conocer su resolución espacial y temporal, pues las estimaciones corresponden a la precipitación promedio sobre un área determinada y en un periodo de tiempo limitado.



## ***2.2. Estudios relacionados sobre evaluación de imágenes de satélites de precipitaciones***

En el contexto internacional existen experiencias previas de evaluación del producto TRMM, encontrando por ejemplo que en regiones de Estados Unidos, Australia e Islas Marshall existe una alta correlación de precipitación a escalas diarias y mensuales, aunque no tanto a escalas temporales menores (Wang and Wolff, 2012; Wolff et al., 2005). Wang y Wolff (2012) encontraron que para intensidades de lluvia bajas, el producto se correlaciona bien con las estimaciones de radar, lo que no se cumple para intensidades altas. En el ciclo diario de precipitación, la correlación es buena pero el pico tiene un desfase de una hora. En ambos estudios se utilizaron redes de pluviómetros extensas para la evaluación. Sin embargo, Nicholson *et al.* (2003) muestran que los resultados del TRMM también son positivos a escala mensual y anual, aun cuando el estudio localizado en regiones de África no posee una red de pluviómetros tan extensa.

En Australia, Fleming and Awange (2011) utilizan el análisis de componentes principales para evaluar el producto TRMM 3B43, encontrando una alta correlación con datos de pluviómetros a escala mensual y coincidencia en las características temporales y espaciales. También se usaron histogramas que demostraron que las distribuciones de probabilidad del producto satelital y del registro pluviométrico son similares entre sí. La correlación para el sitio de estudio es de alrededor del 0.80 para toda la escala temporal, aunque existen algunas variaciones. En cuanto al tipo de clima, las zonas templadas muestran mejor correlación que las zonas tropicales y desérticas. Por tanto, este artículo recomienda el uso del TRMM 3B43 esas regiones australianas en estudio, sobre todo en sitios donde no existe un elevado número de estaciones pluviométricas.

Haile *et al.* (2013) evaluaron la versión a tiempo real (RT), la versión post tiempo real (PRT) del TRMM 3B42 y otro producto satelital (NOAA-CPC). El objetivo fue saber si los resultados satelitales son capaces de representar el ciclo diario de lluvia en la cuenca del Nilo. El estudio concluye que los satélites muestran gran



variación en sus estimaciones sobreestimando zonas sobre lagunas, islas y costas aunque subestima en zonas montañosas. También es interesante saber que la versión PRT, que fue ajustada por sesgo, no muestra mejorías en la zona de la cuenca del Nilo y probablemente se debe a que este ajuste no toma en cuenta datos de campo.

Los productos TRMM 3B42 (con resolución espacial de 0.5° y de 1°), TRMM 3B43 (con resolución espacial de 0.5°, 1° y 2.5°); el TMI (0.5°) y otros productos de precipitación fueron evaluados por Feidas (2009) a escalas mensual, estacional y anual sobre el territorio griego. Los resultados muestran que la versión TRMM 3B43 tiene un excelente desempeño en el área de estudio en todas las resoluciones espaciales a las que fue evaluada mientras que el TRMM 3B42 muestra resultados razonables.

Respecto a la evaluación de TRMM en el Ecuador y zonas cercanas o semejantes, existen estudios como de Zulkafli *et al.*(2014) donde analizan la versión V7 del TRMM en cuencas andinas y amazónicas encontrando que el sesgo es menor que con la versión V6 y la representación de la distribución de precipitación es mejor. Scheel *et al.*(2011) evalúa el TRMM 3B42 V6 en zonas andinas del Perú a escala diaria encontrando un sesgo alto y aunque la ocurrencia de eventos de precipitación es acertada, las intensidades son subestimadas. También, Ochoa *et al.*(2014) evaluaron el TRMM 3B42 V6 y V7 a escala diaria en cuencas hidrográficas de zonas costaneras ecuatorianas y de la frontera con Perú mostrando que el producto satelital logra capturar la estacionalidad de la precipitación de manera cualitativa; cuantitativamente, sin embargo, solo la precipitación en las sub-cuencas del sur del Ecuador es estimada con precisión, especialmente para intensidades bajas (menores a 5 mm/día). A pesar de estos estudios relacionados, no se ha localizado ninguno que evalúe el TRMM 3B43 a nivel de estaciones en las regiones Costa, Sierra y Oriente del Ecuador como se analiza en la presente investigación.



### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. *Descripción de la zona de estudio*

La zona de estudio comprende el territorio ecuatoriano (aproximadamente 81°W, 5°S hasta 75°W, 1.5°N) (Figura 1) que por sus características orográficas está dividido en región Costa, Sierra y Oriente.

El clima del Ecuador varía por algunos factores, entre los más importantes están: el gradiente altitudinal ocasionado por la cordillera de Los Andes, las corrientes oceánicas y el fenómeno de El Niño y La Niña que afectan principalmente a la región costanera. Según las observaciones realizadas por el INAMHI, en condiciones normales, el régimen de precipitación de la región Costa comienza con un periodo lluvioso desde diciembre hasta mayo; siendo, por lo general marzo, el mes de mayor precipitación. La época seca se considera a los meses de mayo a septiembre. Se clasifica a este régimen de precipitación como unimodal pues sólo presenta un pico al año. La precipitación incrementa de oeste a este con valores anuales entre 250 y 3000 mm (Figura 1). La región Sierra presenta un periodo lluvioso de octubre a mayo, con dos valores de altas precipitaciones en marzo o abril y después en octubre o noviembre. El periodo seco se manifiesta entre junio y septiembre. Este régimen de precipitación se caracteriza como bimodal por sus dos picos de precipitación en el año. La precipitación anual varía entre 700 y 1500 mm. La red de pluviómetros del INAMHI en la región Oriente es menos densa que en las demás regiones. Sin embargo, en las estaciones existentes se registra generalmente un periodo lluvioso entre abril y junio. Además, algunas estaciones poseen régimen bimodal con un segundo pico, menor al mencionado, entre octubre y diciembre. La Figura 1 muestra un mapa de isoyetas media anual entre 1981 y 2010 (INAMHI, 2013).

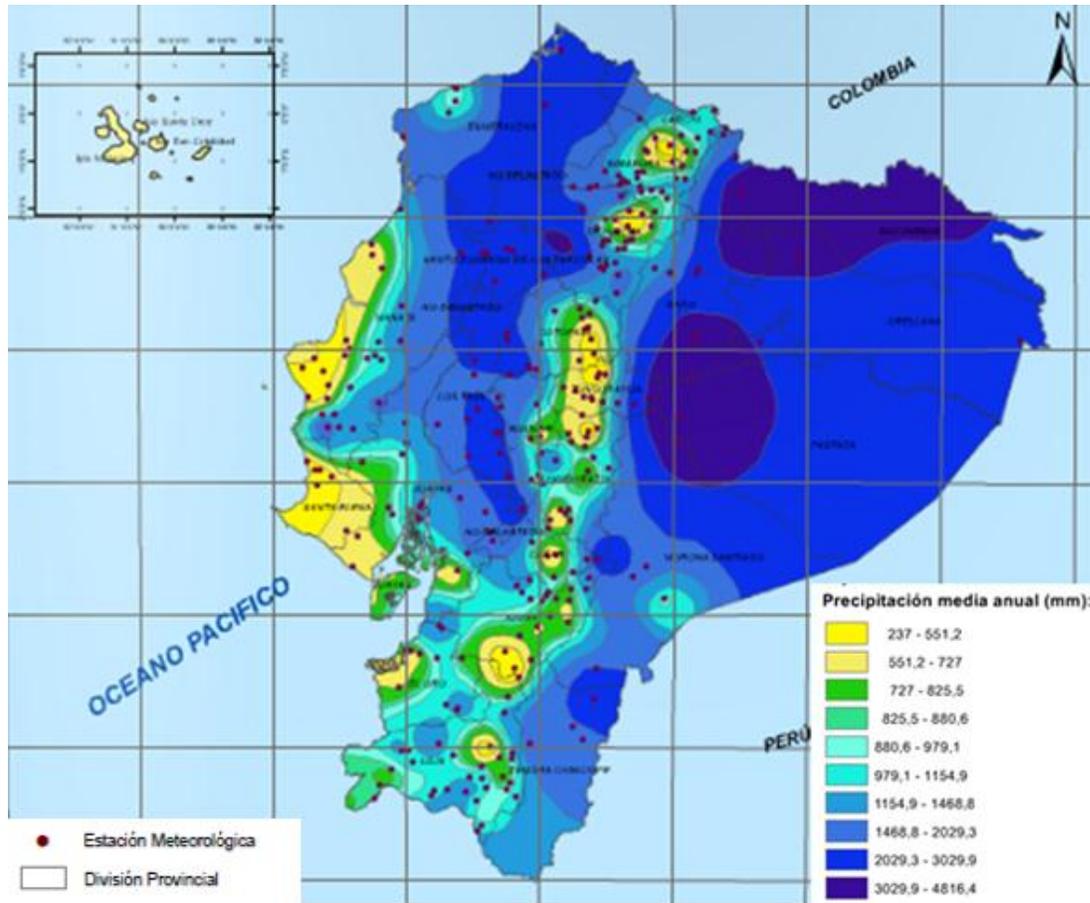


Figura 1. Mapa de precipitación media multianual (1981-2010) (INAMHI, 2013).

Además de la estacionalidad mencionada, la distribución de precipitación es afectada por la Zona de Convergencia Intertropical (conocida como ITCZ por sus siglas en inglés de: “*Inter-Tropical Convergence Zone*”) y por la variación de la temperatura en la superficie del océano (SST por sus siglas en inglés de: “*Sea Surface Temperature*”). Las masas de aire que crean estas corrientes definen la época lluviosa y seca en zonas costaneras. Sin embargo, la mayor influencia en el clima de la zona de estudio está dada por el fenómeno conocido mundialmente como ENSO (por sus siglas en inglés de: “*El Niño Southern Oscillation*”) y se refiere al calentamiento a gran escala de la superficie del agua en el Océano Pacífico que ocurre en promedio cada 3 a 6 años y que dura entre 9 a 12 meses. Este fenómeno afecta drásticamente el clima a nivel mundial; su fase caliente es conocida como El Niño y su fase fría como La Niña. Los años registrados de



mayor influencia de El Niño en la zona de estudio fueron: 1972-1973, 1976-1978, 1982-1983, 1986-1988, 1991-1992, 1994-1995, 1997-1998 y 2002-2003; mientras que La Niña causó anomalías en: 1970-1971, 1973-1974, 1975-1976, 1988-1989, and 1998-1999 (SENAMHI, 2014). La influencia de El Niño en la zona puede llegar a regiones tan altas como 2700 msnm ocasionando una distribución de precipitación muy compleja (Pineda *et al.*, 2013).

### ***3.2. Descripción de los datos de precipitación in-situ***

Los datos de precipitación de estaciones meteorológicas del INAMHI están disponibles en su página web <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/>. Los registros de datos mensuales constan desde 1990 hasta el año 2010; sin embargo, el presente estudio se extiende desde 1998 hasta el 2010 por la concordancia con las imágenes disponibles de TRMM 3B43. Las estaciones están ubicadas en las 4 regiones del Ecuador: Costa, Sierra, Oriente e Islas Galápagos (Figura 2).

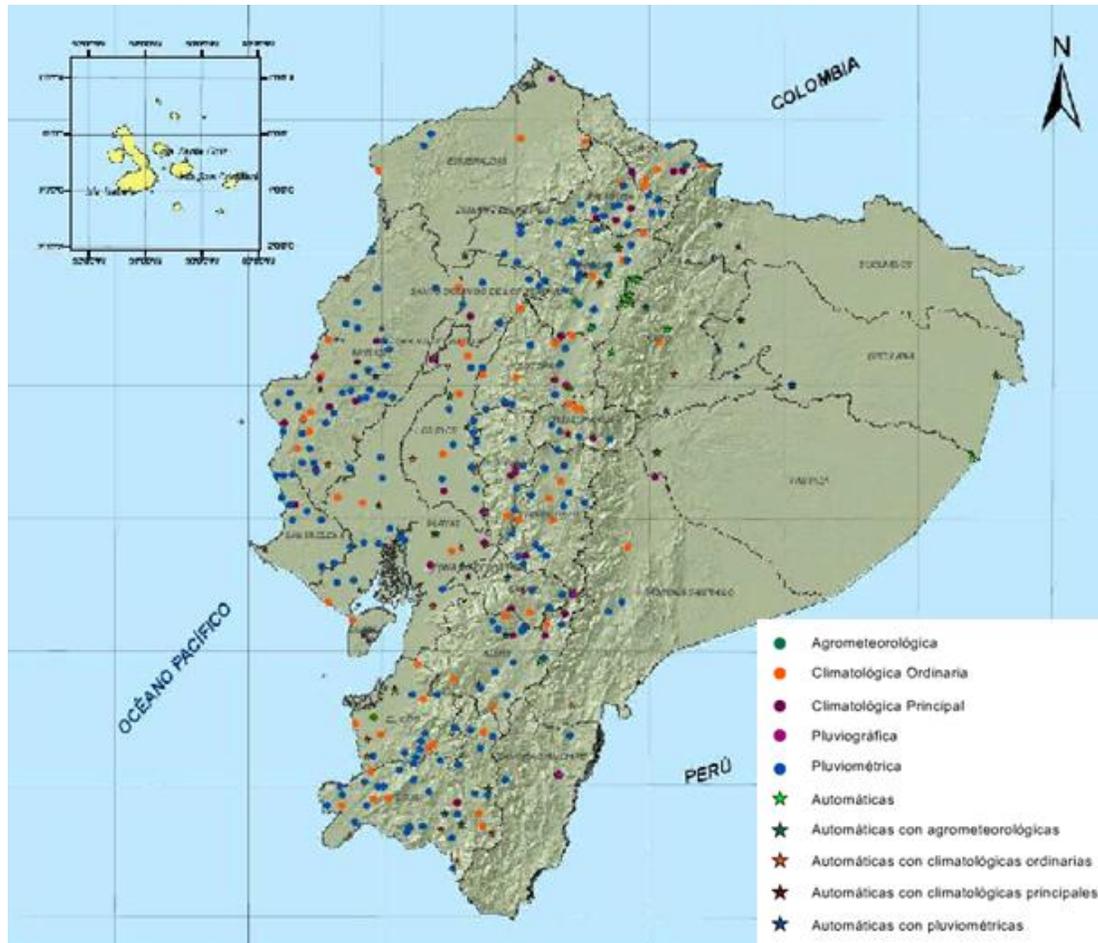


Figura 2. Red meteorológica del INAMHI (INAMHI, 2013).

En este estudio, se escogieron catorce estaciones del INAMHI en las regiones Costa, Sierra y Oriente para evaluar el producto satelital TRMM 3B43. Para la selección de las estaciones se tomaron 4 por región (excepto en la Sierra donde se tomaron 6 estaciones) considerando que se dispongan de datos en el periodo de análisis y que muestren la variabilidad espacial de la precipitación. En el caso de las estaciones de la Sierra escogidas tienen un régimen de precipitación unimodal, por lo que se añadieron dos estaciones con régimen bimodal para mayor representatividad del estudio. Si bien esta selección no responde a un muestreo aleatorio ni representativo, se considera un número reducido de estaciones (14 en total) para poder centrar la atención en las medidas de evaluación, esperándose que en futuras investigaciones se utilicen los resultados



de esta tesis y se extienda la evaluación a otras estaciones y/o zonas. Los datos de ubicación de las estaciones se muestran en la Tabla 1 y se ilustran en la Figura 3. La altura de las estaciones es menor a 160 msnm en la región Costa, entre 250 y 900 msnm en las estaciones del Oriente y entre 1400 y 3300 msnm en la región Sierra. El amplio rango de altura y la ubicación longitudinal y latitudinal enriquece el estudio al incluir diversidad en la cantidad y estacionalidad de la precipitación.

Tabla 1. Datos de ubicación de las estaciones utilizadas para la evaluación.

<b>Código</b>	<b>Región</b>	<b>Nombre</b>	<b>Altura (msnm)</b>	<b>Longitud (°Oeste)</b>	<b>Latitud (° Sur)</b>	<b>% vacíos</b>
M162	Costa	Chone-U.Catolica	36	80.036	0.664	2.6
M465		Ventanas	52	79.466	1.444	0.0
M037		Milagro	13	79.600	2.134	0.0
M171		Camposano 2	156	80.401	1.593	1.9
M033	Sierra	La Argelia - Loja	2160	79.201	4.034	18.6
M438		Jimbura	2100	79.465	4.628	16.0
M403		Alausí	2267	78.846	2.199	0.6
M123		El Corazón	1471	79.076	1.134	1.9
M141		El Labrado	3260	79.008	2.733	4.5
M024		Innaquito	2812	78.483	0.167	1.9
M007	Oriente	Nuevo Rocafuerte	265	75.417	0.917	0.0
M008		Puyo	960	77.944	1.508	1.3
M041		Sangay	880	77.959	1.688	7.7
M189		Gualaquiza	750	78.576	3.398	1.9

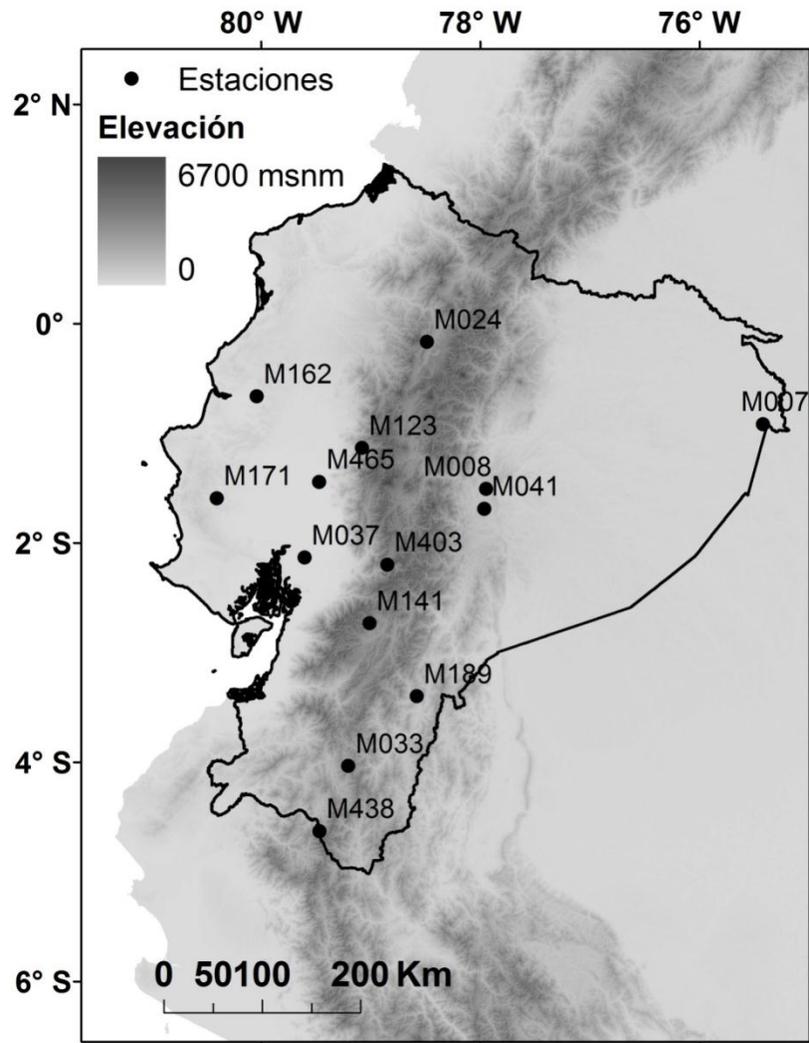


Figura 3. Zona de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas seleccionadas.

### 3.2.1. Pre-procesamiento de datos

La calidad de datos de precipitación en campo determina la confiabilidad de la evaluación del producto satelital. Por ello es importante tener una base de datos robusta con la cual comparar las estimaciones del satélite de manera que el estudio sea relevante. En la toma de datos en campo se presentan situaciones como cambios en los instrumentos de medición, del observador, de la localización de la estación, de los procedimientos de observación, del medio ambiente



alrededor de la estación, etc. Es por esto que es importante determinar la proporcionalidad y homogeneidad de la información. Esta revisión fue realizada anteriormente en Ochoa *et al.*(2014) para la Costa y Sierra de las estaciones del INAMHI por lo que los resultados de dicho estudio fueron tomados en cuenta a la hora de escoger las estaciones pluviométricas.

Primero, se consideró el porcentaje de vacíos de las estaciones para el periodo de estudio. El mismo debe tener un valor máximo de 20% para considerar la base de datos como aceptable. Segundo, la proporcionalidad fue comprobada con curvas de doble masa, las cuales grafican precipitación acumulada de dos estaciones cercanas y cuyo resultado debe ser una línea recta. Por último, la homogeneidad se comprobó con el test RHtestV4 disponible en el software R que detecta cambios en la media en una estación a lo largo del tiempo (Wang and Feng, 2004). El análisis de calidad de datos se realiza para las estaciones del Oriente, ya que los datos pre-procesados de las estaciones de la Costa y Oriente se tomaron de un estudio previo (Ochoa *et al.*, 2014).

### ***3.3. Descripción de imágenes satelitales de precipitación TRMM 3B43***

La misión TRMM (por sus siglas en inglés de: “*Tropical Rainfall Measurement Mission*”) fue creada en noviembre de 1997 para cubrir los trópicos (Simpson *et al.*, 1988). Existen diferentes algoritmos que usan las imágenes provenientes de TRMM y uno de ellos es el TRMM 3B43 versión 7 que combina los resultados de varios sensores. El algoritmo 3B43 se ejecuta una vez al mes produciendo la mejor estimación de intensidad de precipitación con el menor error mínimo cuadrático. Primero, las estimaciones de precipitación de sensores infrarrojos de alta calidad con resolución de 3 horas son acumuladas mensualmente y luego se combinan con los datos de estaciones pluviométricas para un ajuste por sesgo a gran escala. Esta combinación con los datos pluviométricos se realiza con el método de “*inverse error variance weighting*” (Huffman *et al.*, 2007). Este algoritmo es ejecutado de forma parecida al que se desarrolló para el Proyecto de



Climatología para Precipitación Global mensual a partir de productos satelital-pluviométrico (Adler *et al.*, 2003; Huffman *et al.*, 1997). La resolución temporal del TRMM 3B43 es mensual y la resolución espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (~ 27x27km) y cubre un cinturón global desde los  $50^\circ$  Latitud-Sur a los  $50^\circ$  Latitud-Norte. Más información está disponible en NASA (2014a).

Las estimaciones de precipitación mensual del algoritmo TRMM 3B43 se encuentran disponibles para su descarga de manera gratuita (NASA, 2014b). Dado que los datos descargados son mapas de formato ncd (nc) con información espacial por grillas, el software R fue utilizado para intersectarlas estaciones, encontrando las estimaciones de precipitación mensual del satélite en la grilla correspondiente a cada estación. Los paquetes R utilizados son: sp, gstat, raster, rgeos y ncd. El script programado para los cálculos se presenta en el Anexo 1 con comentarios en cada línea de programación.

### **3.4. Medidas de evaluación**

El método de evaluación de imágenes de satélites se obtuvo de trabajos relacionados (Feidas, 2009; Ochoa *et al.*, 2014; Scheel *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2008) y consta de la precipitación media mensual multianual, errores estadísticos e índices de detección. Se realiza una evaluación puntual; es decir, las series de datos de precipitación estimada por los pluviómetros en cada estación se comparan con las estimaciones del satélite en las grillas correspondientes a las estaciones.

#### **3.4.1. Precipitación media mensual multianual (PMMM)**

Mediante el software Microsoft Excel® se realizó el cálculo de la precipitación media mensual entre los años 1998 – 2010a partir de las estimaciones del satélite y de los pluviómetros. Al comparar ambos, se puede saber si el satélite es capaz de representar la estacionalidad en las tres regiones del Ecuador.



### 3.4.2. Errores estadísticos

Las medidas de sesgo, raíz del error medio cuadrado y coeficiente de correlación de Pearson son utilizadas para comparar las estimaciones satelitales con las de los pluviómetros.

- Sesgo: Evalúa la diferencia promedio entre la precipitación estimada por el producto satelital ( $P_s$ ) y la estimada por los pluviómetros ( $P_p$ ), siendo  $n$  el número de estaciones:

$$Sesgo = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{s_{xi}} - P_{p_{xi}})$$

- Raíz del error medio al cuadrado: RMSE (por sus siglas en inglés “*root mean square error*”) evalúa el error de las estimaciones del satélite en comparación con las de los pluviómetros con un énfasis en valores extremos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{s_{xi}} - P_{p_{xi}})^2}$$

- Coeficiente de correlación de Pearson ( $\gamma$ ): Mide el nivel de concordancia lineal entre las estimaciones del satélite y los pluviómetros (la magnitud del error no se mide).

$$\gamma = \frac{cov(P_s, P_p)}{\sqrt{var(P_s)} \times \sqrt{var(P_p)}}$$

El cálculo de errores estadísticos fue realizado con el software R a través del paquete hydro GEOF. En el Anexo 2 se presenta el algoritmo usado con comentarios en cada línea de programación.



### 3.4.3. Índices de detección

La precisión del satélite fue analizada utilizando los índices POD, ETS, FAR y FBI: (Schaefer, 1990; Su *et al.*, 2008). Estos índices se calculan considerando que las estimaciones del TRMM 3B43 y los pluviómetros concuerden. Las posibilidades son:

- a) El satélite detecta precipitación y el pluviómetro también.
- b) El satélite detecta precipitación pero el pluviómetro no.
- c) El satélite no detecta la precipitación pero el pluviómetro sí.
- d) El satélite no detecta la precipitación y el pluviómetro tampoco.

Entonces,

- Probabilidad de detección: POD (por sus siglas en inglés “*probability of detection*”) es la fracción de precipitación que fue correctamente detectada:

$$POD = \frac{a}{a + c}$$

Una detección perfecta del satélite da un resultado de POD de 1.

- Probabilidad de detección corregido: ETS (por sus siglas en inglés “*equitable threat score*”) es la fracción de precipitación que fue correctamente detectada, ajustada por el número de detecciones ( $He$ ) que se espera que ocurrieron sólo por azar:

$$ETS = \frac{a - He}{a + b + c - He}$$

$$He = \frac{(a + c) \times (a + b)}{N}$$

$N$  es el número total de valores estimados. Una detección perfecta del satélite da un resultado de ETS de 1.



- Falsa alarma: FAR (por sus siglas en inglés “*false alarmrate*”) mide la fracción de detección de precipitación que en realidad fueron falsa alarma; es decir, que detectó el satélite pero no los pluviómetros.

$$FAR = \frac{b}{a + b}$$

El índice varía entre 0 y 1, donde el valor de 0 es perfecto pues indica que el satélite no emitió falsas alarmas.

- Frecuencia de sesgo: FBI (por sus siglas en inglés “*frequencybiasindex*”) es la proporción del número de eventos de precipitación detectados por el satélite respecto al número de eventos detectados por los pluviómetros.

$$FBI = \frac{a + b}{a + c}$$

Si el índice es menor a 1 significa que el satélite está subestimando la precipitación; mientras que un índice mayor a 1 indica sobrestimación. Entonces, su rango es de 0 a infinito, con un valor perfecto de 1.



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. *Pre-procesamiento de datos*

Se analizó la calidad de datos de las 14 estaciones. El análisis de porcentaje de datos vacíos se muestra en la Tabla 1. La mayoría de estaciones tienen datos faltantes menores al 3%; sólo tres estaciones tienen vacíos de 7, 16 y 18.6% pero se consideran aceptables.

En las estaciones de la Costa y Sierra se utilizaron datos pre-procesados a partir de un estudio previo (Ochoa *et al.*, 2014), que ya fueron analizados y cuyas series son homogéneas. En el Oriente, no se encontraron muchas estaciones con datos en el periodo 1998 – 2008; por lo que no fue posible utilizar curvas de masa para analizar la proporcionalidad en todas las estaciones. Sólo las estaciones M008 y M041 son cercanas y su curva de masa se muestra en la Figura 6. Se mantiene una línea recta, lo que indica que existe proporcionalidad en ambas estaciones. Los pocos espacios en los que hay cambio de pendiente se deben a vacíos en los datos de una de las dos estaciones.

La Figura 5 muestra la homogeneidad de las estaciones del Oriente con el test de homogeneidad RHtestV4 en el programa R. Cuando la línea roja, que representa la tendencia de la media, tiene una pendiente constante significa que la serie de tiempo es homogénea. Se puede ver que en todas las estaciones se mantiene la pendiente. En algunas estaciones la línea luce entrecortada, esto se debe a los datos faltantes. Se puede observar que las 4 estaciones del Oriente poseen datos mensuales homogéneos.

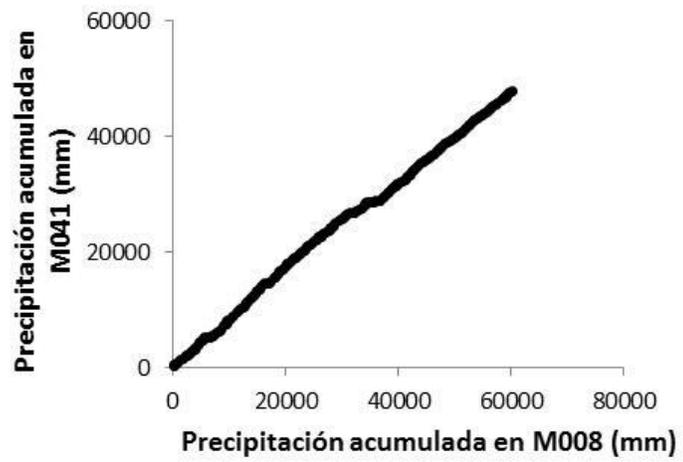
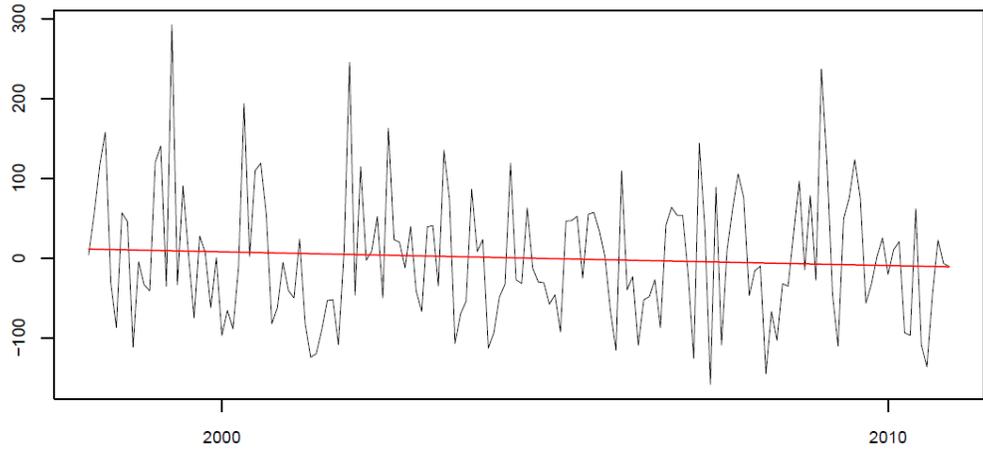
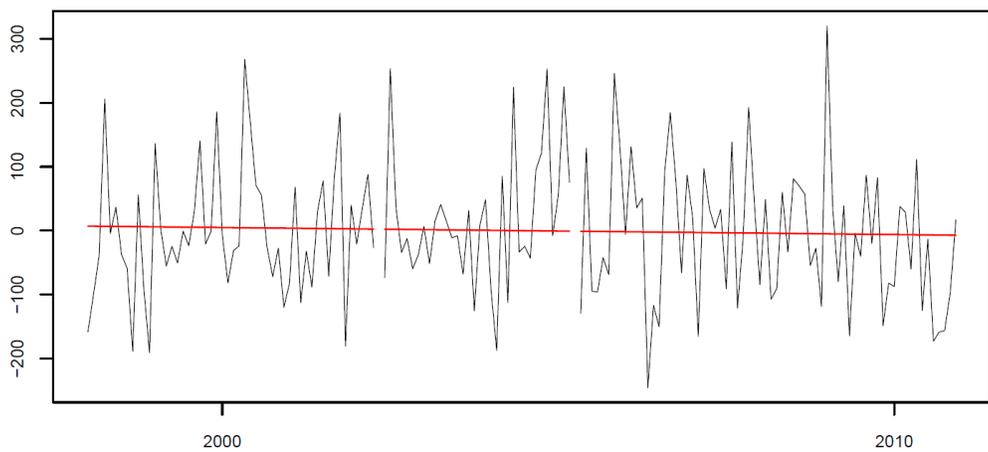


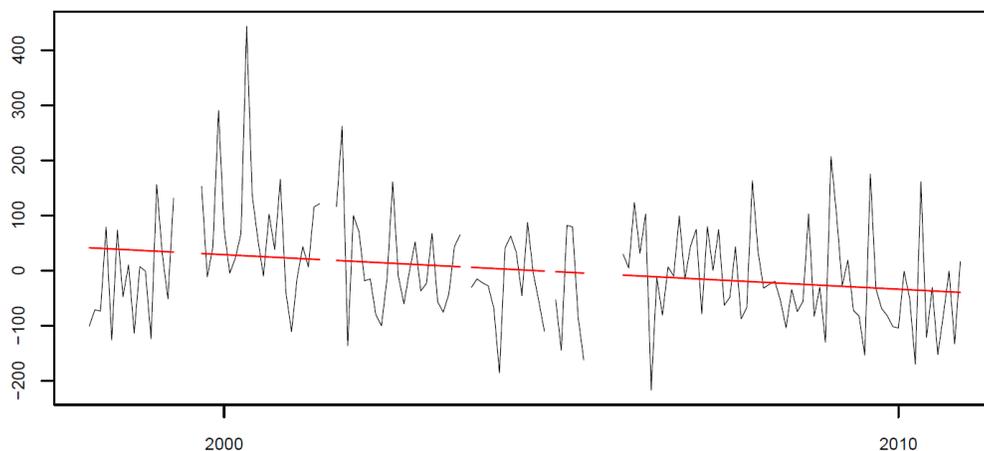
Figura 4. Curva de doble masa para las estaciones M008 y M041.



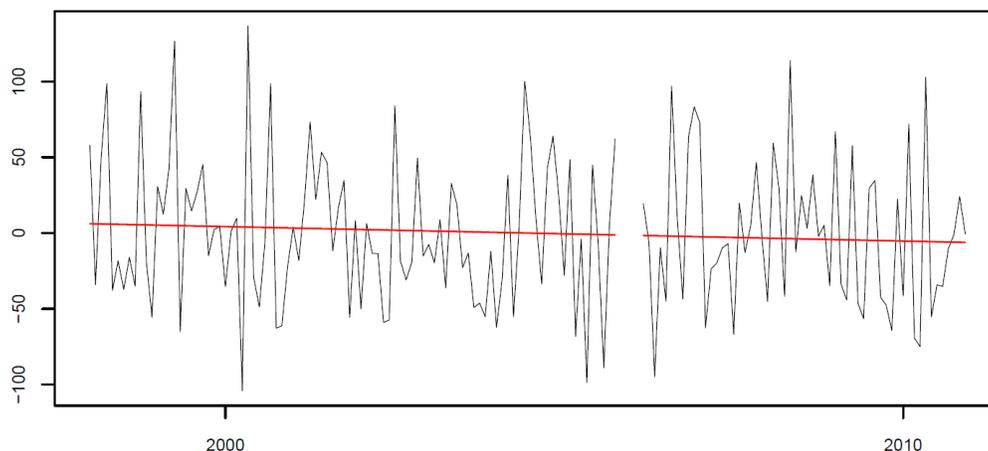
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5. Resultados del test de homogeneidad con el algoritmo RHtestV4 para las estaciones M007(a), M008 (b), M041(c) y M189 (d).

#### **4.2. Precipitación media mensual multianual**

Los valores mensuales de precipitación fueron promediados entre 1998 y el 2010 con el fin de representar la estacionalidad de esta variable en cada región(Figura 6). Se puede apreciar un régimen unimodal de precipitación en las estaciones de la Costa y Sierra, y en el Oriente un régimen bimodal. Si bien el INAMHI reporta régimen bimodal en la Sierra, sólo dos de las estaciones tomadas en cuenta para esta región poseen ese comportamiento.



Al comparar las estimaciones de precipitación realizadas por los pluviómetros (líneas continuas) con las del producto satelital (líneas de trazos)(Figura 6), se puede observar en primer lugar que la estacionalidad está representada cualitativamente de forma adecuada. Es decir, si bien los valores de precipitación reportados por el satélite no son exactos, la forma de los gráficos es adecuada. Esto sucede especialmente en la Sierra y en el Oriente, pues en la Costa los valores estimados por el TRMM 3B43 presentan un desplazamiento en el pico de precipitación anual de un mes hacia la derecha. En la región Sierra, el régimen unimodal está representado cualitativamente por el satélite, pero el régimen bimodal detectado por el pluviómetro en la estación M141 aparece como unimodal según el satélite (Figura 6 b2). En la mayoría de estaciones, el producto TRMM 3B43 subestima la precipitación. Se puede observar que sólo en algunas estaciones de la Sierra (Figura 6 b1 y b2: M033, M403, M024 y M141) el producto sobrestima los valores, así como en algunos meses de tres de las estaciones ubicadas en el Oriente (Figura 6: M007, M041, M189). Entonces, cuantitativamente, la mayoría de estaciones no son representadas correctamente por el producto satelital; aunque cabe mencionar a las estaciones M007 y M189 de la región Oriente presentan un error menor a las demás.

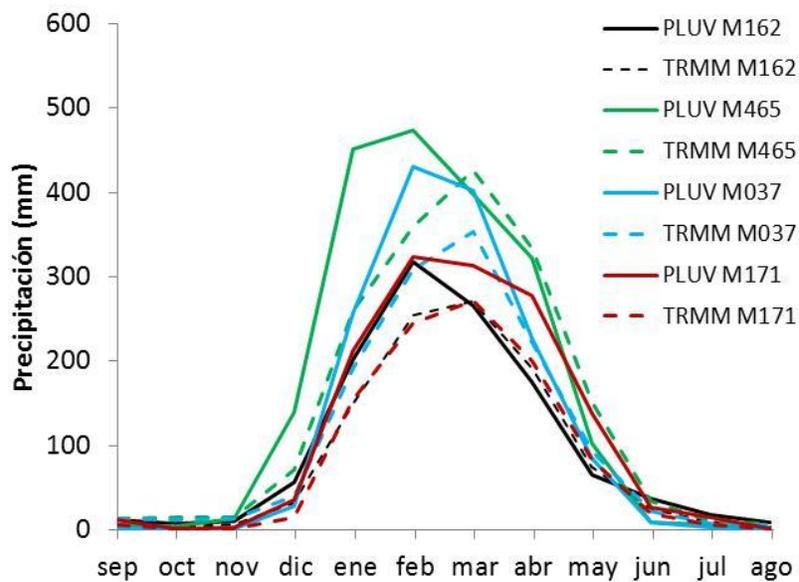
Es importante destacar que uno de los principales inconvenientes al utilizar un producto satelital es que los valores reportados para cada grilla tienen una resolución espacial determinada que limita la estimación correcta de la variable climatológica. Un ejemplo claro se da en las estaciones M008 y M041 que por estar cercanas (Figura 3), el producto reporta los mismos valores, mientras que los pluviómetros detectan diferencias en su estacionalidad. Entonces, cuantitativa y cualitativamente el producto da similares resultados, mientras que el pluviómetro muestra la variabilidad espacial (Figura 6: M008 y M041).

En general, los resultados encontrados en este apartado concuerdan parcialmente con Ochoa *et al.*(2014) y Ward *et al.*(2011) cuando se afirma que cualitativamente el producto logra representar adecuadamente la precipitación, aunque cuantitativamente no es acertado. Sin embargo, la comparación no puede hacerse

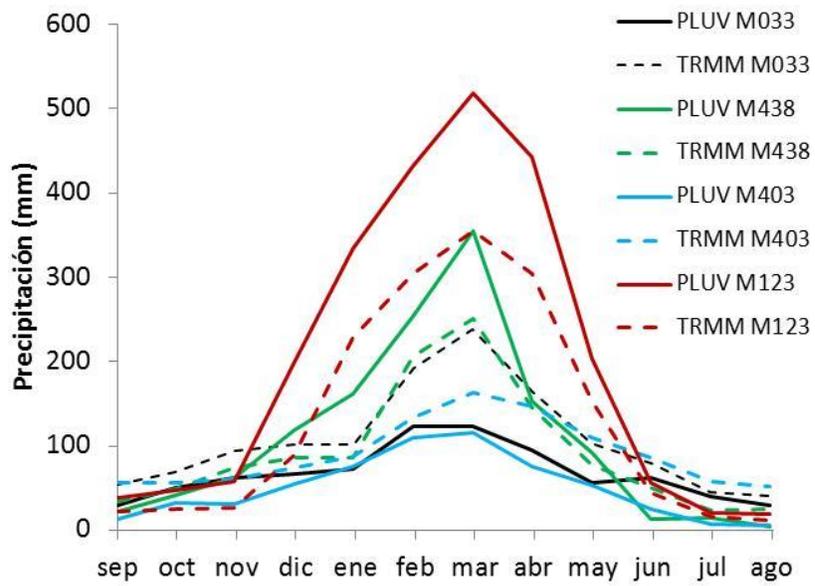


de manera directa porque en este estudio se analizan series temporales de las estaciones con los valores del TRMM a escala puntual y en los estudios citados, se hacen agregaciones por cuencas hidrográficas.

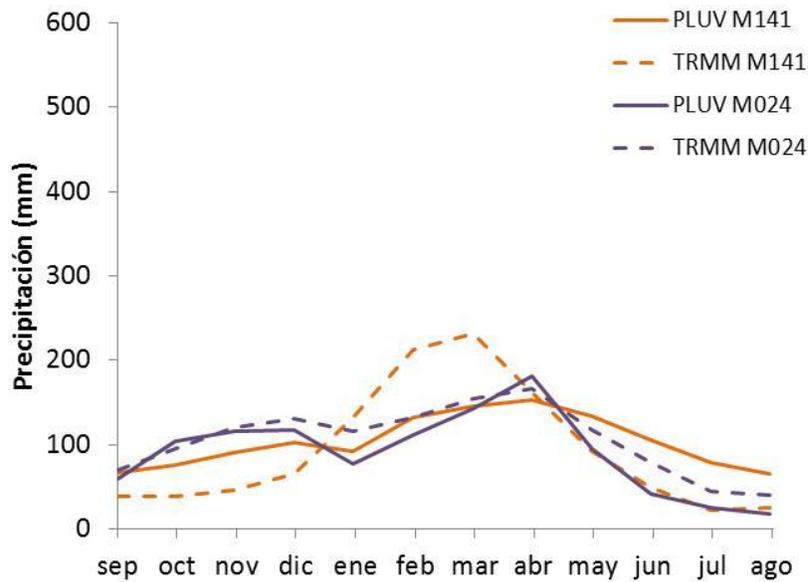
Según la literatura, los productos TRMM en general han demostrado tener un comportamiento razonable a escalas mensuales. Sin embargo, es común que las intensidades altas de precipitación sean subestimadas y las bajas intensidades sobrestimadas (Habib et al., 2009). Estos errores en la estimación de los productos satelitales se deben a que los algoritmos como el TRMM 3B43 usan imágenes infrarrojas que pueden subestimar la precipitación de nubes bajas así como crear falsas alarmas por nubes altas pero relativamente ligeras que se encuentran a temperaturas bajas (Behrangi et al., 2010). Por ejemplo, la precipitación directa cálida está asociada a temperaturas provenientes de la parte alta de las nubes y no así la precipitación convectiva (Petty, 1995). Por tanto, la estimación de la precipitación de la parte alta de las nubes es afectada por el tipo de precipitación (Hanna et al., 2008).



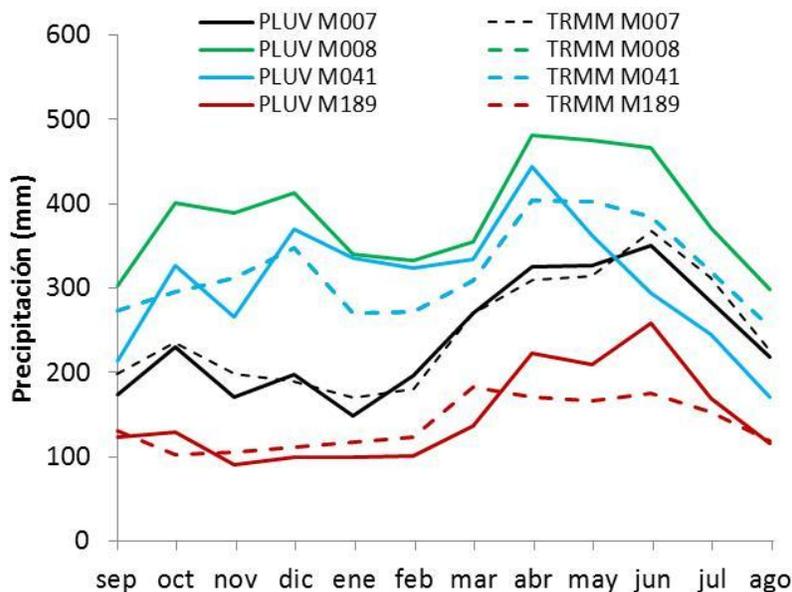
(a)



(b1)



(b2)



(c)

Figura 6. Precipitación media mensual multianual para estimaciones de pluviómetros y TRMM 3B43 en las estaciones de la Costa (a), Sierra con régimen unimodal (b1), bimodal (b2) y Oriente (c).

{Los resultados TRMM M008 y TRMM M041 están superpuestos por localizarse en la misma celda}

### 4.3. Errores estadísticos

El sesgo, raíz del error medio cuadrado (RMSE) y coeficiente de correlación de Pearson ( $\gamma$ ) dan una idea de la precisión del producto satelital en forma cuantitativa. La Figura 7 muestra los resultados de los cálculos de estos errores y la Tabla 2 el promedio para cada región y para el Ecuador.

En general, se aprecia un sesgo bastante elevado de 28 mm en promedio para la región Sierra y una estación en el Oriente (70.85 mm); mientras que los menores valores se dan en la Costa (19 mm en promedio) y en las otras estaciones del Oriente (10 mm en promedio, sin incluir la estación M008). Se puede decir que las estaciones ubicadas a gran altura (Tabla 1: estaciones en el rango 960 a 2267 msnm) son las que mayor sesgo presentan, excepto las estaciones de régimen bimodal que a pesar de estar en la zona más elevada (Tabla 1: estaciones a 2812



y 3260 msnm), el sesgo es el menor de la región. En promedio, el sesgo para el Ecuador es de 24 mm (Tabla 2).

El error calculado como RMSE presenta un mínimo de 33 mm (estación bimodal de la Sierra M024) y un máximo de 167 mm (estación de la Costa M465); también hay errores relativamente altos en dos estaciones de la Sierra (M438 y M123). El promedio de error en las demás estaciones del país es de 64mm. Se debe destacar aquí, que si bien el sesgo no parecía muy elevado en la estación de la Costa M465, se puede observar con el RMSE (167 mm) que la estimación del satélite no es correcta. Esto ocurre por dos razones complementarias que se observan con ayuda de la Figura 6: (1) el RMSE da un énfasis especial a errores en valores extremos ya que eleva el sesgo al cuadrado y esta estación tiene valores altos de precipitación mensual; y (2) la sobrestimación entre noviembre y febrero es alta pero a partir de marzo disminuye notablemente, entonces el sesgo promedio de todo el año se reduce. Esto último no ocurre con la estación M123, cuyos valores de sesgo y RMSE concuerdan porque la sobrestimación es continua en todos los meses (Figura 6). En promedio, el RMSE es menor en el Oriente, aunque la diferencia con las otras regiones no es grande. En el Ecuador, el promedio es de 78 mm (Tabla 2).

En cuanto a la correlación, el coeficiente de Pearson ( $\gamma$ ) en la Figura 7c muestra valores mínimos de 0.6 en tres estaciones (Sierra: M403 y M141 y Oriente: M189), valores medios entre 0.7 y 0.85 (Costa: M465; Sierra: M033, M438, M123y Oriente: M041) y valores altos de 0.9 a 0.96 (Costa: M162, M037, M171; Sierra: M024 y Oriente: M007 y M008). Este coeficiente refleja que las estimaciones mensuales del satélite incrementan con las de los pluviómetros y decrecen con las de los pluviómetros; por eso, representan de forma cuantitativa los resultados de la Figura 6. La interpretación del desempeño del satélite observando el coeficiente de correlación de Pearson, no coincide con los resultados de sesgo y RMSE ya que la correlación no representa la magnitud de los errores. En promedio, la correlación para el Ecuador es de 0.8 (Tabla 2).



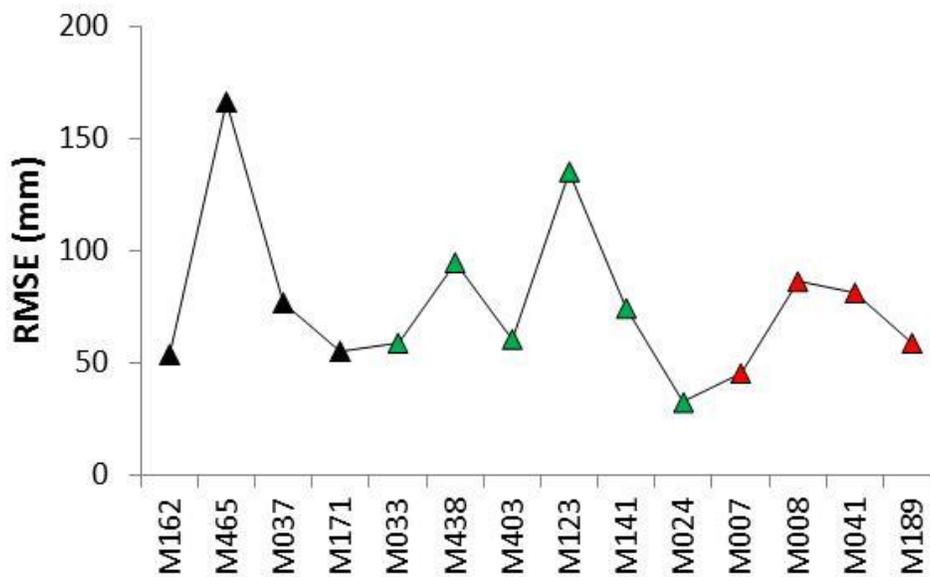
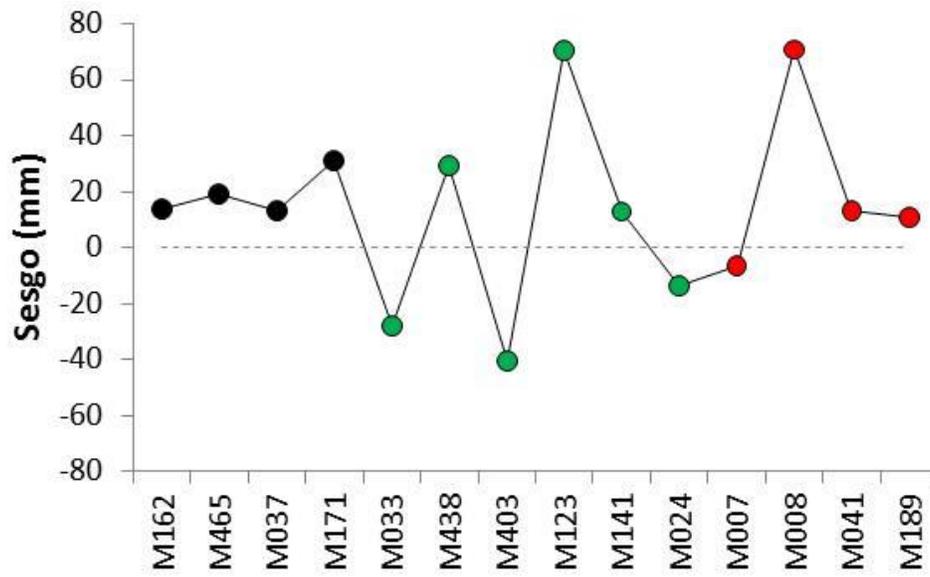
Es importante hacer destacar una particularidad que muestra la importancia de utilizar los valores de sesgo y RMSE complementándolos con los gráficos de precipitación media multianual y los resultados del coeficiente de correlación, y es que por ejemplo: la estación M141 presenta un sesgo bajo, un RMSE medio pero un coeficiente de correlación muy bajo con relación a las demás estaciones (Figura 7); esto se debe a que el régimen bimodal representado por el pluviómetro no es captado por el satélite, donde los resultados proporcionan un régimen unimodal (Figura 6).

En resumen, con los resultados de la Tabla 2, Figura 6 y Figura 7 se observa que el sesgo es menor en la Costa, el RMSE es menor en el Oriente, y las estaciones de la Sierra tienen mayor sesgo y RMSE, excepto la estación bimodal M024. Las estaciones bimodales M007 en el Oriente y M024 en la Sierra tienen los menores errores de entre todas las estaciones. Además, se debe recalcar que existen valores altos de correlación por lo que se define que la estacionalidad está bien representada cualitativamente.

Los resultados presentados en este apartado son mejores a los obtenidos en estudios a escala diaria (Ochoa *et al.*, 2014; Scheel *et al.*, 2011). De hecho, esos estudios muestran que el comportamiento del producto TRMM mejora casi linealmente con la agregación de las series de tiempo; es decir, que es mejor a escala mensual que a diaria, es mejor a escala semanal que a diaria, etc. Aún más importante, el TRMM 3B43 parece comportarse diferente al TRMM 3B42 pues este último sobrestima en todas las estaciones comparadas en Ochoa *et al.* (2014).

Tabla 2. Promedio del sesgo, RMSE y coeficiente de Pearson para las tres regiones y el Ecuador.

	Costa	Sierra	Oriente	Ecuador
Sesgo (mm)	19.43	27.89	25.28	24.20
RMSE (mm)	88.49	76.33	68.27	77.70
Pearson (-)	0.90	0.75	0.78	0.81



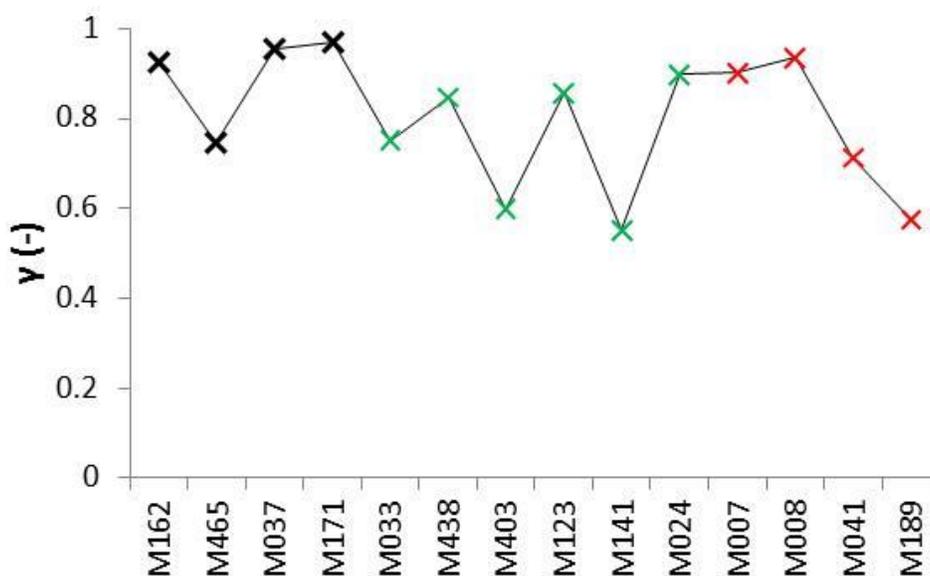


Figura 7. Sesgo, raíz del error medio cuadrado (RMSE) y coeficiente de correlación de Pearson ( $\gamma$ ) para las estaciones de la Costa (negro), Sierra (verde) y Oriente (rojo).

#### 4.4. Índices de detección

Los índices de probabilidad de detección (POD), de probabilidad de detección corregido (ETS), de falsa alarma (FAR) y de sesgo (FBI) fueron calculados para diferentes valores de precipitación (10, 20, 50, 100, 200, 300 y 400 mm) y para cada estación de las tres regiones. Los resultados se muestran en la Figura 8. POD muestra que la tendencia general de detección del satélite disminuye cuando la precipitación mensual aumenta (Figura 8a). En la Costa y Oriente hay una detección mayor a 0.8 para valores de entre 10 y 200 mm (excepto las estaciones M171 y M189 en dos y un casos, respectivamente). En la Sierra se registran valores de POD mayores a 0.8 para precipitación de entre 10 y 100 mm. Es notable que en las estaciones del Oriente, los valores de POD para precipitación entre los 10 y 200 mm son incluso mayores a 0.92. Para valores de precipitación mayor o igual a 300 mm, POD se reduce a un rango entre 0.4 y 0.8 e inclusive hay valores menores a 0.4 en tres estaciones (M438, M123, M189). Si se



obtiene un promedio de los valores del índice, se puede decir que POD es mayor para la región del Oriente, siendo de 0.8 el promedio para el Ecuador (Tabla 3).

Los valores de ETS son menores a los de POD, pues tienen una corrección por detecciones ocurridas puramente al azar. Sin embargo, los resultados no sólo tienen esa particularidad, sino que la tendencia es distinta. En la Costala detección según los ETS es mucho mejor que en otras regiones (Tabla 3). Además, en todas las estaciones la detección del satélite según los valores de ETS tienden a aumentar para precipitación entre 10 y 100 mm, pero a partir de 200 mm decrecen (Figura 8b). En general, hay mayor consistencia de la tendencia y valores de ETS entre estaciones de la Costa que en las demás estaciones. El valor de ETS es de 0.4 en promedio para el Ecuador (Tabla 3).

FAR muestra que, en promedio, en la región del Oriente se detectan menos casos en los que el satélite falló, en comparación con las otras regiones (Tabla 3). Sin embargo, la Figura 8c muestra que en la Costa los valores son menos variables que en el Oriente. La tendencia del satélite en detectar valores falsos es diferente para cada región y en muchos casos diferente según la estación. FAR en la Costa es menor cuando la precipitación es registrada entre 100 y 300 mm, en la Sierra cuando los valores son menores a 50 mm y en el Oriente cuando son menores a 100 mm. En el Oriente y en la mayoría de estaciones de la Sierra, los casos de falsa alarma aumentan cuando la precipitación aumenta. FAR es 0.2 en promedio para el Ecuador (Tabla 3).

En cuanto al sesgo representado por FBI, la tendencia a sobre- o sub-estimar datos no es clara por regiones (Figura 8d). La precipitación es subestimada por el satélite en la mayoría de estaciones. Sin embargo, existe un alta sobrestimación en la Sierra, por lo que el eje y tuvo que ser graficado diferente al de las otras regiones. Es notable que la sobre- y subestimación ocurre especialmente en valores de precipitación elevados, en la mayoría de casos a partir de los 200 mm.



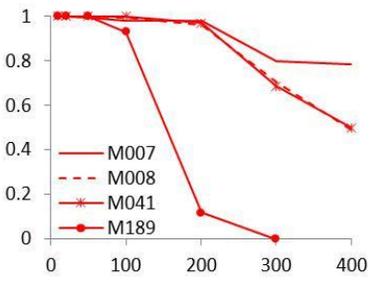
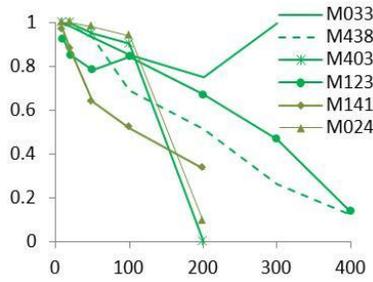
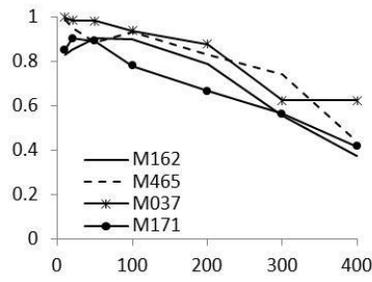
Cuando se obtiene promedios de FBI el índice luce muy bien en la Costa, en el Oriente y en promedio para el Ecuador (Tabla 3); sin embargo si bien estos valores son ideales por ser cercanos a 1, son irreales porque se obtienen al promediar valores sobrestimados altos con varios valores de subestimación de tal manera que el índice es cercano a 1.

Es importante destacar que si bien las estaciones M008 y M041 están muy cercanas y por tanto los resultados del satélite son iguales para las dos estaciones, el índice POD se asemeja cuantitativa y cualitativamente; el índice ETS y FBI se asemeja cualitativamente y el índice FAR no tienen parecido. Complementando esta discusión con la Figura 6, se puede decir que el satélite se desempeña mejor para la estación M008 en cuanto a la correlación, el índice ETS y el índice FAR, mientras que es mejor en la estación M041 cuando se compara el sesgo y por tanto el índice FBI que representa lo mismo. De este modo, el satélite puede representar cualitativamente la precipitación de la estación M008 y aunque el sesgo es menor en la estación M041 el satélite no es un buen indicador de lluvia en esta zona.

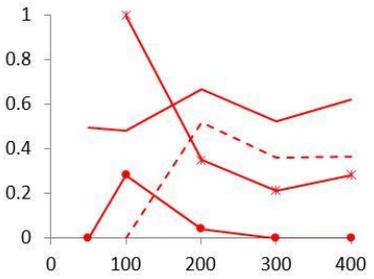
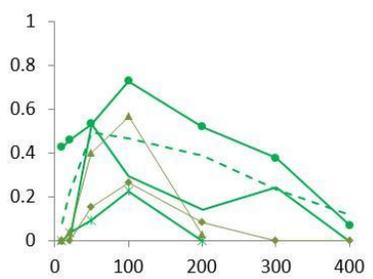
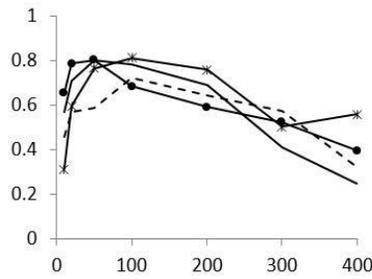
En cuanto a la diferencia en estimación unimodal y bimodal, los índices POD y FAR son mejores para el Oriente (donde las estaciones son bimodales), aunque no se ven claras diferencias entre las estaciones uni- y bimodales en la Sierra.

Tabla 3. Índices promedio para las regiones Costa, Sierra, Oriente y el Ecuador.

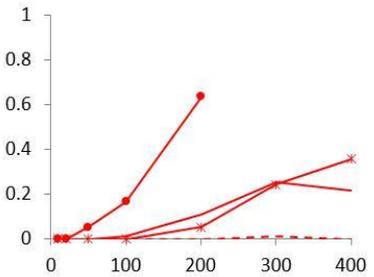
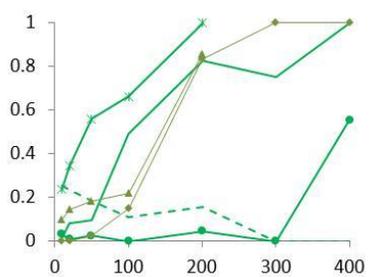
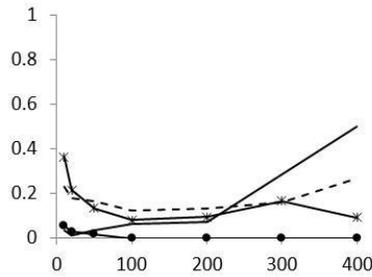
<b>Índice</b>	<b>Costa</b>	<b>Sierra</b>	<b>Oriente</b>	<b>Ecuador</b>
<b>POD</b>	0.79	0.75	0.84	0.79
<b>ETS</b>	0.60	0.21	0.36	0.39
<b>FAR</b>	0.13	0.33	0.09	0.18
<b>FBI</b>	0.91	1.26	0.90	1.03



POD(a)



ETS(b)



FAR(c)

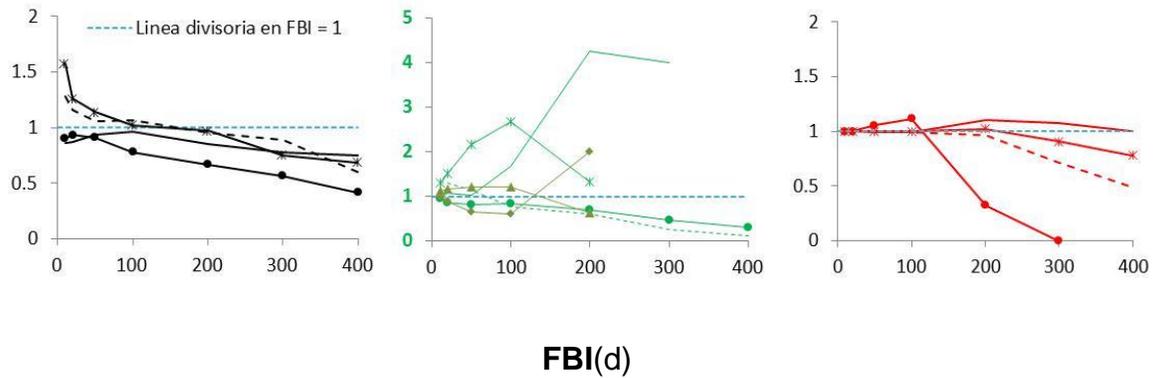


Figura 8. Índices POD (a), ETS (b), FAR (c) y FBI (d) para 10, 20, 50, 100, 200, 300 y 400 mm de precipitación para las estaciones de la Costa (negro), Sierra (verde) y Oriente (rojo).

*{El rango del eje y de las estaciones de la Sierra para el índice FBI (d) es diferente a los demás}*



## 5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se utilizaron catorce series mensuales de precipitación del INAMHI localizadas en la región Costa (4), Sierra (6) y Oriente (4) con el fin de buscar representatividad, abarcando un amplio rango de altura y territorio. La calidad de datos de las series de tiempo fue comprobada por proporcionalidad (comparación con estaciones cercanas) y homogeneidad (tendencia constante de la media en cada estación); además se verificó que las estaciones tuvieran un porcentaje de vacíos menor al 20%. Se obtuvieron las estimaciones de precipitación de las grillas del algoritmo TRMM 3B43 en las que se localizan las estaciones. Se utilizaron gráficos de precipitación media mensual multianual, se calcularon errores estadísticos (sesgo, RMSE y coeficiente de correlación de Pearson) y también índices de detección (POD, ETS, FAR y FBI) para la evaluación del satélite.

Se encontró que la estacionalidad de la precipitación está representada adecuadamente por el producto satelital en forma cualitativa en todo el Ecuador. Cuantitativamente, los valores del algoritmo TRMM 3B43 son más acertados en las regiones Costa y Oriente que en la región andina. También se pudo observar que los índices de detección tienen una tendencia constante en todo el estudio con mejores resultados del producto satelital para intensidades bajas de precipitación.

La metodología utilizada se recomienda para estudios posteriores, pues se demostró que los gráficos realizados se complementan para una interpretación adecuada de los resultados. Adicionalmente, la evaluación de la última versión de un algoritmo usado ampliamente en el mundo y los resultados consistentes en una región compleja, proveen conclusiones que pueden ser utilizadas posteriormente en estudios más detallados. Además, aunque en este trabajo se utilizaron diferentes comportamientos estacionales de precipitación, como los regímenes uni- y bimodal, estudios posteriores pueden abarcar el uso de más estaciones e incluso se pueden realizar análisis espaciales para evaluación del satélite.



Finalmente, se recomienda, por ejemplo, la calibración y corrección por sesgo de las estimaciones de precipitación del algoritmo TRMM 3B43 utilizando los resultados de este estudio.



## 6. REFERENCIAS

Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P.-P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J., Arkin, P. and Nelkin, E.: The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present), *J. Hydrometeorol.*, 4(6), 1147–1167, doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2, 2003.

Behrangi, A., Hsu, K., Imam, B. and Sorooshian, S.: Daytime Precipitation Estimation Using Bispectral Cloud Classification System, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 49(5), 1015–1031, doi:10.1175/2009JAMC2291.1, 2010.

Ceccato, P. N. and Dinku, T.: Introduction to Remote Sensing for Monitoring Rainfall, Temperature, Vegetation and Water Bodies, [online] Available from: <http://academiccommons.columbia.edu/catalog/ac:126407> (Accessed 14 July 2014), 2010.

Feidas, H.: Validation of satellite rainfall products over Greece, *Theor. Appl. Climatol.*, 99(1-2), 193–216, doi:10.1007/s00704-009-0135-8, 2009.

Fleming, K. and Awange, J.: Evaluating the TRMM 3B43 monthly precipitation product using gridded raingauge data over Australia, *Aust. ...* [online] Available from: <http://www.cage.curtin.edu.au/~will/australia-trmm-bom-rev-20111005.pdf> (Accessed 18 September 2014), 2011.

Habib, E., Henschke, A. and Adler, R. F.: Evaluation of TMPA satellite-based research and real-time rainfall estimates during six tropical-related heavy rainfall events over Louisiana, USA, *Atmos. Res.*, 94(3), 373–388, doi:10.1016/j.atmosres.2009.06.015, 2009.

Haile, A. T., Habib, E., Elsaadani, M. and Rientjes, T.: Inter-comparison of satellite rainfall products for representing rainfall diurnal cycle over the Nile basin, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 21, 230–240, doi:10.1016/j.jag.2012.08.012, 2013.

Hanna, J. W., Schultz, D. M. and Irving, A. R.: Cloud-Top Temperatures for Precipitating Winter Clouds, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 47(1), 351–359, doi:10.1175/2007JAMC1549.1, 2008.

Huffman, G. J., Adler, R. F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B. and Schneider, U.: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 78(1), 5–20, doi:10.1175/1520-0477(1997)078<0005:TGPCPG>2.0.CO;2, 1997.



Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., Gu, G., Nelkin, E. J., Bowman, K. P., Hong, Y., Stocker, E. F. and Wolff, D. B.: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales, *J. Hydrometeorol.*, 8(1), 38–55, doi:10.1175/JHM560.1, 2007.

INAMHI: Atlas Estudiantil, [online] Available from: [http://issuu.com/inamhi/docs/atlas\\_estudiantil](http://issuu.com/inamhi/docs/atlas_estudiantil), 2013.

Muñoz, Á. G., Lopez, P., Velasquez, R., Monterrey, L., Leon, G., Ruiz, F., Recalde, C., Cadena, J., Mejia, R., Paredes, M., Bazo, J., Reyes, C., Carrasco, G., Castellon, Y., Villarroel, C., Quintana, J. and Urdaneta, A.: An Environmental Watch System for the Andean countries: El Observatorio Andino, Society, 91(dEcEmbEr), 20 [online] Available from: <http://arxiv.org/abs/1006.0926>, 2010.

NASA: TRMM 3B43, , doi:10.1175/JHM560.1, 2014a.

NASA: TRMM 3B43 Dataset, [online] Available from: <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=TRMM&dataGroup=Gridded&dataset=3B43>: Monthly 0.25 x 0.25 degree merged TRMM and other sources estimates&version=006 (Accessed 25 August 2014b), 2014.

Nicholson, S. E., Some, B., McCollum, J., Nelkin, E., Klotter, D., Berte, Y., Diallo, B. M., Gaye, I., Kpabeba, G., Ndiaye, O., Noukpozoukou, J. N., Tanu, M. M., Thiam, A., Toure, A. A. and Traore, A. K.: Validation of TRMM and Other Rainfall Estimates with a High-Density Gauge Dataset for West Africa. Part I: Validation of GPCP Rainfall Product and Pre-TRMM Satellite and Blended Products, *J. Appl. Meteorol.*, 42(10), 1337–1354, doi:10.1175/1520-0450(2003)042<1337:VOTAOR>2.0.CO;2, 2003.

Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P. and Willems, P.: Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18(8), 3179–3193, doi:10.5194/hess-18-3179-2014, 2014.

Petty, G. W.: The status of satellite-based rainfall estimation over land, *Remote Sens. Environ.*, 51(1), 125–137, doi:10.1016/0034-4257(94)00070-4, 1995.

Pineda, L., Ntegeka, V., Willems, P. and Fermi, E.: Rainfall variability related to sea surface temperature anomalies in a Pacific - Andean basin into Ecuador and Peru, *Adv. Geosci.*, 11, 1–10, 2013.

Schaefer, J. T.: The Critical Success Index as an Indicator of Warning Skill, *Weather Forecast.*, 5(4), 570–575, doi:10.1175/1520-0434(1990)005%253C0570:TCSIAA%253E2.0.CO;2, 1990.



Scheel, M. L. M., Rohrer, M., Huggel, C., Santos Villar, D., Silvestre, E. and Huffman, G. J.: Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(8), 2649–2663, doi:10.5194/hess-15-2649-2011, 2011.

SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, [online] Available from: <http://www.senamhi.gob.pe/?p=0020> (Accessed 6 August 2014), 2014.

Simpson, J., Adler, R. F. and North, G. R.: A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 69(3), 278–295, 1988.

Su, F., Hong, Y. and Lettenmaier, D. P.: Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin, *J. Hydrometeorol.*, 9(4), 622–640, doi:10.1175/2007JHM944.1, 2008.

UCAR: Guía de Referencia para Sistemas de Alerta Temprana de Crecidas Repentinas., 2012.

Wang, J. and Wolff, D. B.: Evaluation of TRMM Rain Estimates Using Ground Measurements over Central Florida, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 51(5), 926–940, doi:10.1175/JAMC-D-11-080.1, 2012.

Wang, X. and Feng, Y.: RHTest user manual, ... <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/RHTest/> ..., 16 [online] Available from: <http://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=RHtests&btnG=&lr=#5> (Accessed 19 August 2014), 2004.

Ward, E., Buytaert, W., Peaver, L. and Wheeler, H.: Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: a water resources perspective, *Adv. Water Resour.*, DOI: 10.10, doi:10.1016/j.advwatres.2011.05.007, 2011.

Wolff, D. B., Marks, D. A., Amitai, E., Silberstein, D. S., Fisher, B. L., Tokay, A., Wang, J. and Pippitt, J. L.: Ground Validation for the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 22(4), 365–380, doi:10.1175/JTECH1700.1, 2005.

Zulkafli, Z., Buytaert, W., Onof, C., Manz, B., Tarnavsky, E., Lavado, W. and Guyot, J.-L.: A Comparative Performance Analysis of TRMM 3B42 (TMPA) Versions 6 and 7 for Hydrological Applications over Andean–Amazon River Basins, *J. Hydrometeorol.*, 15(2), 581–592, doi:10.1175/JHM-D-13-094.1, 2014.



## 7. ANEXOS

Anexo 1. Algoritmo en R para extraer las estimaciones del satélite en la grilla correspondiente a cada estación.

```
#Descargar e instalar los paquetes necesarios
install.packages("rgdal")
install.packages("raster")
install.packages("sp")
install.packages("rgeos")
install.packages("ncdf")

#Cargar los paquetes en la sesión
library(rgdal)
library(raster)
library(sp)
library(rgeos)
library(ncdf)

## Leer el perfil del Ecuador para cortar los mapas TRMM 3B43
ecuador<-
readOGR("C:/Users/Edisson/Documents/Dropbox/Tesis/GIS/shp","provincias_disu
elto")
## Asignación de datum
ecuador<-spTransform(ecuador, CRS("+proj=longlat +datum=WGS84"))
## Leer las coordenadas geográficas de las estaciones
estaciones<- read.delim("CoordenadasEstaciones.txt", header=TRUE)
## Convertir el archivo de texto a variable geoespacial de coordenadas
coordinates(estaciones) <- ~X+Y
## Proyección de las coordenadas
proj4string(estaciones) <- CRS("+init=epsg:4248")
estaciones<- spTransform(estaciones, CRS("+init=epsg:4326"))
```



```
## Leer los mapas TMPA 3B43 (V7)
## Guardar en una variable todos los nombres de los archivos .nc
files<- list.files(pattern='.nc')
## Bucle para almacenar en la variable accum los mapas TRMM 3B43 (V7) para el
Ecuador
for (i in 1:length(files))
{
  ## Leer un mapa de un mes y convertirlo en archivo raster
  imageraster<- raster(files[i])
  ## Cortar el mapa al perfil del Ecuador
  imageraster<- crop(imageraster, ecuador)
  ## Leer el año y mes del mapa
  filesyear<- substr(files[i], 19, 24)
  ## Convertir el archive en una variable de tipo SpatialGrid Data Frame
  imagesp<- as(imageraster, 'SpatialGridDataFrame')
  ## Extraer en la variable names el año y mes del mapa
  names(imagesp) <- filesyear
  ## Acumular los mapas de todos los meses en la variable accum
  if (i == 1) ( accum<- imagesp)
  if (i!= 1) (accum<- cbind(accum,imagesp))
  ## Interpolar las estaciones con el mapa para obtener las estimaciones de
  ##precipitación en cada una
  over<- data.frame(extract(imageraster, estaciones))
  ## Copiar en la variable over, el mes y año del mapa
  names(over) <- filesyear
  ## Acumular en variable timeseries los datos mensuales para todas las
  ##estaciones
  ifelse (i==1, timeseries<- data.frame(t(over)), timeseries<- rbind(timeseries,
  data.frame(t(over))))
```



```
}
```

```
## Guardar en la variable timeseries los años y meses de la serie de datos
```

```
timeseries$name<- rownames(timeseries)
```

```
## Exportar la serie de datos de precipitación estimada por el satélite en las
```

```
##estaciones
```

```
write.table(timeseries,"tmpa.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
```



## **Anexo 2.** Cálculo de errores estadísticos e índices de detección para las estaciones de la Costa, Sierra y Oriente

```
## Instalación y carga de los paquetes necesarios
```

```
install.packages("hydroGOF")
```

```
library(hydroGOF)
```

```
## Lectura de las estimaciones de precipitación por los pluviómetros
```

```
pluv<- read.delim("Pluviometros.txt", header=TRUE, sep="")
```

```
## Lectura de las estimaciones de precipitación por el satélite exportados por el
```

```
## algoritmo descrito en el Anexo 1
```

```
tmpaV7 <- read.delim("tmpa.txt", header=TRUE, sep="")
```

```
## Guardar en la variable ne el número de columnas (= número de estaciones)
```

```
ne<-ncol(pluv)
```

```
## Encerar variables de errores estadísticos
```

```
ResBIAS<-rep(NA,ne)
```

```
ResRMSE<-rep(NA,ne)
```

```
ResPearson<-rep(NA,ne)
```

```
## Determinar los límites de precipitación (mm) para calcular los índices
```

```
thresholds=c(10,20,50,100,200,300,400)
```

```
## Guardar en una variable el número de límites
```

```
nt<-length(thresholds)
```

```
## Encerar las variables para guardar los índices
```

```
ResFBI<-matrix(rep(NA,ne*nt),ncol=ne)
```

```
ResFAR<-matrix(rep(NA,ne*nt),ncol=ne)
```

```
ResPOD<-matrix(rep(NA,ne*nt),ncol=ne)
```

```
ResETS<-matrix(rep(NA,ne*nt),ncol=ne)
```

```
## Bucle para calcular errores estadísticos e índices de cada estación
```

```
for (l in 1:ne)
```

```
{
```



```
## Unir estimaciones de satélite y pluviómetro para eliminar datos faltantes  
(NA's)
```

```
est<-as.data.frame(cbind(pluv[,l],tmpaV7[,l]))
```

```
## Eliminar las filas con datos faltantes (NA)
```

```
est<-na.omit(est)
```

```
##Contar el número de datos existentes de la estación
```

```
n<-nrow(est)
```

```
##Asignar una variable para los datos del pluviómetro (pl) y otra para tmpa
```

```
pl<-est[,1]
```

```
tmpa<-est[,2]
```

```
##Calcular bias, RMSE y coeficiente de Pearson's
```

```
bias<-1/n*sum(pl-tmpa)
```

```
RMSE<-rmse(tmpa,pl)
```

```
pearson<-cov(pl,tmpa)/(var(pl))^0.5/(var(tmpa))^0.5
```

```
## Encerar las variables a, b y c para los índices de detección
```

```
a=rep(0,nt)
```

```
b=rep(0,nt)
```

```
c=rep(0,nt)
```

```
##Bucle que calcula los parámetros a,b y c para encontrar POD,ETS,FBI y FAR
```

```
for (k in 1:nt) {          ## Bucle para cada estación
```

```
for (j in 1:n) {          ## Bucle para cada límite de precipitación
```

```
if (pl[j]>=thresholds[k]) {
```

```
if(tmpa[j]>=thresholds[k]) {
```

```
a[k]=a[k]+1}          ## Cuenta la detección tipo a
```

```
else {
```

```
c[k]=c[k]+1}          ## Cuenta la detección tipo c
```

```
}
```

```
if (tmpa[[j]]>=thresholds[k]) {
```

```
if(pl[[j]]<thresholds[k]) {
```

```
b[k]=b[k]+1}          ## Cuenta la detección tipo b
```

```
}
```



```
}  
}  
## Cálculo de los índices de detección  
FBI<-(a+b)/(a+c)  
POD<-a/(a+c)  
FAR<-b/(a+b)  
He<-(a+c)*(a+b)/n  
ETS<-(a-He)/(a+b+c-He)  
## Almacenar resultados de cada estación  
ResBIAS[,i]<-bias  
ResRMSE[,i]<-RMSE  
ResPearson[,i]<-pearson  
ResFBI[,i]<-FBI  
ResPOD[,i]<-POD  
ResFAR[,i]<-FAR  
ResETS[,i]<-ETS  
}  
## Exportar los resultados  
write.table(timeseries,"tmpa.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)  
write.table(ResBIAS,"Bias.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)  
write.table(ResRMSE,"RMSE.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)  
write.table(ResPearson,"Pearson.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)  
write.table(ResFBI,"FBI.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)  
write.table(ResFAR,"FAR.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)  
write.table(ResPOD,"POD.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)  
write.table(ResETS,"ETS.txt",row.names = FALSE, col.names=TRUE)
```