



**Cuestión 3 del  
Orden del Día:**

**Estado del Proyecto y actividades realizadas desde la Reunión de  
Coordinación anterior**

**“Estudio para un Algoritmo SBAS de Corrección Ionosférica en la Región Caribe, Centro y  
Sudamérica” realizado por GESA – Universidad Nacional de La Plata, Argentina**

(Nota presentada por la Secretaría)

<p style="text-align: center;"><b>Resumen</b></p> <p>Esta nota de estudio presenta el informe final correspondiente al Estudio para un algoritmo SBAS de corrección ionosférica en la Región Caribe, Centro y Sudamérica.</p>
<p style="text-align: center;"><b>Referencia</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Brunini C. y Azpilicueta F. (2007); Estudio para un algoritmo SBAS de corrección ionosférica en la Región Caribe, Centro y Sudamérica.</li><li>• Documento PRODOC del Proyecto RLA/03/902.</li></ul>

**1. Introducción**

1.1 En conformidad con el plan de actividades del Proyecto RLA/03/902, referente al paquete de trabajo PT 4000, y producto de la encomienda dada por la OACI al grupo de Geodesia Espacial y Aeronomía (GESA) de la Facultad de Ciencias Astronómica y Geofísica de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina; la Sección de Las Américas de la Dirección de Cooperación Técnica de la OACI recibió el Informe Final correspondiente al “*Estudio para un algoritmo SBAS de corrección ionosférica en la Región Caribe, Centro y Sudamérica*”, el cual fue remitido el 27 de diciembre de 2007.

1.2 El objetivo de este estudio consistió en caracterizar y evaluar las dificultades de representación y modelado que la ionosfera de la región Caribe, Centro y Sur América presenta para un esquema de correcciones del tipo SBAS (Satellite Based Augmentation System – Sistema de Aumentación Basado en Satélites). El estudio ha sido realizado por el Dr. Francisco Azpilicueta y el Dr. Claudio Brunini, ambos de GESA – Facultad de Ciencias Astronómica y Geofísica – UNLP.

## 2. Resultados y recomendaciones del estudio

2.1 El Informe final del “*Estudio para un algoritmo SBAS de corrección ionosférica en la Región Caribe, Centro y Sudamérica*” está compuesto por dos partes. La Primera Parte trata sobre los “*Procesos físicos en la atmósfera terrestre y señales GNSS*” y la Segunda Parte constituye el “Informe Técnico”. Este informe completo se presenta en el **Apéndice** de esta nota.

### *Resumen de la primera parte*

2.2 La primera parte del estudio describe la variedad y diversidad de fenómenos que ocurren en la atmósfera terrestre y la forma en que ellos afectan la propagación de las señales GNSS. El estudio expresa que “...Los sistemas de aumentación, además de mejorar la precisión en la determinación de la posición en cualquier instante, deben también proveer información para calcular cotas a los errores que se comenten. Por esta razón, todo sistema debe estar basado en un conocimiento profundo de la atmósfera terrestre que contemple tanto las variaciones temporales como espaciales que ella introduce en la transmisión de las señales GNSS”.

### *Resumen de la segunda parte*

2.3 El informe expresa en su segunda parte, entre otros aspectos, que “***Los resultados obtenidos en el estudio son muy alentadores. Tanto la capacidad de predicción de la corrección y como de su integridad mostrada por los resultados es muy alta...En el 84% de los casos analizados la integridad fue satisfactoria y estuvo entre el 99 y 100% de predicción***”.

2.4 Además el informe manifiesta que, “...el estudio muestra puntos en los que es necesario profundizar y al mismo tiempo marca direcciones para futuros estudios. Entre esos temas figuran principalmente:

- ✈ la necesidad de una mejora del algoritmo de predicción de correcciones e integridad propuesto sobre la región centro y noreste de Brasil, la distribución del TEC muestra el comportamiento más complejo, ya sea desde un punto de vista de la variación geográfica como desde el punto de vista temporal.
- ✈ Es también en esta región donde los efectos de centelleo, que es un tema no investigado en este trabajo, tienen mayor frecuencia de ocurrencia.”

2.5 Adicionalmente, el informe expresa que,

- ✈ “de los resultados obtenidos surge también la necesidad de la puesta en funcionamiento de un experimento piloto, aunque sea de una dimensión reducida, que abarque por ejemplo una región limitada, en donde un par de estaciones de monitoreo GPS permanente, una funcionando como estación de control y la otra como estación usuario, simulen en tiempo real el funcionamiento de un sistema de aumentación. Al mismo tiempo, este experimento servirá para evaluar el efecto que el nivel creciente de actividad solar, y consecuentemente del nivel de ionización de la ionosfera, esperable para los próximos años, tiene sobre un sistema de aumentación para la región”.

2.6 Finalmente, el Informe al referirse al experimento piloto propuesto expresa que “...La información, tanto los datos como los resultados producidos a partir de este experimento serán de importancia clave para el futuro desarrollo de un sistema de aumentación en esta región”.

### 3. ACCIONES SUGERIDAS

#### 3.1 Se invita a la Reunión a:

- a) tomar nota de la información contenida en esta nota de estudio, incluyendo el Informe final del estudio contenido en el Apéndice;
- b) considerar los resultados de este informe con los obtenidos en los trabajos del PT 4000 por parte de la empresa GMV;
- c) acordar acciones sobre los temas que el estudio propone profundizar, los cuales se resumen en el párrafo 2.4 de esta nota;
- d) considerar la conveniencia de incluir en el programa de actividades del Proyecto RLA/03/902, como parte del Volumen 3, Actividad A3 - *Monitoreo y análisis del comportamiento ionosférico* que está programada en la Fase III-A las recomendaciones que el estudio propone en sus conclusiones referentes a la red de monitorización, el experimento piloto de monitoreo GPS permanente que se refieren en los párrafos 2.5 y 2.6 de esta nota; y,
- e) considerar y adoptar otras acciones que estime pertinentes.

-----

# **Estudio para un Algoritmo SBAS de Corrección Ionosférica en la Región Caribe, Centro y Sur América**

## **Primera Parte**

### **Procesos físicos en la atmósfera terrestre y señales GNSS**



Laboratorio de Geodesia  
Espacial y Aeronomía  
Facultad de Ciencias Astronómicas y  
Geofísicas  
Universidad Nacional de La Plata  
Argentina

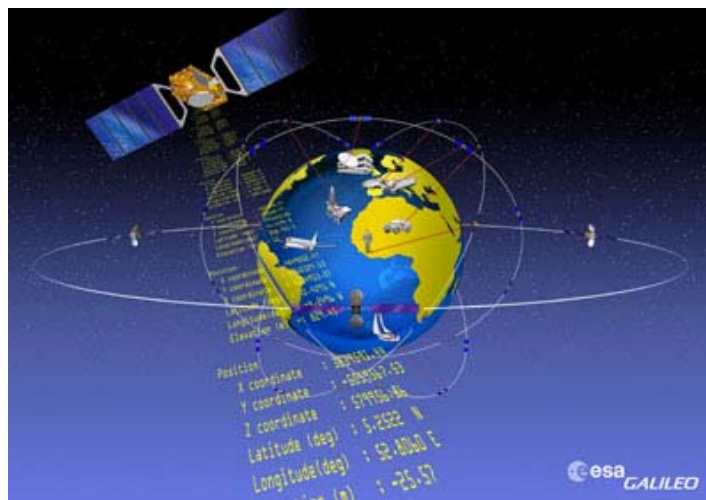
## TABLA DE CONTENIDOS

<b>SEÑALES GNSS</b> .....	1
<b>LA ATMÓSFERA TERRESTRE</b> .....	4
<b>LA IONOSFERA</b> .....	6
<b>ANOMALÍAS ECUATORIAL Y DEL ATLÁNTICO SUR</b> .....	7
<b>TORMENTAS IONOSFÉRICAS</b> .....	8
<b>CENTELLEO</b> .....	10
<b>TROPOSFERA</b> .....	10
<b>RESUMEN</b> .....	11
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	11

## SEÑALES GNSS

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es un sistema mundial que permite determinar la posición (y la hora) en cualquier punto sobre la superficie de la Tierra o en el espacio cercano a ella, como resultado de la recepción de señales provenientes de satélites artificiales. El concepto GNSS incluye constelaciones principales de satélites, receptores, supervisión de integridad del sistema, y sistemas de aumentación que mejoran la calidad de la prestación.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de los Estados Unidos de América y el Sistema Orbital Mundial de Navegación por Satélite (GLONASS) de la Federación Rusa forman parte del concepto GNSS, a los que en un futuro próximo se incorporarán el GALILEO, la iniciativa de la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea para desarrollar un sistema de radionavegación por satélite bajo control civil; y el Beidou de la República Popular de China que actualmente se encuentra en fase de proyecto.



**Figura1.** Ilustración que esquematiza el concepto del GNSS, perteneciente al sistema GALILEO.

Los satélites GNSS transmiten continuamente señales de radio que son captadas por los receptores. El principio sobre el cual se basa el cálculo de la posición del receptor es muy

elemental: el satélite emite una señal, que llega al receptor un instante de tiempo después; este retardo es proporcional a la distancia que separa al receptor del satélite, siendo la constante de proporcionalidad la velocidad de propagación de las ondas de radio, es decir la velocidad de propagación de la luz.

Los GNSS son utilizados para la aeronavegación, el transporte marítimo y terrestre, en sistemas de seguridad, para la práctica de deportes, en la agroindustria, y en los últimos años el espectro de usuarios se amplía día a día. Algunos de estos usos demandan requisitos estrictos de precisión, integridad, disponibilidad y continuidad en la información que proporciona el sistema. Una descripción breve del significado de los requisitos operacionales es la siguiente:

- **Exactitud:** diferencia entre la posición estimada y la real (medición de errores).
- **Integridad:** confiabilidad de la información total proporcionada (alertas de no utilización).
- **Continuidad:** funcionamiento sin interrupciones no programadas.
- **Disponibilidad:** es el intervalo del tiempo durante la cual el sistema presenta simultáneamente la exactitud, integridad y continuidad requeridas.

Con el objeto de garantizar las dos primeras premisas, es necesario estimar el error que se comete en la determinación de la posición del receptor. Las principales fuentes de error son<sup>1</sup>: la atmósfera terrestre, las imprecisiones con que se conocen las órbitas y los relojes de los satélites, el multi-camino y el ruido térmico.

La Tabla 1, da una idea del orden de magnitud de cada una de las componentes mencionadas y de sus efectos sobre la posición del receptor. El efecto de la atmósfera sobre la propagación de las señales representa aproximadamente un 59 % del error en la medición de las coordenadas. La atmósfera terrestre

---

<sup>1</sup> Brunini, C. y Azpilicueta, F. (2007)

puede llegar a introducir errores del orden de 22 metros en la determinación de la distancia receptor-satélite, que se propaga en el cálculo de la posición y la afecta en una cantidad próxima a los 39 metros para las coordenadas horizontales y que puede alcanzar los 60 metros para la altura.

Fuentes de errores	
Atmósfera (ionosfera + troposfera)	21.5
Errores orbitales	7.5
Reloj del satélite	4.5
Multicamino	1.6
Ruido de medición	0.9
Errores en la Posición	
Horizontal	39
Vertical	60

**Tabla 1.** Orden de magnitud de los diferentes errores y de sus efecto sobre la posición del receptor, expresados en metros, con un nivel de confiabilidad del 99.9%.

Los satélites GNSS se hallan en órbitas de alturas intermedias, situados aproximadamente a unos 20 mil kilómetros por sobre la superficie de la Tierra. Para alcanzar un receptor situado sobre o cerca de ella, las señales de los satélites deben atravesar por completo la atmósfera de nuestro planeta. Diferentes procesos físicos que ocurren en la envoltura terrestre reducen la velocidad de propagación de las señales GNSS en relación con la que tendrían si se propagaran en el vacío, causando una estimación excesiva e imprevisible en la distancia satélite-receptor. Como mencionamos en el párrafo anterior, ésta es la principal fuente de imprecisión en el posicionamiento, que puede traducirse en un error de decenas de metros en la determinación de la posición. Conocer la naturaleza y comportamiento de la atmósfera terrestre nos permitirá comprender y reducir su efecto sobre las señales satelitales. Éste es uno de los principales desafíos de los sistemas de aumentación de señales GNSS.



## LA ATMÓSFERA TERRESTRE

Para caracterizar la estructura de la atmósfera terrestre es posible utilizar diferentes parámetros físicos tales como la temperatura, la composición y el contenido de electrones libres.

La clasificación más común se basa en características térmicas y divide a la atmósfera en cinco regiones (Figura 2):

- **Troposfera:** 0 - 8/16 km, la temperatura disminuye con la altura.
- **Estratosfera:** 8/16 - 50 km, la temperatura permanece constante para después aumentar con la altura.
- **Mesosfera:** 50 - 80/85 km, la temperatura disminuye con la altura.
- **Termosfera:** 80/85 - 500 km, la temperatura aumenta con la altura.
- **Exosfera:** 500 - 1500/2000 km

Las divisiones entre una capa y otra se denominan respectivamente tropopausa, estratopausa, mesopausa y termopausa.

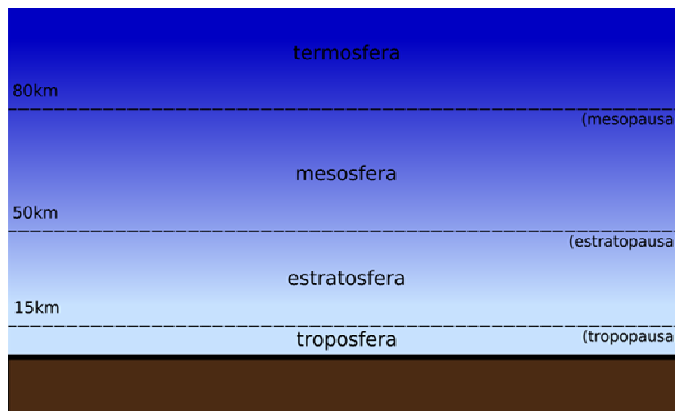


Figura 2. Estructura de la atmósfera.

Otra clasificación de la atmósfera tiene en cuenta la composición química y distingue tres capas:

- **Homosfera:** 0-90 km, compuesta fundamentalmente de nitrógeno y oxígeno molecular en una mezcla homogénea como consecuencia de los procesos de turbulencia que tienen lugar en ella.
- **Heterosfera:** 90-1700 km, caracterizada por estratos de diferente composición. Entre los 180 y 700 km la composición del aire es dominada por oxígeno atómico, mientras que entre los 700 y 1700 km, por helio.
- **Geocorona:** 1700 km en adelante, constituida por hidrógeno.

Por otra parte, la atmósfera de la Tierra está expuesta a la radiación solar. Los rayos X y ultravioleta (UV) que ingresan a la atmósfera causan la separación de los electrones de parte de los átomos y moléculas neutras que la constituyen. El mismo efecto provocan las partículas energéticas provenientes del Sol que alcanzan la atmósfera. Este fenómeno se conoce como ionización y da como resultado un sistema formado por núcleos con carga positiva (iones) y electrones libres denominado plasma.

La región de la atmósfera terrestre formada por material ionizado se denomina ionosfera. Su estructura vertical responde a la estratificación del plasma y distingue cuatro regiones:

- **Región D:** 60-90 km, en coincidencia con la homosfera, el ritmo de recombinación en esta zona es relativamente alto.
- **Región E:** 90-170 km, está dominada por iones de oxígeno molecular ( $O_2^+$ ) y de monóxido de nitrógeno ( $NO^+$ ).
- **Región F:** 170-1000 km, dominada por iones de oxígeno atómico, está dividida en dos sub-regiones denominadas F1 y F2.
- **Plasmasfera:** es la región externa, dominada por iones de hidrógeno. Su límite superior se denomina plasmopausa y separa el plasma que co-rota con la Tierra de aquél que no es afectado por la rotación del planeta.

Las regiones de la atmósfera que afectan la propagación de las señales GNSS son la ionosfera y la troposfera. La primera contribuye con el 93% del error que introduce la atmósfera en la determinación de las coordenadas y 7% restante se debe a la troposfera. Los párrafos siguientes describen brevemente el efecto de cada una de esta capas sobre las señales de los satélites GNSS.

### LA IONOSFERA

Para las señales GNSS la atmósfera ionizada se comporta como un medio dispersivo, produciendo un error en la distancia satélite-receptor que es proporcional a la inversa del cuadrado de la frecuencia de la señal.

Para calcular la demora que sufre la señal es necesario conocer el contenido de electrones libres, (TEC, del inglés Total Electron Content) que encuentra la señal a lo largo de su recorrido, desde el satélite hasta el receptor. El TEC es fuertemente variable, tanto para diferentes regiones del planeta (variaciones espaciales) como a lo largo del tiempo (variaciones temporales).

Como la principal fuente de ionización de la atmósfera es el Sol, cualquier variación en la intensidad de la radiación solar o en la geometría relativa con respecto a la Tierra se traduce en cambios en el TEC y por lo tanto en imprecisiones en la determinación de la posición del receptor GNSS. Así, para un punto sobre la superficie del planeta, el TEC variará con un período de 24 horas (variación diurna) asociado al movimiento de rotación de la Tierra, otro de 365 días (variación estacional), y una variación cíclica con período de 11 años que refleja el nivel de actividad solar<sup>2</sup>. Asimismo, se espera que el TEC tenga su valor máximo en la región ecuatorial y sea decreciente hacia los polos geográficos. Sin embargo, el comportamiento del TEC presenta una variación mucho más compleja, debido fundamentalmente a la distribución no

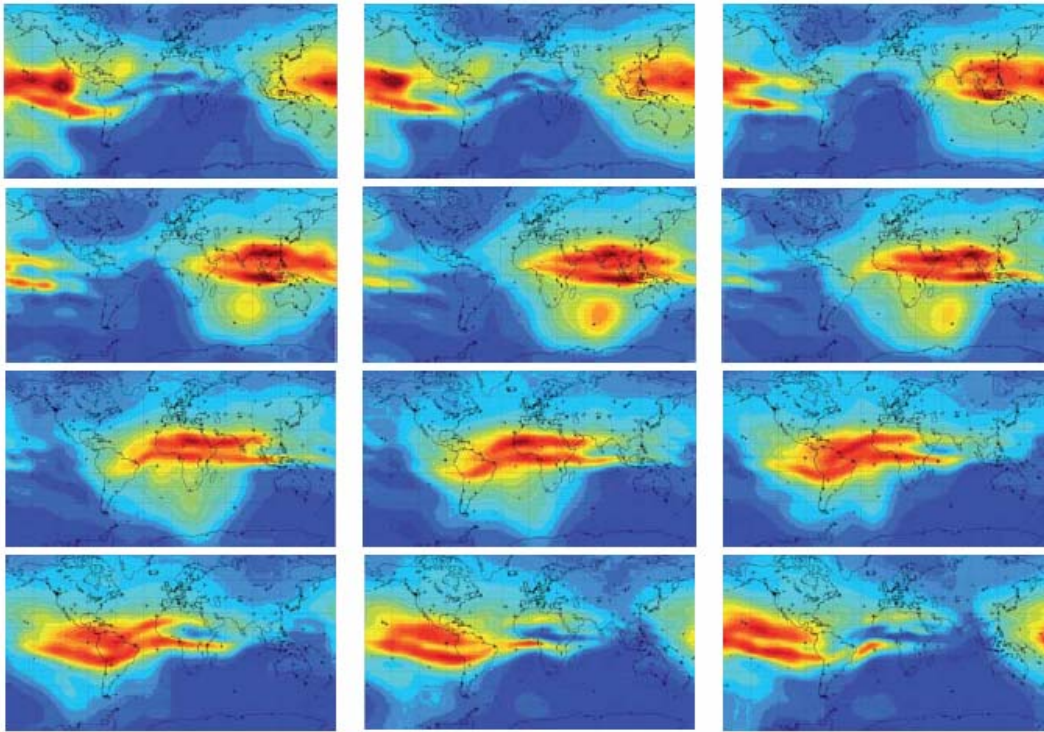
---

<sup>2</sup> La radiación emitida por el sol está correlacionada con el número de manchas solares que tienen un periodo de repetición de poco mas de 11 años..

homogénea del material en la atmósfera terrestre (anomalías), y a la imprevisibilidad de la actividad solar que provoca tormentas ionosféricas. Además, la inyección de partículas de altas energías provenientes del Sol en la atmósfera terrestre y la presencia de burbujas en ella suman una variación rápida del TEC conocida como “centelleo”. Estos son los fenómenos más difíciles de predecir y por lo tanto de modelar.

### ANOMALÍAS ECUATORIAL Y DEL ATLÁNTICO SUR

En la Figura 4 se muestra una serie de mapas que representan la variabilidad del TEC a lo largo de un día completo. Éstas fueron obtenidos utilizando el Modelo Ionosférico de La Plata (LPIM de su sigla en inglés) y que representan el comportamiento del TEC para condiciones ionosféricas que podrían caracterizarse como normales.



**Figura 4.** Variabilidad del TEC a lo largo de un día completo con condiciones ionosféricas normales; se muestra un mapa cada dos horas, comenzando a las 0 y terminando a las 24 horas de Tiempo Universal, avanzando de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo; los colores más fríos se corresponden con un retardo cercano a 0, mientras que los más cálidos con uno cercano a los 20 metros.

En la Figura 4 puede apreciarse que los valores máximos del TEC (en rojo) aparecen algo después del mediodía local y en las regiones ecuatoriales. Sobresale una estructura formada por dos regiones de alta concentración de plasma, paralelas, ubicadas a cada lado del ecuador magnético<sup>3</sup> y un valle a lo largo de esa línea imaginaria. Este fenómeno se conoce como “Anomalía Ecuatorial” o Anomalía de Appleton, en honor al científico que explicó su formación. El máximo de esta estructura ocurre hacia el mediodía local y se prolonga hasta el crepúsculo local.

Esta singularidad en la distribución del contenido electrónico provoca retardos en la señal que pueden implicar diferencias cercanas a los 40 metros en altura, entre la posición medida y la verdadera.

El incremento en el TEC que origina la doble estructura observada es consecuencia de los vientos ecuatoriales que se dirigen desde la parte del globo que es iluminada por el sol hacia la zona que permanece de noche y de su interacción con el campo magnético terrestre. La naturaleza variable del fenómeno hace de esta región la más difícil de mapear.

A su vez, en la región del Océano Atlántico Sur, entre África y América, el campo magnético de la tierra muestra un comportamiento anómalo conocido como “anomalía del Atlántico Sur”, que afecta la distribución del contenido electrónico, haciendo aún mas difícil su predicción.

### **TORMENTAS IONOSFÉRICAS**

Los iones de la atmósfera terrestre originados por la radiación solar conforman un plasma embebido en el campo magnético de la Tierra y se mueven bajo la acción de fuerzas electromagnéticas dando origen a estructuras tan complejas como las de la anomalía ecuatorial. Además de radiación, cada segundo el Sol eyecta al espacio millones de toneladas de la materia que compone su

---

<sup>3</sup> Definido como el lugar donde el campo magnético de nuestro planeta tiene dirección paralela a la superficie de la Tierra.

corona (principalmente neutrones y en menor medida partículas alfa). Esa lluvia de materia expelida desde el Sol, conocida como viento solar, tarda unos 8 días en recorrer los 150 millones de kilómetros que median entre el Astro y nuestro planeta. Debido a su alta conductividad eléctrica, el viento solar arrastra consigo al campo magnético interplanetario. En condiciones normales, la Tierra está protegida frente al flujo incesante del viento solar por una coraza formada por su campo magnético. El viento solar es desviado por la magnetosfera, una cavidad de unos 40 mil kilómetros de radio en torno de la Tierra, dentro de la cual la intensidad del campo magnético terrestre es suficientemente fuerte como para prevalecer por sobre la del campo magnético interplanetario. Pero a intervalos irregulares y de un modo impredecible, se producen explosiones en el Sol que eyectan cantidades adicionales de masa coronal. Una vez eyectada, esa materia viaja hasta las cercanías de la Tierra y allí interactúa con la magnetosfera.

Si el campo magnético interplanetario (que viaja embebido en el viento solar) llega a la magnetosfera en dirección hacia el Norte, la magnetosfera se comprime pero permanece cerrada y continua comportándose como un escudo protector que no permite su ingreso.

Si el campo magnético interplanetario llega a la magnetosfera con dirección hacia el Sur, la magnetosfera se “abre” y permite el ingreso del viento solar hasta las capas más bajas de la atmósfera. Este ingreso de partículas provenientes del Sol puede producir uno de los fenómenos más bellos de la naturaleza: las auroras boreales, en el hemisferio Norte, o polares en el Sur. Pero también puede producir una gran perturbación del TEC, conocida como tormenta ionosférica. Si no el único, las tormentas ionosféricas son uno de los fenómenos más impredecibles y que más profundamente afectan a la radionavegación por satélites. Una tormenta ionosférica de gran intensidad puede causar no sólo errores de gran magnitud e imprevisibles en la radionavegación satelital, sino también la pérdida de las señales de algunos satélites.

## CENTELLEO

Otro problema muy serio causado por la ionosfera es el efecto denominada Centelleo. Así se llama a una variación muy rápida de las condiciones ionosféricas que causan variaciones igualmente rápidas en la amplitud y en la fase de las señales GNSS y de los satélites geoestacionarios. Este fenómeno, cuya ocurrencia es muy difícil de predecir, produce dificultades en la recepción de las señales, tanto las que provienen de los satélites GNSS cuanto de los geoestacionarios de comunicaciones, deteriorando la calidad de las posiciones determinadas e incluso ocasionando la pérdida completa de ambas señales. El centelleo aparece con mayor intensidad y frecuencia en las regiones de latitud magnética baja y alta, estando menos afectadas las regiones de latitud magnética intermedia. Se supone que en latitudes altas el centelleo se debe al ingreso de partículas de alta energía que, provenientes del Sol, penetra hasta las capas más bajas de la ionosfera y provocan una ionización muy irregular. En cambio en latitudes bajas, el fenómeno del centelleo no se asocia con la actividad solar sino con la presencia de burbujas que se crean y se mueven dentro del plasma ionosférico.

## TROPOSFERA

Para las señales GNSS la troposfera se comporta como un medio no dispersivo, produciendo un retardo en el tiempo de viaje de la señal que no depende de su frecuencia. Dicho retardo se modela como la suma de dos componentes, uno que depende del contenido de vapor de agua de la atmósfera (componente húmeda) y otro independiente de esa variable (componente seca)

La componente “seca”, representa el 90% del retardo total y su comportamiento es bastante fácil de predecir. La componente “húmeda” presenta un comportamiento mucho más impredecible que el de la componente seca pero, su magnitud es relativamente pequeña. Ambas componentes del retardo troposférico se corrigen utilizando modelos que dependen de la temperatura y de la presión



atmosférica para la componente seca, y como de la humedad relativa del ambiente, para la componente húmeda. Todas estas variables (especialmente la humedad relativa del ambiente) presentan fuertes variaciones espaciales.

## RESUMEN

Esta primera parte del estudio sirvió para describir la variedad y diversidad de fenómenos que ocurren en la atmósfera terrestre y la forman en que ellos afectan la propagación de las señales GNSS. Los sistemas de aumentación, además de mejorar la precisión en la determinación de la posición en cualquier instante, deben también proveer información para calcular cotas a los errores que se comenten. Por esta razón, todo sistema debe estar basado en un conocimiento profundo de la atmósfera terrestre que contemple tanto las variaciones temporales como espaciales que ella introduce en la transmisión de las señales GNSS.

## BIBLIOGRAFÍA

- Azpilicueta F. (2006); Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.
- Azpilicueta F., Brunini C., Radicella S. M.; Global ionospheric maps from GPS observations using modip latitude. *Advances in Space research*, Elsevier, (36), 552-561, 2005.
- Bilitza D.; 35 years of International Reference Ionosphere - Karl Rawer's legacy, *Advances in Radio Science* 2, 283–287, 2004.
- Brunini C. y Azpilicueta F. (2007); Estudio de Factibilidad para el desarrollo de un Sistema de Aumentación GNSS en la Argentina.
- International Civil Aviation organization (ICAO), International Standards and recommended Practices (SARPS), Aeronautical Communication, Annex 10, Vol I, Table 3.7.3.41, pp. 42G-2H, Montreal, Canada, 5<sup>th</sup> Edition, July 1996.
- Meza A., Gende M., Brunini C. and Radicella S. M.; Evaluating the accuracy of ionospheric range delay corrections for navigation at low latitude. *Advances in Space Research*, doi 10.1016/j.asr.2005.04.053, 36, 546-551, 2005.



RTCA Inc., Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, SC159 Do-229C, Washington, D.C,m November 28, 2001.

# **Estudio para un algoritmo SBAS de corrección ionosférica en la Región Caribe, Centro y Sur América**

## **Segunda Parte**

## **Informe Técnico**



Laboratorio de Geodesia  
Espacial y Aeronomía  
Facultad de Ciencias Astronómicas y  
Geofísicas  
Universidad Nacional de La Plata  
Argentina

## TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	1
CORRECCIONES IONOSFÉRICAS E INTEGRIDAD .....	3
ESQUEMA DE PROCESAMIENTO .....	6
EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS CORRECCIONES .....	9
ELECCIÓN DE LOS DÍAS PROCESADOS ....	10
CONCLUSIONES ...	11
APÉNDICE A	
APÉNDICE B	

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio consistió en caracterizar y evaluar las dificultades de representación y modelado que la ionosfera de la región Caribe, Centro y Sur América presenta para un esquema de correcciones del tipo SBAS (Satellite Based Augmentation System – Sistema de Aumentación Basado en Satélites).

Como se vio en la primera parte de este informe, el principio básico de posicionamiento a partir de los sistemas GNSS consiste en que un receptor situado en o sobre la superficie de la tierra mide la distancia a por lo menos cuatro satélites GNSS. Estas mediciones combinadas con información sobre las posiciones de los satélites en el momento de la medición, permiten al receptor calcular la posición en la que se encuentra. De esto se desprende que cualquier error en la medición de las distancias a los satélites tendrá como efecto un error en el cálculo de la posición del receptor.

Las señales transmitidas por la satélites GNSS viajan desde el satélite hasta el receptor y al atravesar la capa ionosférica, son afectadas de forma tal que el error en la distancia medida es proporcional a un parámetro ionosférico que los físicos de la atmósfera denominan el TEC y definen como la cantidad total de electrones contenida en un cilindro de un metro cuadrado de sección, y que va desde el satélite hasta el receptor (ver Figura 1). El error en la determinación de las distancia es directamente proporcional al TEC, es decir que cuanto mayor sea el TEC, mayor será el error; o en otras palabras el TEC es una forma de medir el error que la ionosfera introduce en la medición de distancias.

Como se mencionó anteriormente, la fuente principal que determina el nivel del TEC es la radiación solar, por lo que la región de la tierra que está siendo iluminada por el sol es la que mostrará los niveles de TEC mas altos.

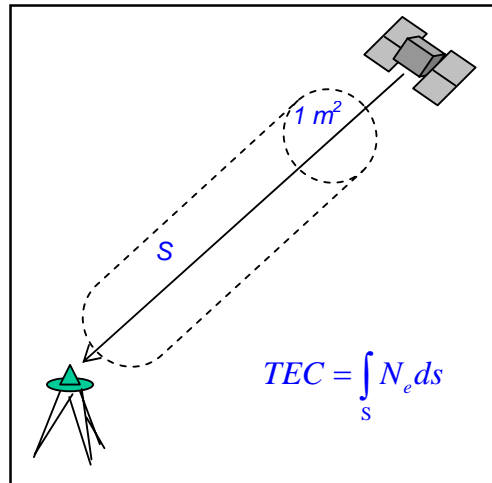


Figura 1. Esquema gráfico para la definición del TEC.

Basándose en aspectos prácticos, los físicos de la ionosfera dividen la superficie de la tierra en cuatro regiones principales a partir según la latitud geomagnética: i) baja; ii) media; iii) alta y iv) auroral. Esta división responde al hecho de que la ionosfera está fuertemente modelada por el campo magnético de la tierra y muestra características diferentes en cada una de estas regiones. En particular, el parámetro TEC muestra comportamientos bien diferentes en cada región, siendo las regiones de latitudes media y baja las que presentan el comportamiento más complejo para modelar y predecir. Como se puede apreciar en la Figura 2, la región Caribe, Centro y Sur América se encuentra principalmente sobre la zona de latitud geomagnética baja y se extiende hacia latitudes geomagnéticas medias y altas.

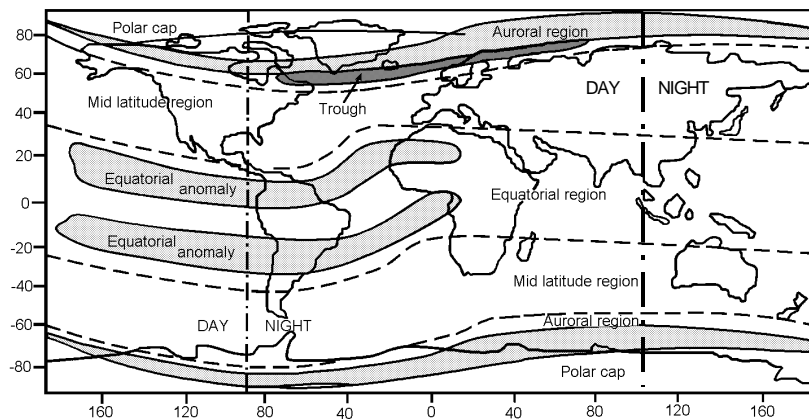


Figura 2. Regiones de latitud geomagnética baja, media, alta y auroral.

La Figura 2 también es útil para mostrar que los sistemas de aumentación actualmente en funcionamiento, el WAAS (EE.UU) y el EGNOS (Europa), ambos se encuentran principalmente en regiones de latitud geomagnética baja, extendiéndose limitadamente hacia la región de latitud media. Esto implica que mientras WAAS y EGNOS tienen que modelar el efecto ionosférico principalmente sobre latitudes bajas, un SBAS para la región Caribe, Centro y Sur América tendrá que enfrentar el desafío de modelar la ionosfera a lo largo de tres regiones geomagnéticas diferentes.

### **CORRECCIONES IONOSFÉRICAS E INTEGRIDAD**

El esquema general de un sistema de aumentación SBAS puede dividírsele en cuatro segmentos:

**i) Segmento de Control:** comprendido por las estaciones de monitoreo permanente que recolectan la información de los satélites y la re-envía a las estaciones maestras.

**ii) Segmento de Calculo:** compuesto por las estaciones maestras que reciben la información proveniente por las estaciones de monitoreo permanente y la procesan para elaborar los mensajes de aumentación.

**iii) Segmento Espacial:** compuesto por el o los satélites geo-estacionarios que son los responsables de diseminar las correcciones del sistema sobre la región de cobertura del sistema.

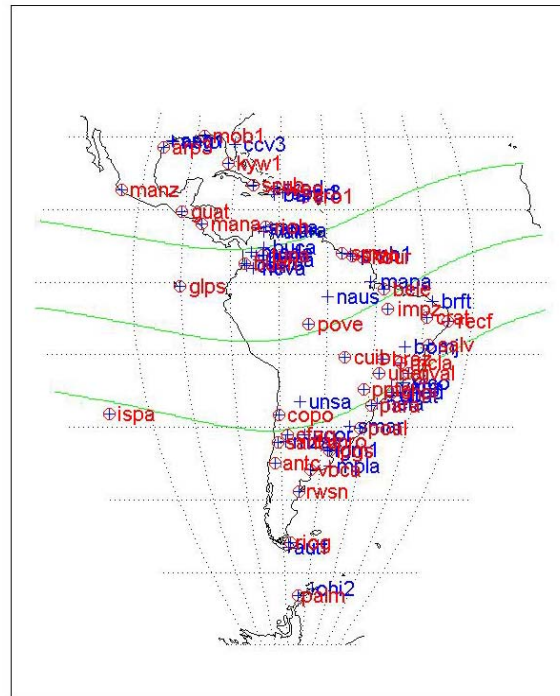
**iv) Segmento de Usuarios:** integrado por todos los usuarios provistos de receptores GNSS con capacidad de aumentación.

Con el objeto de definir condiciones de evaluación que representen de una forma realista una posible configuración para un sistema de aumentación en la región CAR/SAM, el escenario elegido para la realización de este estudio tuvo en cuenta cada uno de estos segmentos, a excepción del segmento espacial, por no ser posible su inclusión en este estudio.

### Segmento de control

El Segmento de Control para este estudio se definió a partir de un conjunto de mas 90 estaciones permanentes GPS distribuidas de la forma mas homogénea posible, a lo largo y ancho de la región Caribe, Centro y Sur América. Para esto fue necesario recolectar las mediciones de las redes de estaciones GPS permanentes administradas por diversos organismos e instituciones: el Internacional GNSS Service (IGS, [igscb.jpl.nasa.gov](http://igscb.jpl.nasa.gov)); Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS, <http://www.sirgas.org/>); redes nacionales de estaciones GPS permanentes de Argentina (Centro de Procesamiento La Plata - CPlat <http://cplat.fcaglp.unlp.edu.ar/>, Brasil (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, <http://www.inpe.br/>, Colombia (Instituto Colombiano de Geología y Minería - <http://www.ingominas.gov.co/>) y Republica Dominicana (<http://www.suprema-repgeo.gov.do/>).

Como el número de estaciones GPS disponibles era sobreabundante, se realizó una selección que tuvo en cuenta: la calidad y continuidad de los datos producidos por cada estación; y el área de cobertura de manera de evitar solapamientos excesivos entre las áreas de cobertura de estaciones contiguas. Como se describirá en las secciones siguientes, un conjunto de estaciones especialmente seleccionadas fueron excluidas del grupo de estaciones de control para actuar como usuarios del sistema de aumentación. La Figura 3 muestra las estaciones utilizadas para este estudio.



**Figura 3.** Distribución de estaciones GPS permanentes utilizadas en el estudio. Las estaciones en rojo corresponden al Segmento de Control, mientras que las estaciones en azul corresponden al Segmento de Usuarios.

### Segmento de Cálculo

En un sistema de aumentación este segmento está materializado por las Estaciones Maestras primaria y de respaldo. En el contexto de este estudio, el Segmento de Cálculo lo constituye el paquete de software y el servidor dedicados al procesamiento de la información recolectada por las estaciones GPS permanentes. El producto de este segmento es el mensaje de aumentación que permitirá a un receptor GNSS+aumentación, corregir el error producido por la ionosfera en las mediciones de distancias a los satélites GNSS. El mensaje producido por este segmento también permite a un receptor GNSS+aumentación estimar la calidad de la corrección utilizada, es decir permite inferir información sobre la integridad de la posición que el receptor está calculando.



El paquete de software está compuesto por programas en lenguaje FORTRAN íntegramente desarrollados por el laboratorio GESA, muchos de cuyos principios y algoritmos han sido presentados en congresos internacionales o se encuentran documentados en artículos científicos aparecidos en publicaciones internacionales de la especialidad.

### Segmento de Usuario

Un conjunto de estaciones GPS permanentes fueron reservadas para actuar como usuarios del sistema de aumentación. Por esta razón, las observaciones de estas estaciones son completamente independientes de las utilizadas para calcular el mensaje de aumentación. Los criterios seguidos para la selección de este conjunto de estaciones respondieron a: calidad y continuidad de las observaciones; y a una distribución geográfica que abarcara toda la región Caribe, Centro y Sur Américo, lo que permitió evaluar el comportamiento de las correcciones ionosféricas para las diferentes bandas de latitud geomagnética.

### ESQUEMA DE PROCESAMIENTO

Esta sección describe el esquema utilizado para generar el mensaje de aumentación. Todas las actividades aquí descritas son realizadas por el Segmento de Cálculo (ver Fig. 4) mencionado en los párrafos anteriores. Cuando un sistema de aumentación se encuentra operativo, todo este paquete de trabajo se realiza en forma simultánea a medida que las estaciones de monitoreo transmiten las mediciones realizadas. Como este estudio se realiza en condiciones de laboratorio, el punto de partida son archivos de mediciones de las estaciones de control.

Las observaciones recolectadas en las estaciones del Segmento de Control (ver Fig. 4) se utilizan para obtener la información sobre la distribución del TEC ionosférico en la región de cobertura de la red de estaciones. Sin embargo, esta información se encuentra afectada por varias constantes de calibración,

dominando entre ellas una constante de calibración debida a la electrónica de cada estación de monitoreo y una constante de calibración debida a la electrónica de cada satélite GNSS. En la estrategia de procesamiento seguida para este estudio, esta primera etapa de trabajo se denomina de Pre-Procesamiento y consiste en la determinación y aplicación de las constantes de calibración para cada satélite y cada estación de control.

Una vez que se obtienen las observaciones corregidas, es decir una vez que las constantes de calibración son removidas de las observaciones, se pasa a la segunda etapa denominada de Procesamiento. En esta etapa las observaciones calibradas son procesadas en bloques de cinco minutos cada uno generando un mensaje de aumentación que se va actualizando a medida que se procesa un nuevo bloque de datos. El software utilizado para este procesamiento está basado en un sistema de Filtros Kalman avanzados. La información contenida en el mensaje de aumentación permite a un usuario GNSS+aumentación calcular las correcciones ionosféricas a las distancias medidas a los satélites GNSS y al mismo tiempo estimar la integridad de las mismas.

Para completar el círculo de funcionamiento de un sistema de aumentación, es necesario introducir en el estudio al Segmento Usuario (ver Fig. 4), que es en definitiva el beneficiario final de todo este proceso. Al momento de seleccionar las estaciones GPS permanentes de control, un grupo de estaciones fueron separadas para cumplir la función de usuarios del sistema. Las mediciones de estas estaciones fueron pre-procesadas de igual forma que las correspondientes a las estaciones de control, obteniendo de esta manera errores ionosféricos medidos que afectan a las distancias a los satélites GNSS de las estaciones del Segmento del Usuario. Estas determinaciones son las que permiten evaluar la calidad de predicción de la corrección y de su integridad, que se puede alcanzar con el mensaje de aumentación.

La evaluación se puede hacer en base a dos criterios. El primero se realiza sobre la corrección ionosférica en sí misma,

comparando el efecto medido con el valor calculado; el segundo se centra en el efecto que la diferencia tiene en la determinación de la posición. Precisamente, este ha sido el criterio adoptado para este estudio.

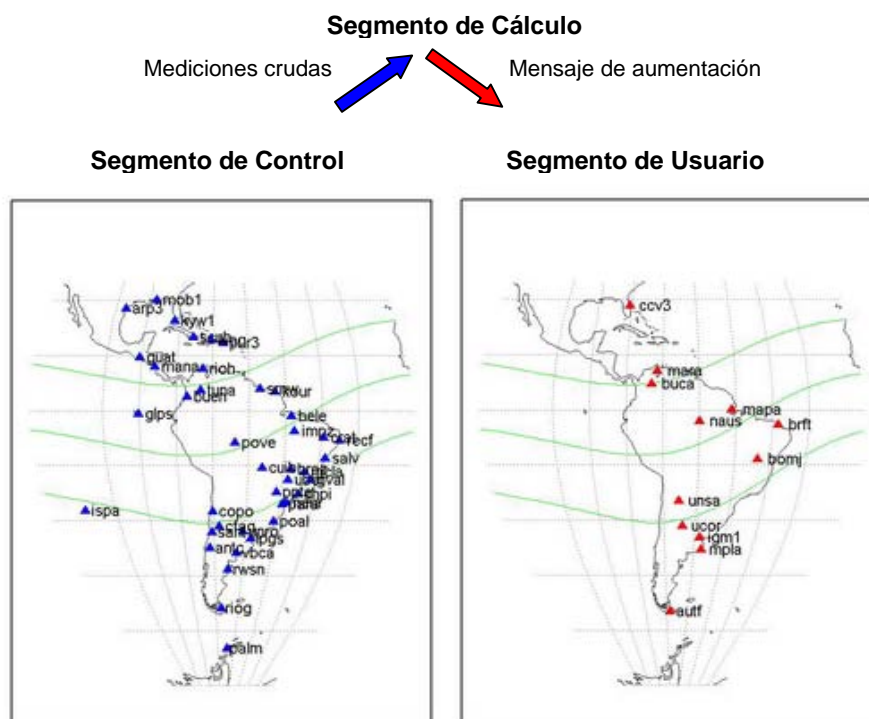


Figura 4. Esquema del escenario de procesamiento elegido para este estudio.

En resumen el procesamiento de la información se puede dividir en las siguientes etapas:

### **Etapas I: Pre-Procesamiento**

Los archivos de datos (archivos RINEX) son verificados y filtrados, de manera de eliminar errores aparecidos durante los procesos de medición y conversión de formatos.

Los archivos RINEX son procesados obteniendo observaciones ionosféricas crudas (sin calibrar) a partir de la combinación de observaciones de doble frecuencia. Los datos son procesados para la detección y reparación de posibles saltos de ciclo en las observaciones de fase. Finalmente, los datos son calibrados utilizando un algoritmo-software desarrollado por nuestro

laboratorio. El resultado de esta etapa son archivos con observaciones ionosféricas calibradas.

### **Etapa II: Procesamiento**

Los archivos de las estaciones de referencia obtenidos en la Etapa I, son procesados utilizando un algoritmo-software basado en la utilización de filtros Kalman adaptados que permite calcular un mensaje de aumentación cada 5 minutos.

### **Etapa III: Post-Procesamiento**

Para cada estación del Segmento del Usuario se calculan las diferencias entre el retardo medido y el retardo calculado a partir del mensaje de aumentación, es decir la corrección ionosférica. Esta diferencia representa al error ionosférico verdadero que se comete al aplica el valor dado por el modelo. Al mismo tiempo, el mensaje de aumentación permite calcular una cota al error del retardo calculado, o en otras palabras permite determinar la integridad de la corrección.

## **EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS CORRECCIONES**

La etapa de análisis y evaluación de la calidad del mensaje de aumentación se basó en el criterio que mas interesa a los fines prácticos de un sistema de aumentación: la calidad de la corrección y la integridad cuando éstas son utilizadas para calcular una posición corregida por ionosfera. Para esto, el error verdadero y el estimador del error fueron propagados a las coordenadas utilizando la configuración verdadera de satélites GPS, momento a momento. En particular, este informe se focalizó sobre la coordenada altura, ya que esta es la mas sensible a los errores ionosféricos.

Los resultados se pueden presentar en diversos tipos de gráficos, por ejemplo series temporales del comportamiento de las coordenadas horizontal y vertical como función del tiempo universal; histogramas de las componentes horizontal y vertical; o también en forma de tablas de porcentajes.

Sin embargo, el gráfico más significativo es el que permite a un tiempo evaluar la calidad de la corrección, conjuntamente con la estimación del error de esta. Este gráfico muestra la integridad del sistema consiste en graficar el error medido sobre el eje de las abscisas y la estimación del error en el eje de las ordenadas. Los Apéndices A y B, muestran la serie completa de estos gráficos.

### ELECCIÓN DE LOS DÍAS PROCESADOS

Con el propósito de evaluar el comportamiento del mensaje de aumentación para diferentes condiciones ionosféricas que se presentan a lo largo de un año, se seleccionaron datos de doce semanas representativas que van desde mayo de 2006 a mayo de 2007. Los criterios de selección utilizados tuvieron en cuenta: i) todas las semanas mostraron actividad geomagnética baja; y ii) la disponibilidad y calidad de los datos de las estaciones GPS permanentes fue entre media y alta.

La tabla siguiente detalla las fechas correspondientes a cada semana analizada:

Semana	Inicio	Final
01	11/05/06	17/05/06
02	20/06/06	26/06/06
03	17/07/06	23/07/06
04	10/08/06	17/08/06
05	09/09/06	15/09/06
06	03/10/06	09/10/06
07	14/11/06	20/11/06
08	26/12/06	02/01/07
09	22/01/07	28/01/07
10	19/02/07	25/02/07
11	15/03/07	21/03/07
12	05/04/07	11/04/07

**Tabla 1.** Fecha de inicio y finalización de las doce semanas analizadas.

## CONCLUSIONES

El presente trabajo es el primer estudio enfocado a la evaluación de la calidad de la corrección ionosférica y su integridad para la región Caribe, Centro y Sur América considerada como bloque. A continuación se enumeran las características del trabajo y se detallan las conclusiones principales que se obtienen.

i) El trabajo plantea como escenario de estudio una configuración real para la red de monitoreo de la corrección ionosférica con una distribución de estaciones que abarca, de la forma mas homogénea posible, todo la superficie geográfica cubierta por la región Caribe, Centro y Sur América.

ii) Una característica destacada del trabajo es que la evaluación se realiza sobre observaciones reales recolectadas por las redes de estaciones de control y del usuario, es decir que el análisis se basa en observaciones obtenidas en las mismas condiciones en las que un futuro sistema de aumentación para región deberá funcionar.

Muchos estudios realizados hasta el presente, proponen escenarios simulados a partir de modelos de ionósfera empíricos (IRI, NeQuick, etc.) o bien de pseudo-observaciones del TEC reconstruidas a partir de mapas globales de TEC calculados por centros internacionales de la especialidad, por ejemplo los mapas IONEX del Center for Orbit determination in Europe (CODE, University of Bern). Si bien estos trabajos permiten adquirir conocimiento de ciertos aspectos de las dificultades de un sistema SBAS para la región CAR/SAM, el comportamiento real del TEC ionosférico diferirá del predicho por el modelo, ya que los modelos ionosféricos reflejan la formulación físico-matemática con la que fueron desarrollados.

El análisis de observaciones directas implica un grado de complejidad mayor ya que se ponen en juego todos los factores que influyen en la calidad de los resultados, muchos de los cuales son tenidos en cuenta a priori y pueden ser simulados cuando se trabaja con escenarios simulados; pero existen muchos otros que

son parcialmente conocidos o posiblemente desconocidos que afectarán la solución y, debido a esto, no es posible simularlos.

Al mismo tiempo, el estudio ha generado y hecho uso de una extensa base de datos de observaciones GPS de estaciones de la región Caribe, Centro y Sur América, compuesta por varias estaciones cuyas observaciones se encuentran públicamente disponibles, y de otras tantas que son de acceso restringido.

**iii)** Como se mencionó en la introducción de esta parte del trabajo, el error ionosférico no es el único que afecta la señal transmitida por los satélites GPS, aunque sea el error dominante y mas complejo para corregir. Los procedimientos utilizados para el trabajo permitieron aislar el error producido por el TEC ionosférico de los otros errores, objetivo principal del trabajo.

**iv)** Los procedimientos aplicados para el procesamiento de las observaciones incluyeron un algoritmo de Filtros Kalman robusto de predicción de la corrección. Este tipo de algoritmo se encuentra presente en todas las aplicaciones críticas de procesamiento de información en tiempo real de sistemas de alta complejidad; y es el utilizado por los sistemas de aumentación que actualmente se encuentran en operación.

**v)** El análisis puso particular atención en el cálculo y comportamiento de la información de integridad de los mensajes de aumentación generados. Es decir por cada corrección ionosférica calculada y aplicada a las estaciones de la red de usuario a partir del mensaje de aumentación, se estimó una cota para el error en la determinación; y el efecto de estas en la determinación de las coordenadas.

**vi)** Debido a la amplia cobertura de las observaciones analizadas en el estudio, fue posible evaluar el comportamiento de las correcciones e integridad según distintas regiones geográficas o geomagnéticas.

**vii)** El periodo de tiempo que abarca el estudio es de un año, cubriendo de esta manera todas las configuraciones relativas del sistema sol – tierra y por consecuencia, toda la complejidad que

presenta el TEC a lo largo de un año. En adición a esto, el diseño del estudio contempló el análisis de una semana por mes, dentro del año estudiado, lo que permitió tener un seguimiento detallado del comportamiento de la corrección ionosférica y de su integridad, detectando los meses de mayor dificultad para la representación.

Los gráficos de integridad presentados en el Apéndice B, indican que entre las semanas 6 y 8, la dispersión tanto del error verdadero como del estimado, aumenta significativamente. Este hecho tiene una explicación física, que está asociada a la configuración del sistema sol-tierra, o en otras palabras al paso de las estaciones. El periodo que va desde la semana 6 a la 8 corresponde al verano del hemisferio austral, es decir que el sol se encuentra hacia el sur del ecuador geográfico, teniendo como resultado que la distribución del TEC en este hemisferio sea más compleja para modelar.

**viii)** La misma conclusión mencionada en el punto anterior se desprende de los gráficos de integridad desagregados por estación incluidos en el Apéndice A. La mayor dispersión de las soluciones aparece entre las semanas 6 y 8; y esto es particularmente evidente para las estaciones de latitud geomagnética baja.

**ix)** Los resultados obtenidos en el estudio son muy alentadores. Tanto la capacidad de predicción de la corrección y como de su integridad mostrada por los resultados es muy alta. Como se desprende de la Figura 1 del Apéndice A, el 84% de los casos analizados la integridad fue satisfactoria y estuvo entre el 99 y 100% de predicción.

A pesar de esto, el estudio muestra puntos en los que es necesario profundizar y al mismo tiempo marca direcciones para futuros estudios. Entre los temas a profundizar figuran principalmente la necesidad de una mejora del algoritmo de predicción de correcciones e integridad propuesto sobre la región centro y noreste de Brasil, la distribución del TEC muestra el comportamiento mas complejo, ya sea desde un punto de vista de la variación geográfica como desde el punto de vista temporal. Es



también en esta región donde los efectos de centelleo, que es un tema no investigado en este trabajo, tienen mayor frecuencia de ocurrencia.

De los resultados obtenidos surge también la necesidad de la puesta en funcionamiento de un experimento piloto, aunque sea de una dimensión reducida, que abarque por ejemplo una región limitada, en donde un par de estaciones de monitoreo GPS permanente, una funcionando como estación de control y la otra como estación usuario, simulen en tiempo real el funcionamiento de un sistema de aumentación. Al mismo tiempo, este experimento servirá para evaluar el efecto que el nivel creciente de actividad solar, y consecuentemente del nivel de ionización de la ionosfera, esperable para los próximos años, tiene sobre un sistema de aumentación para la región.

La información, tanto los datos como los resultados producidos a partir de este experimento serán de importancia clave para el futuro desarrollo de un sistema de aumentación en esta región.

## APÉNDICE A

### GRÁFICOS DE INTEGRIDAD POR ESTACIÓN

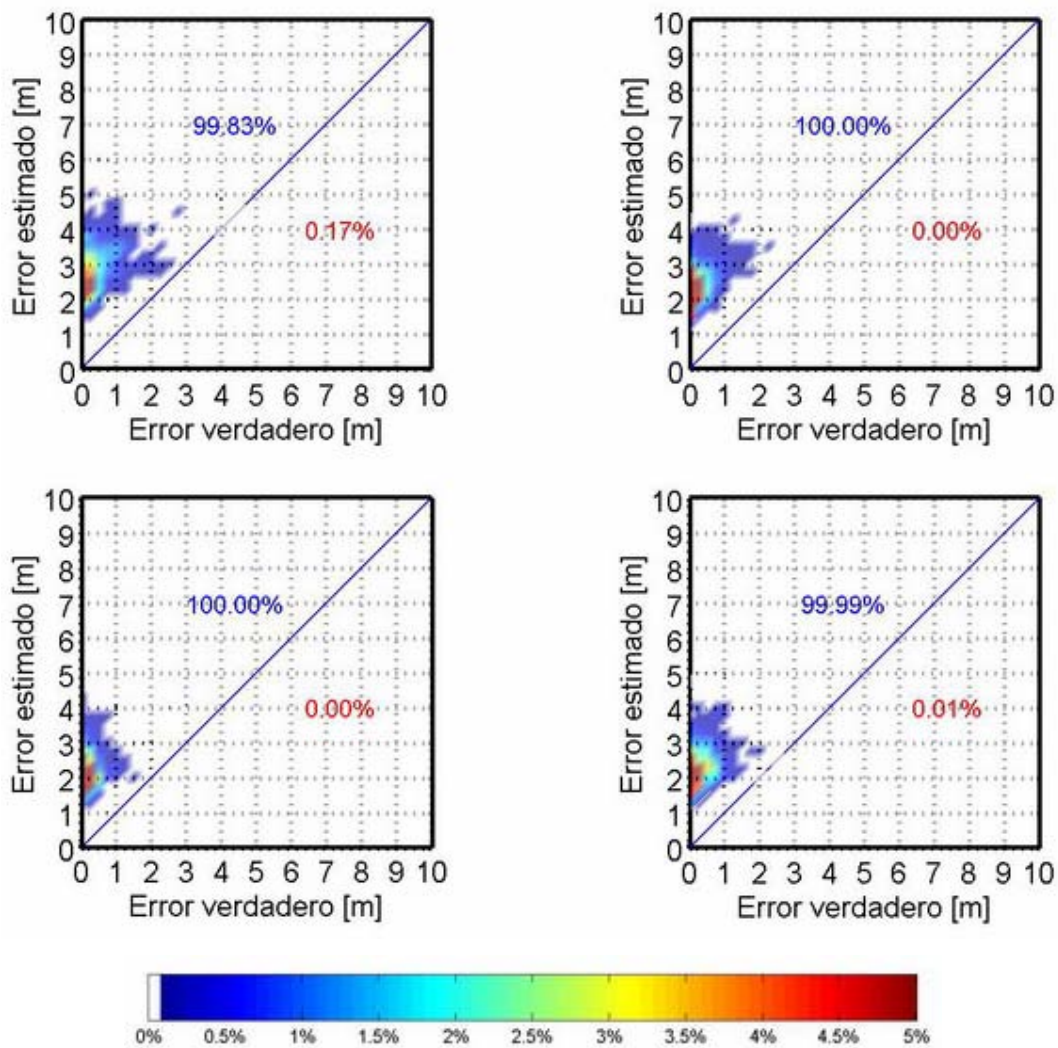
Este Apéndice contiene una serie de gráficos que permiten a un mismo tiempo analizar la calidad de la corrección ionosférica provista por el mensaje de aumentación como también del estimador de su error.

Para facilitar la comprensión de estos gráficos, es importante recordar que la abscisa de cada uno corresponde al error verdadero en la componente vertical (es decir en la coordenada altura), debido al efecto de la ionosfera residual que un usuario del sistema de aumentación tendría; mientras que la ordenada corresponde a la estimación de la cota de dicho error calculada a partir de la información de aumentación. La escala de colores indica el porcentaje de soluciones sobre cada región del gráfico.

A continuación se presentan doce gráficos (uno por cada semana analizada) para cada estación del Segmento de Usuario, agrupadas de cuatro por página. El orden de las semanas es de izquierda a derecha, y de arriba hacia abajo. Los gráficos en blanco indican ausencia de datos pero han sido incluidos para respetar el orden de ubicación.

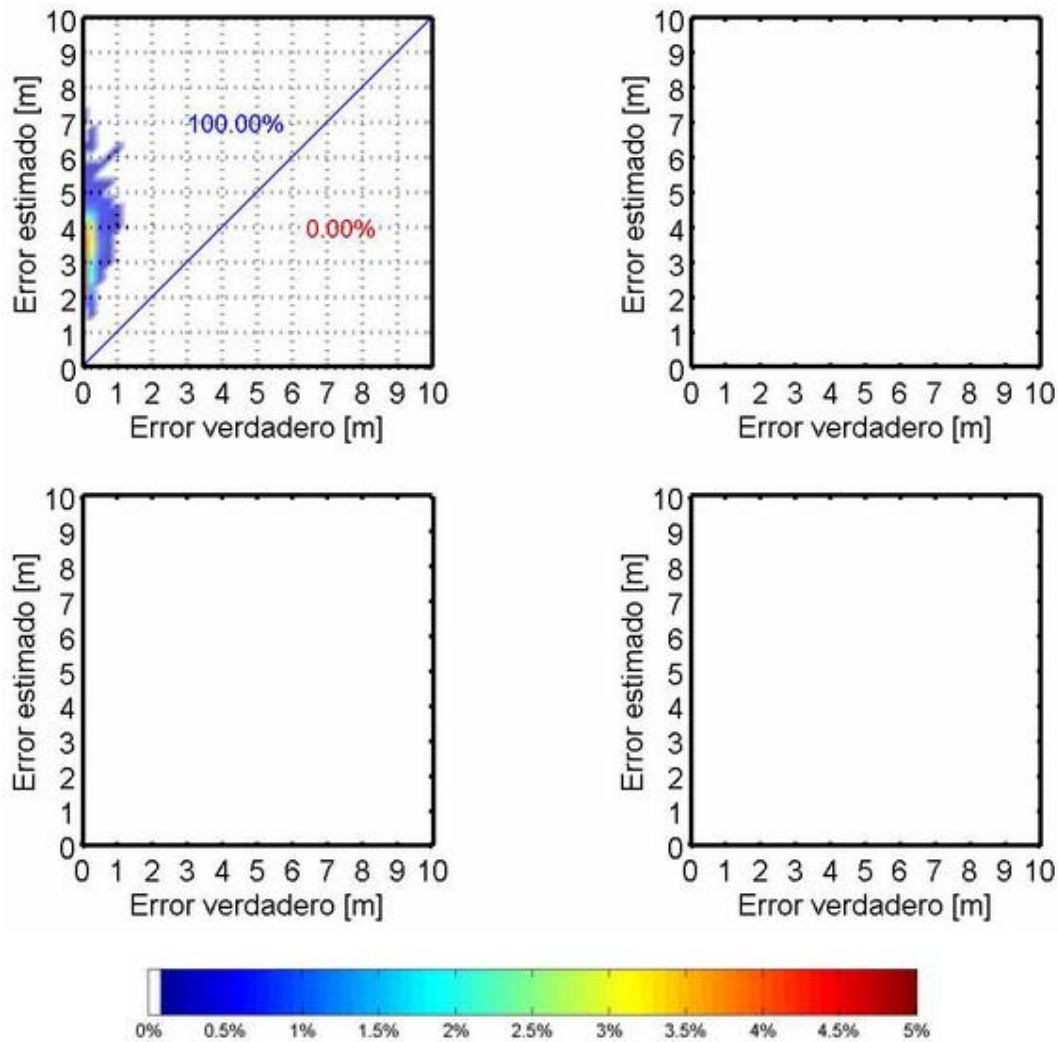
auf

## Semanas 01 - 04



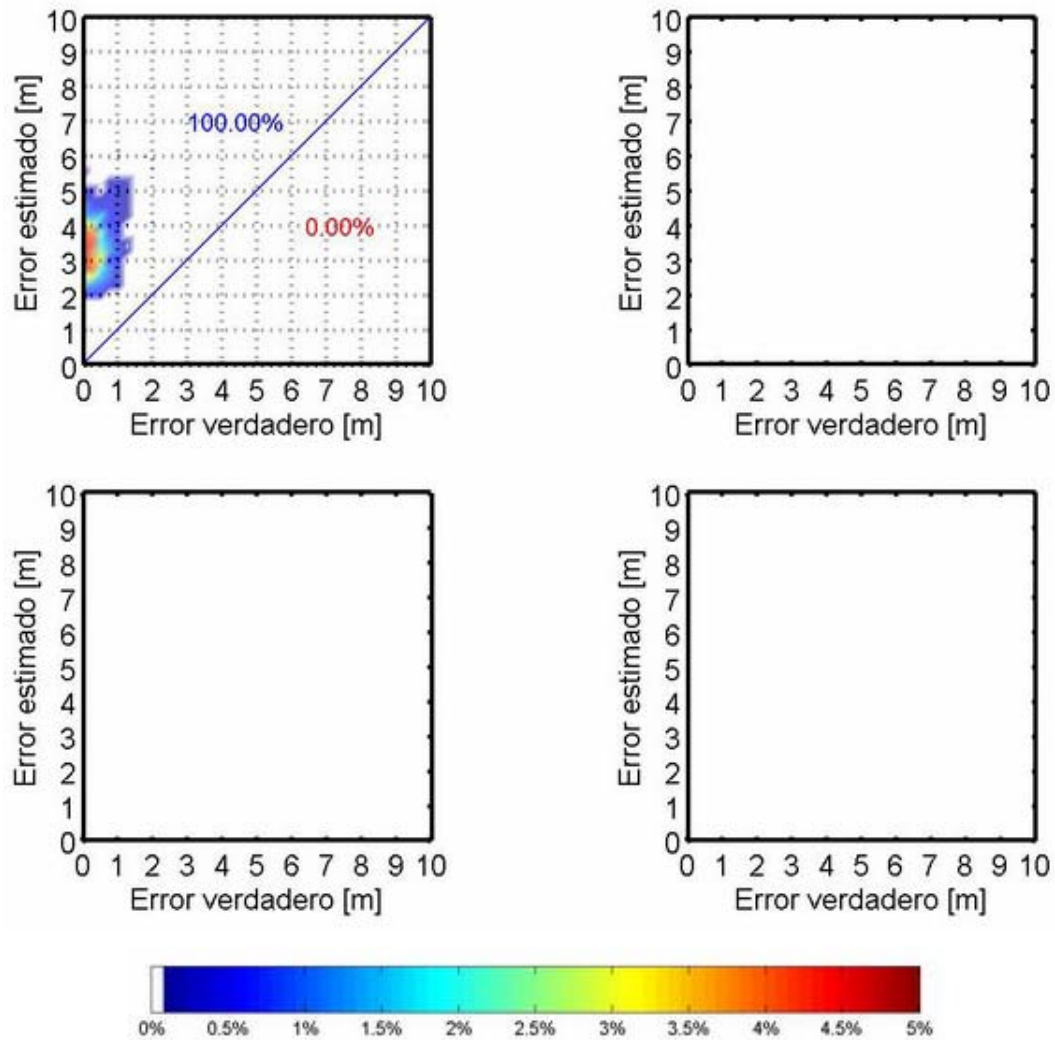
auf

## Semanas 05 - 08



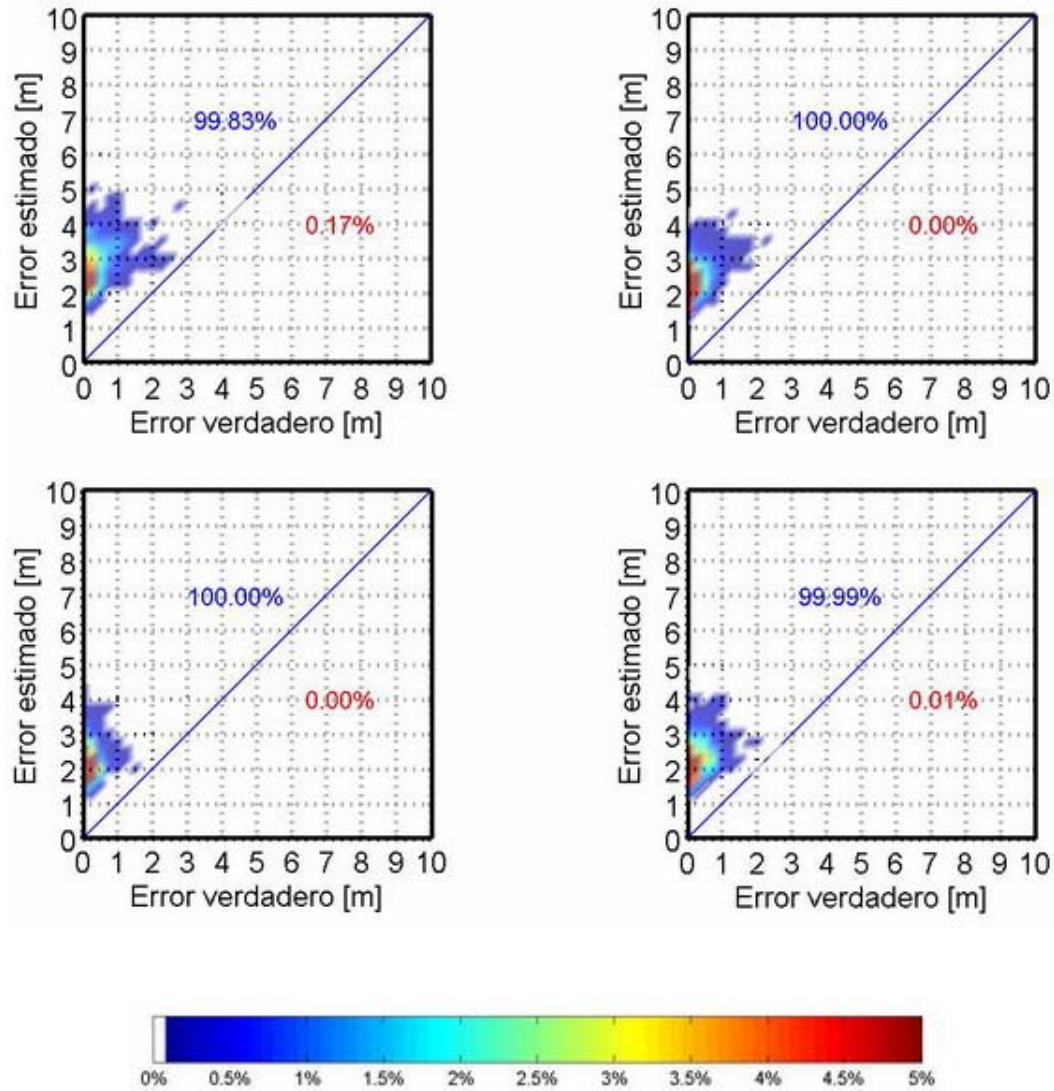
auf

## Semanas 09 - 12



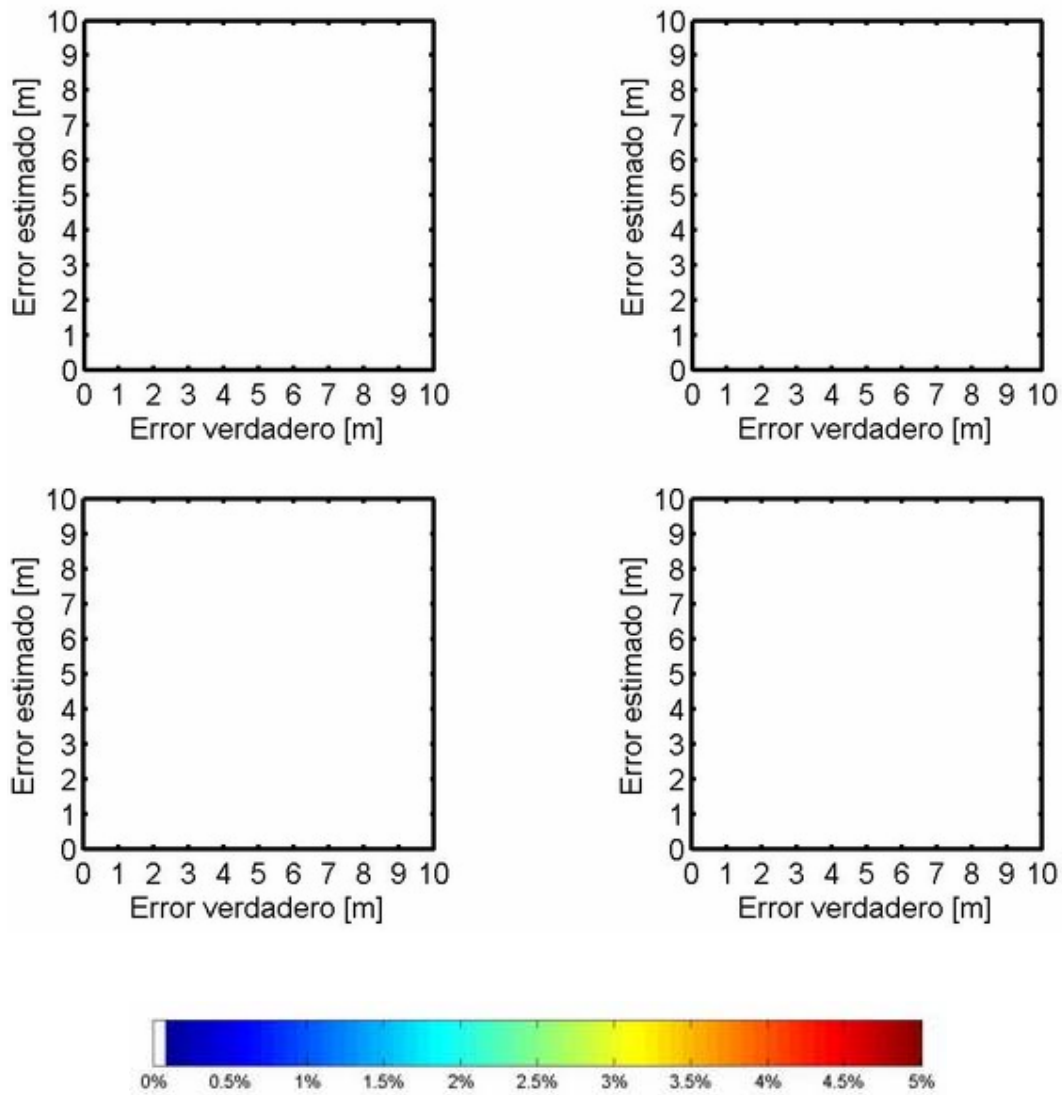
bomj

## Semanas 01 - 04



bomj

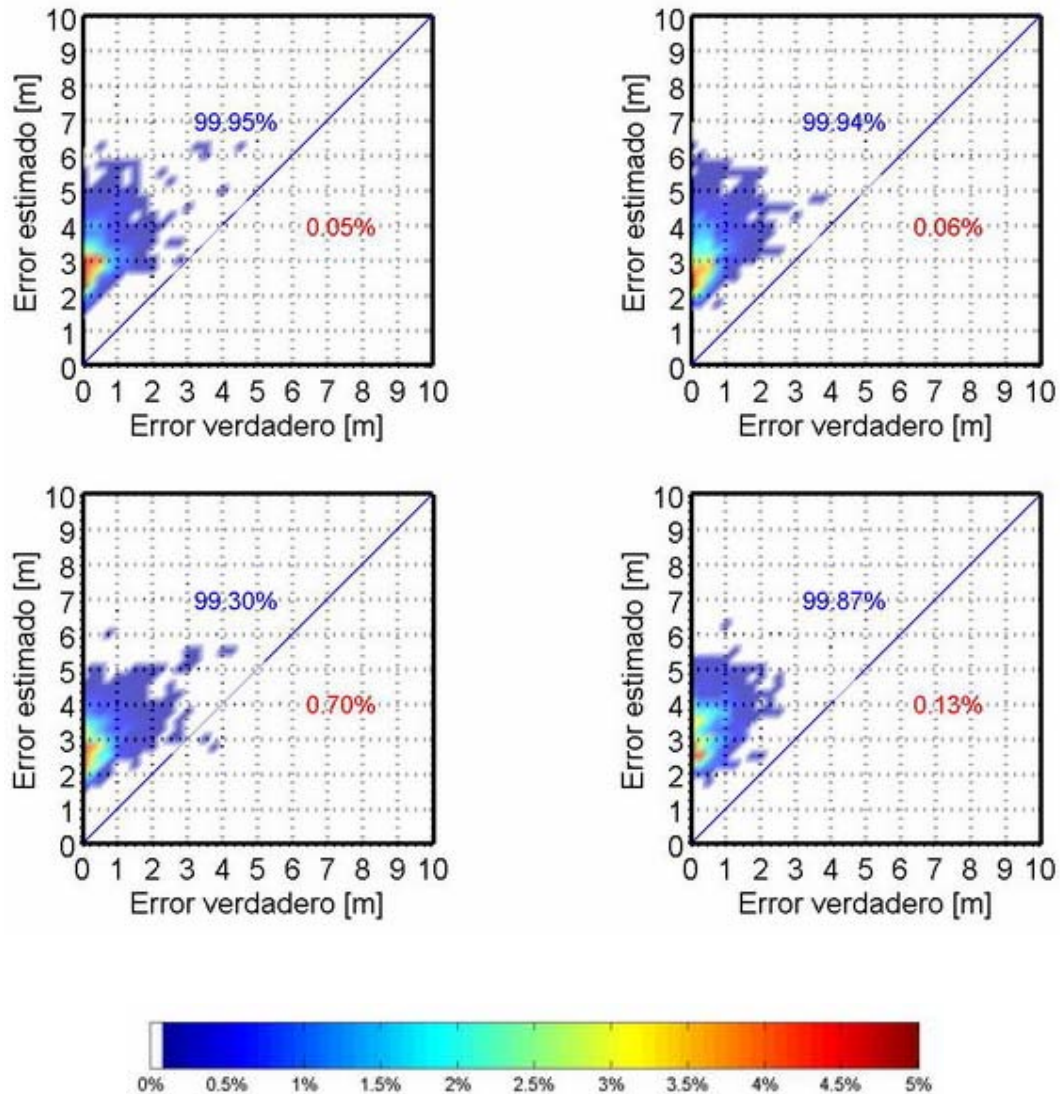
## Semanas 05 - 08





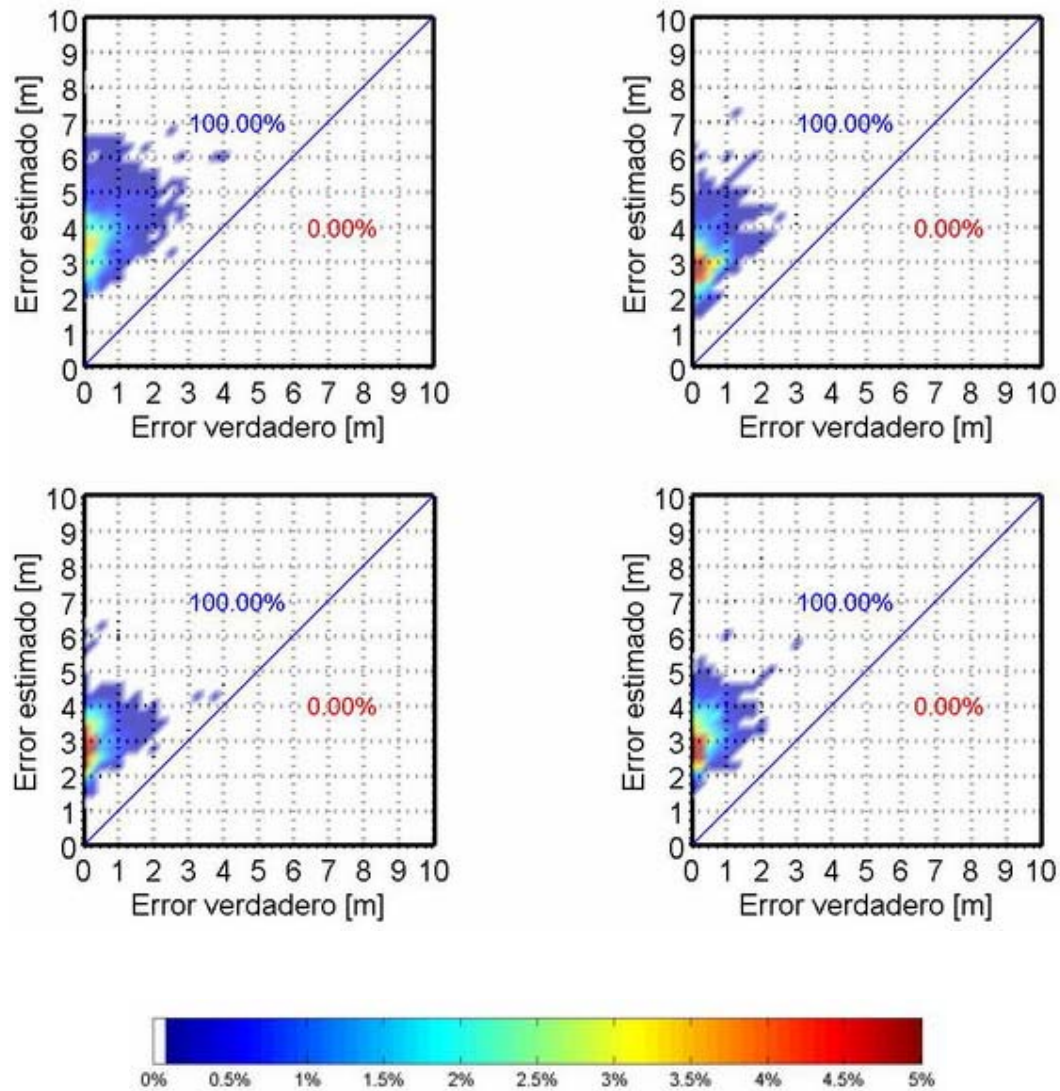
bomj

## Semanas 09 - 12



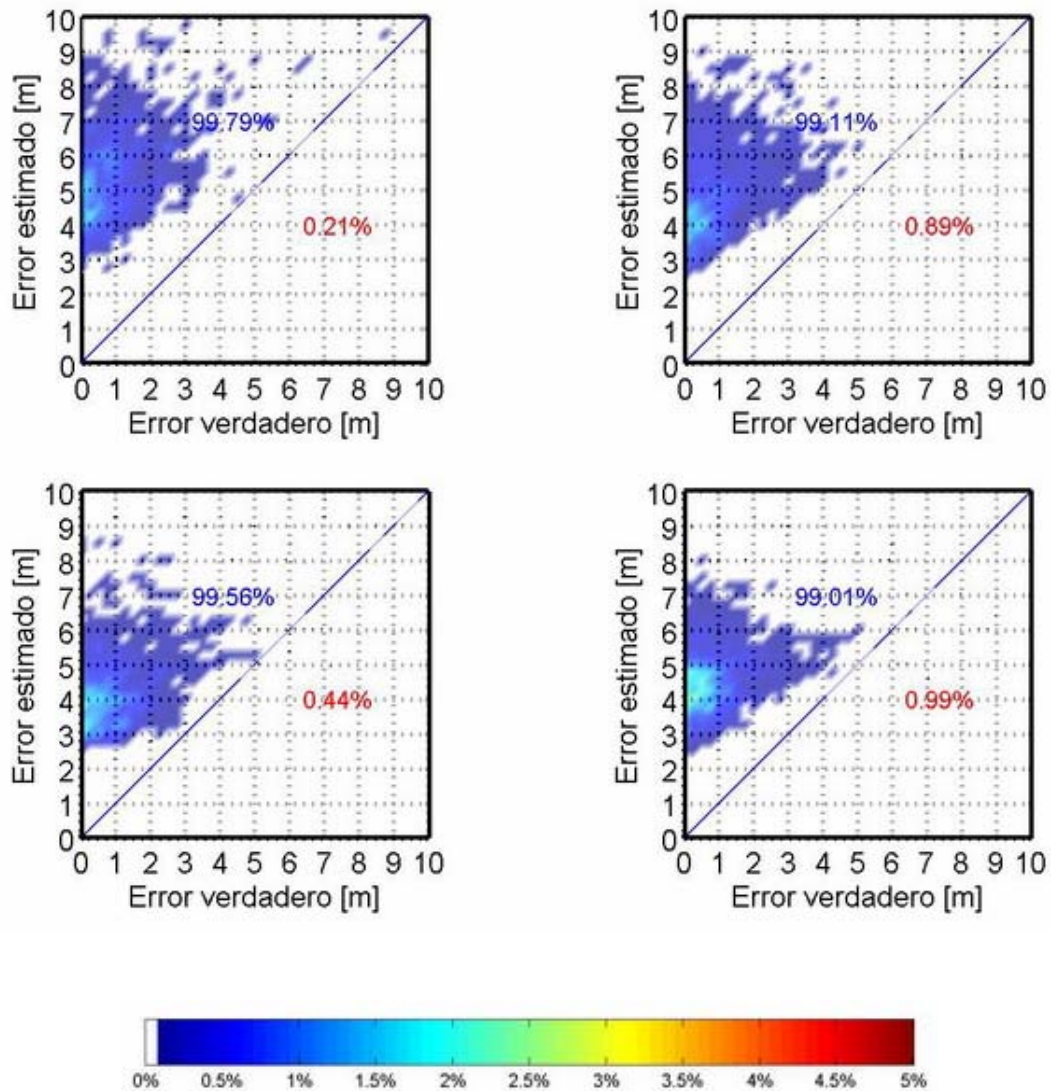
brft

## Semanas 01 - 04



brft

## Semanas 05 - 08

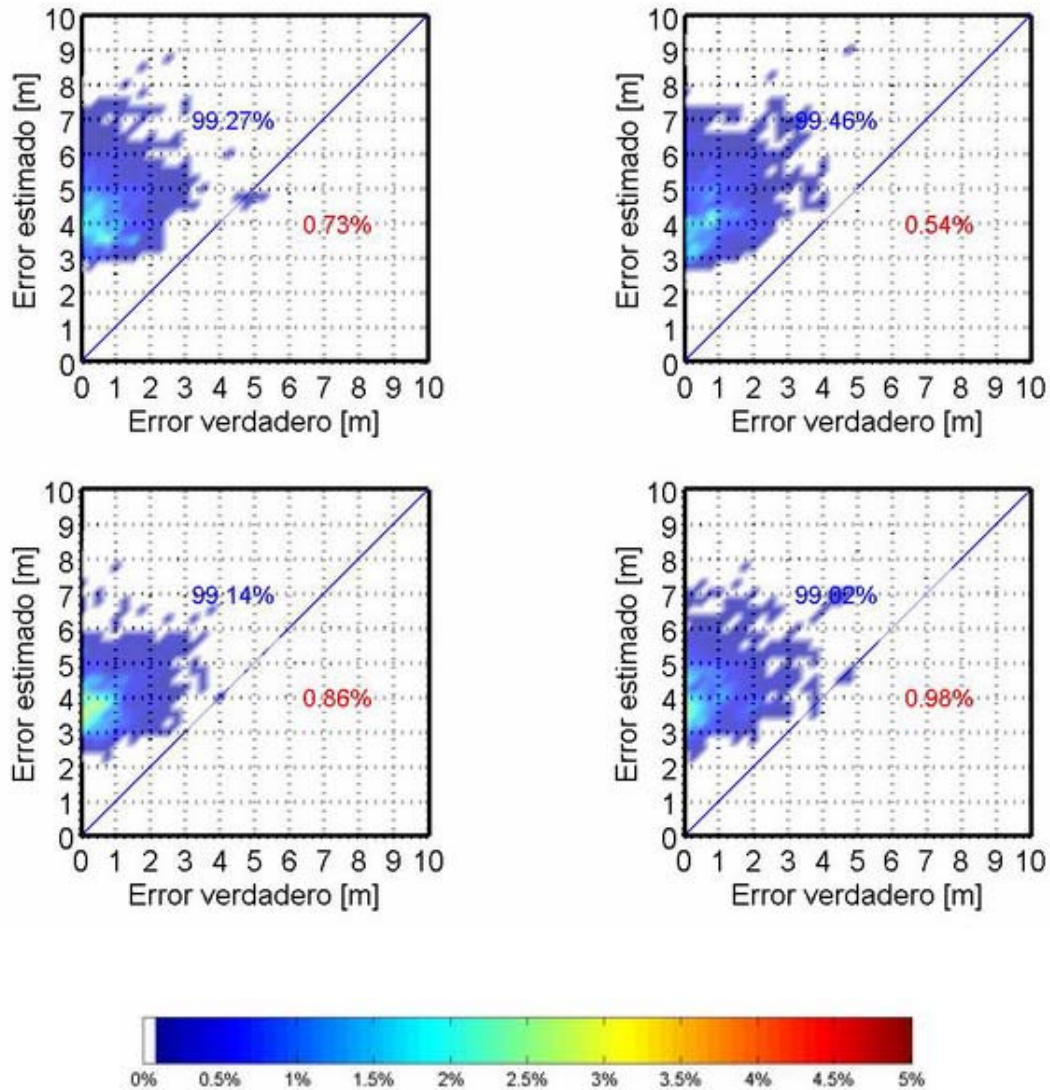


x



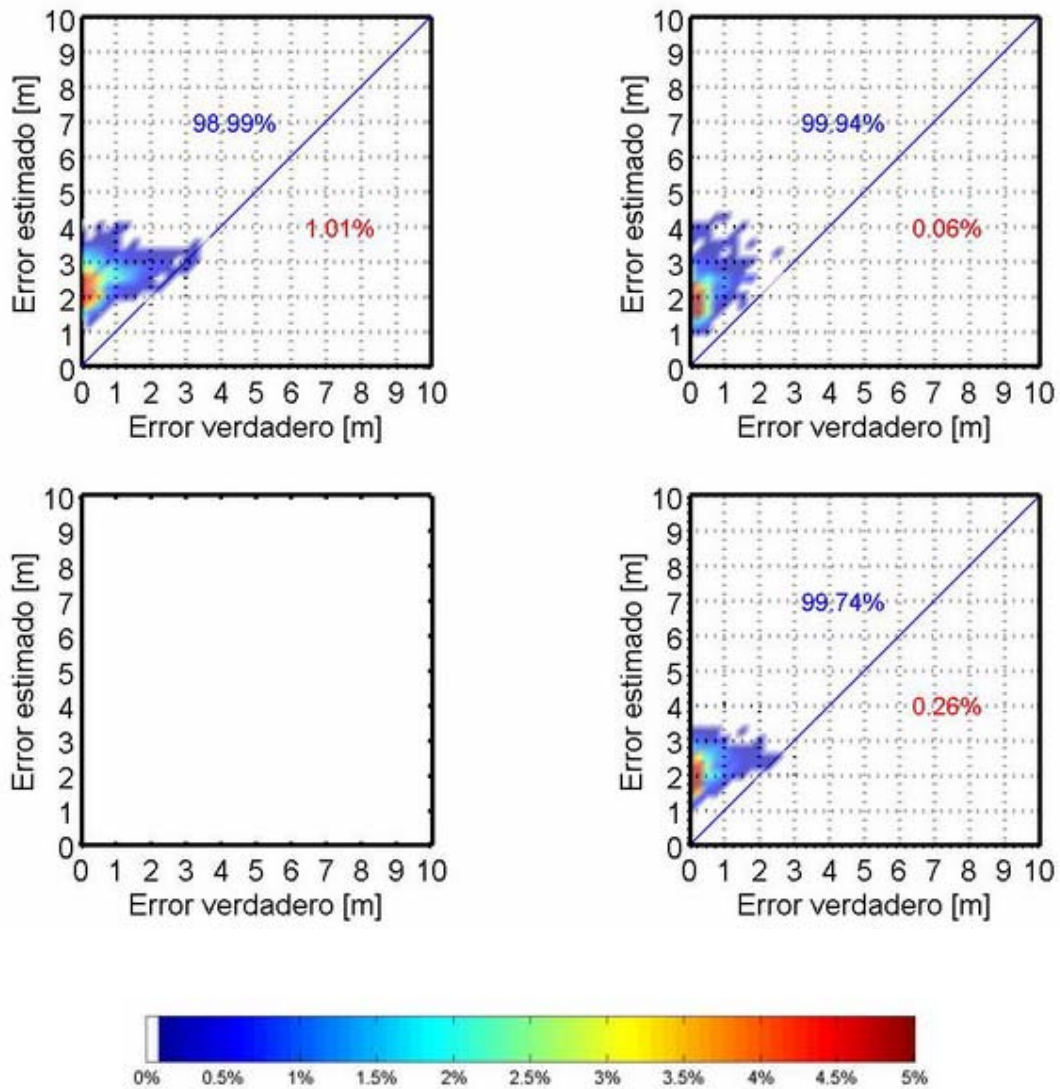
brft

## Semanas 09 -12

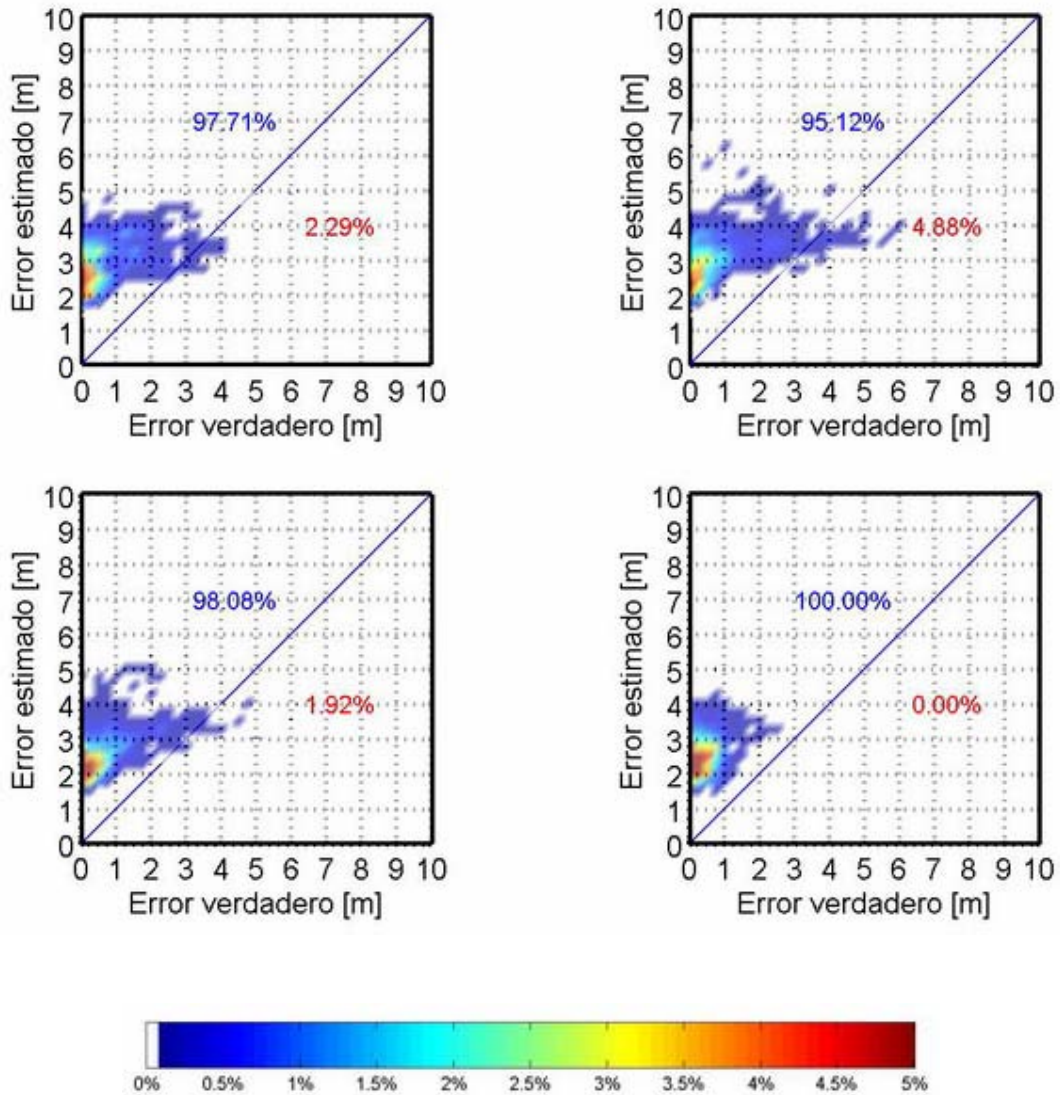


buca

Semanas 01 - 04

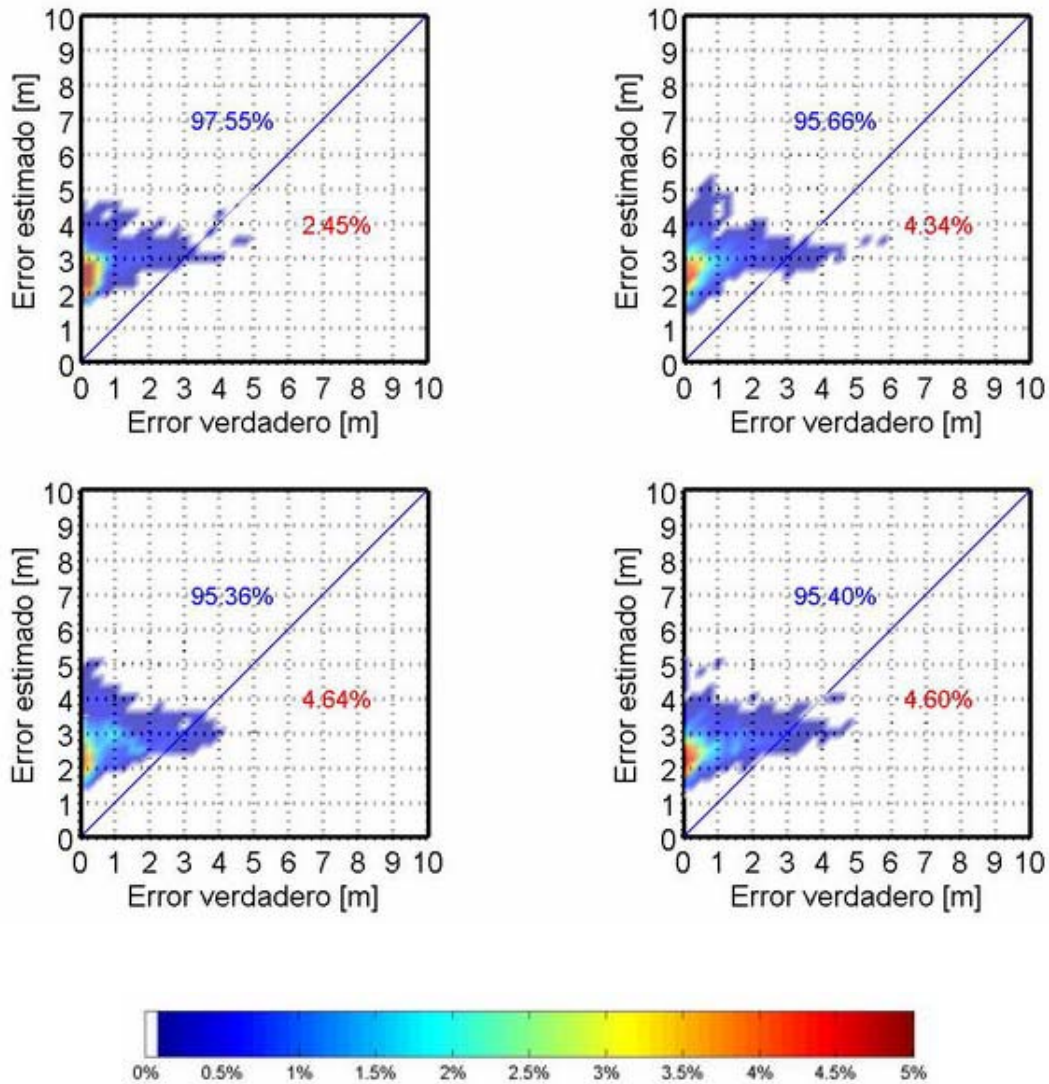


buca  
Semanas 05 - 08



buca

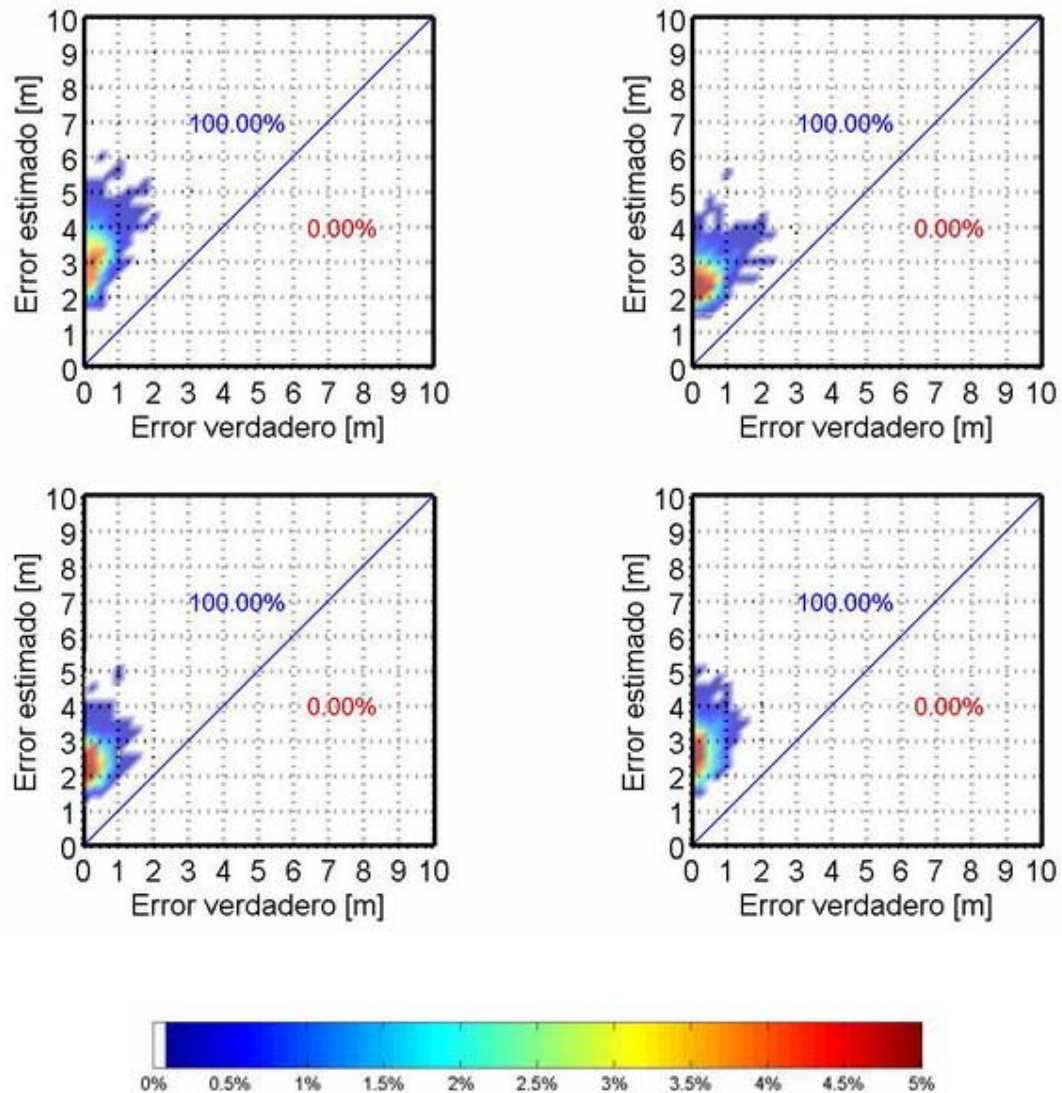
## Semanas 09 - 12





ccv3

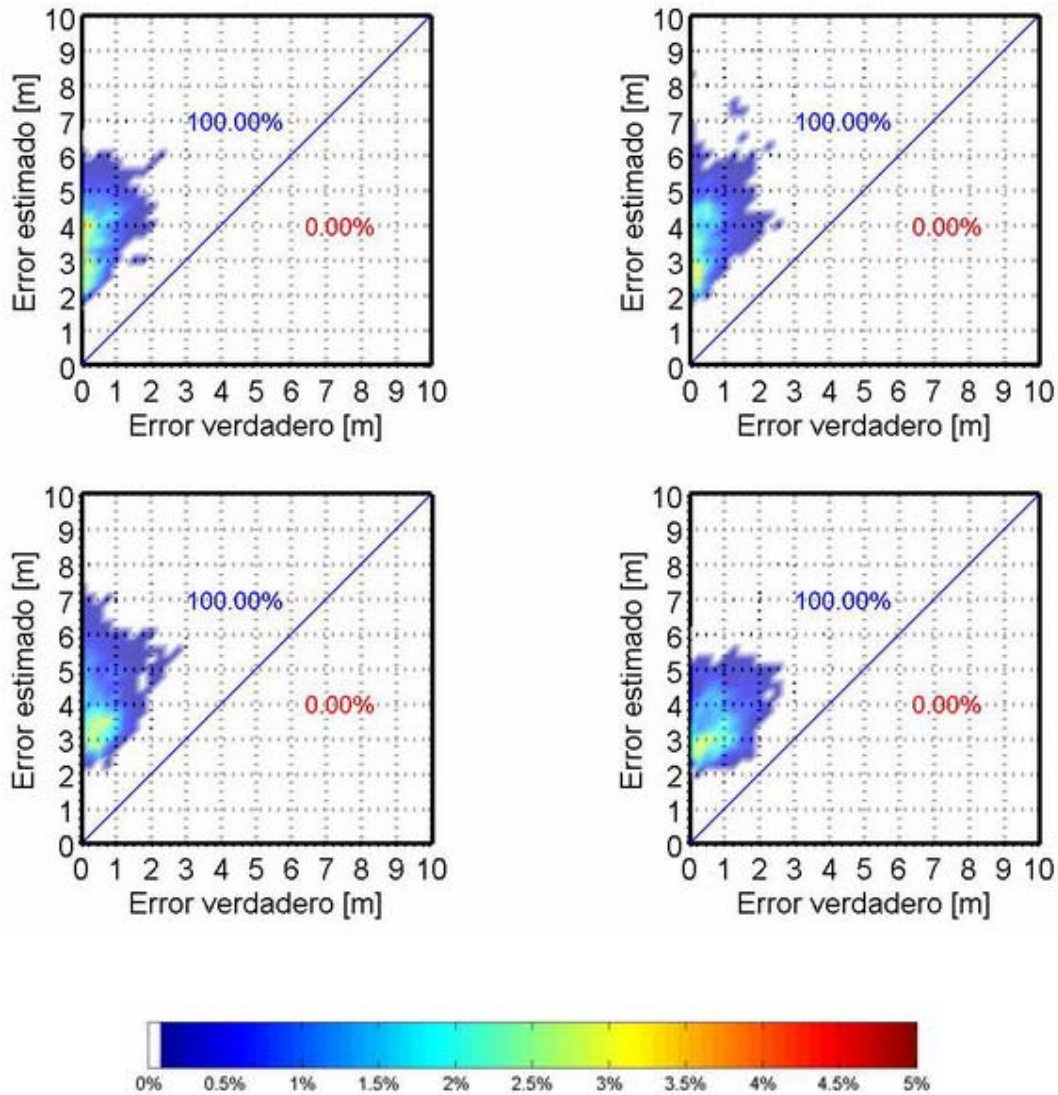
## Semanas 01 - 04





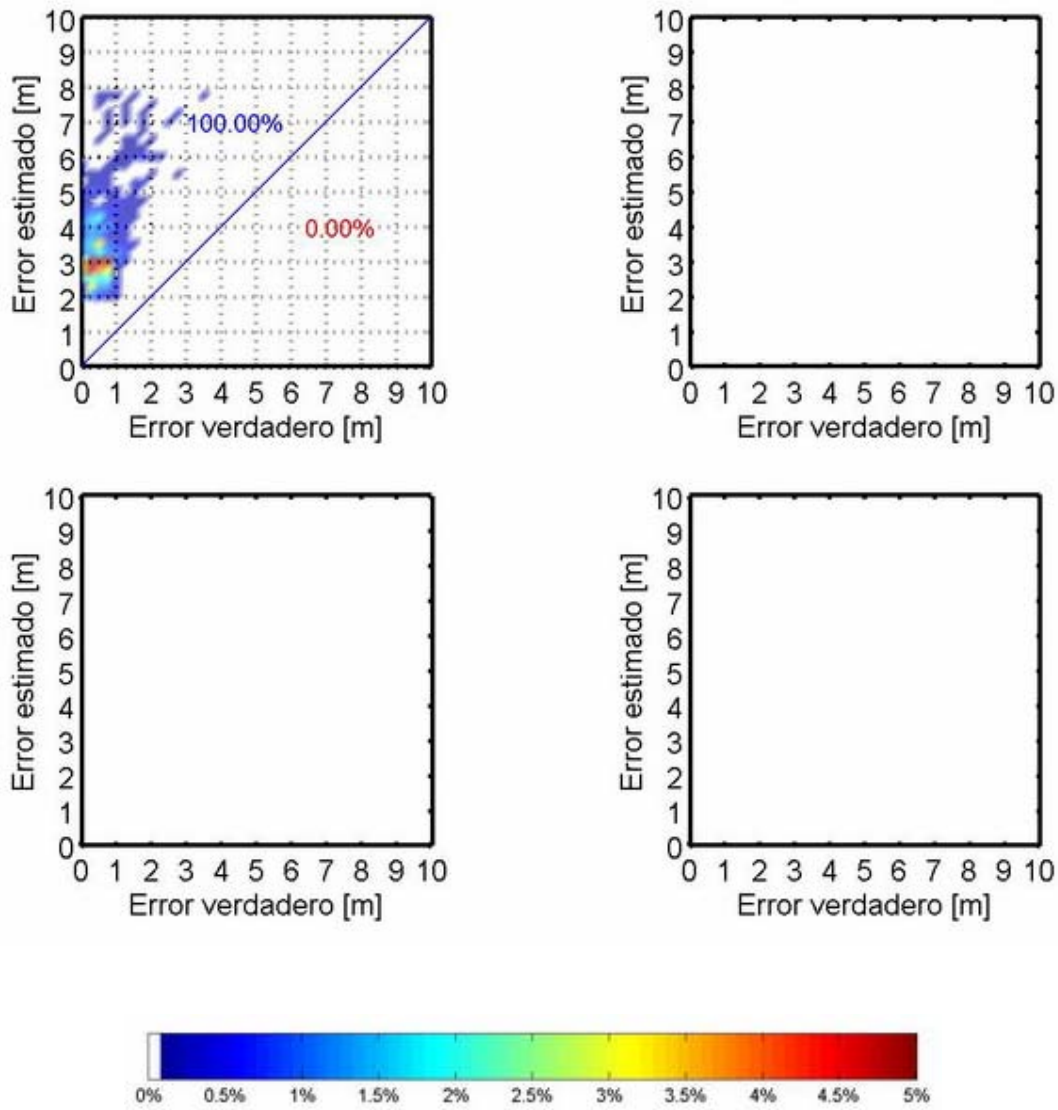
ccv3

## Semanas 05 - 08



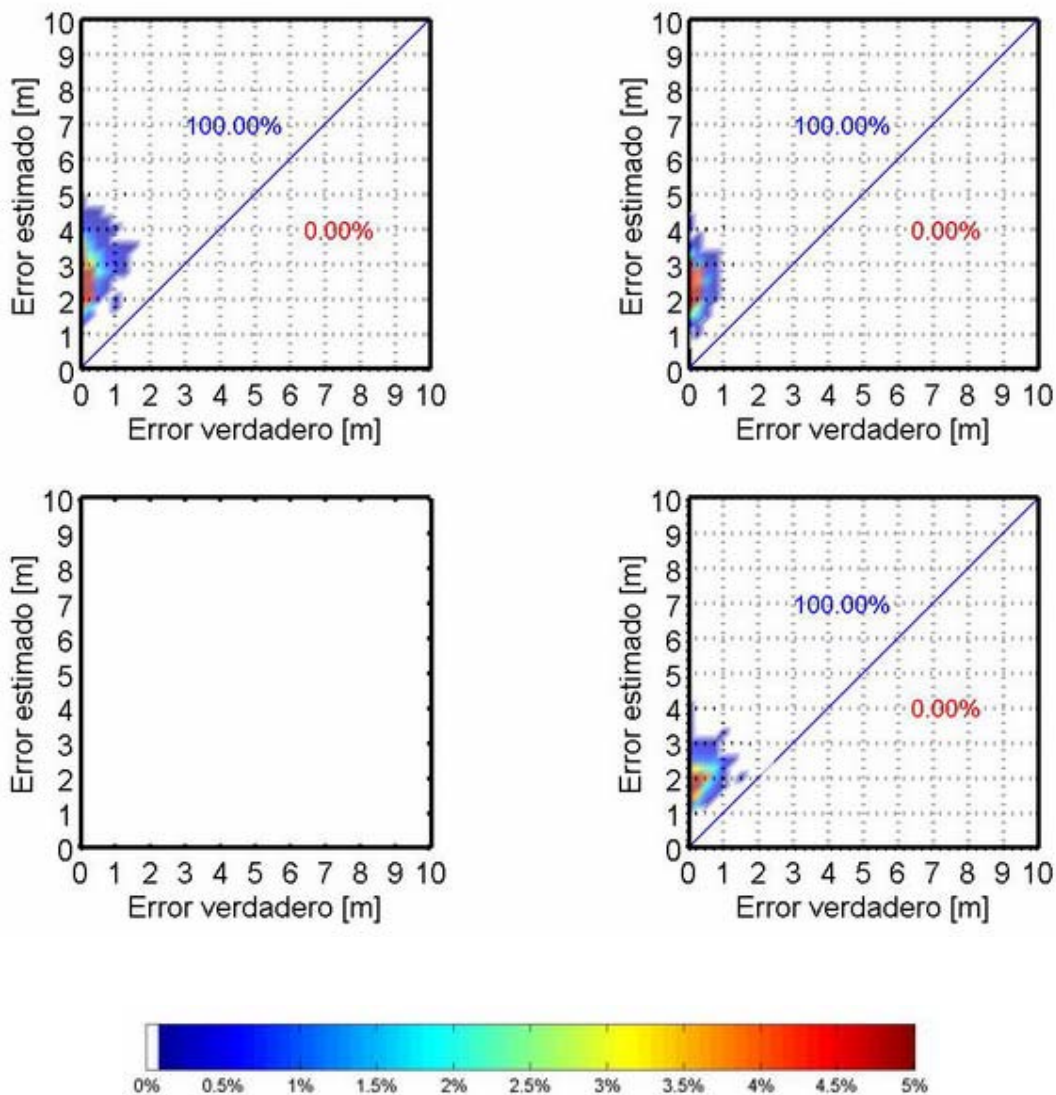
ccv3

## Semanas 09 - 12



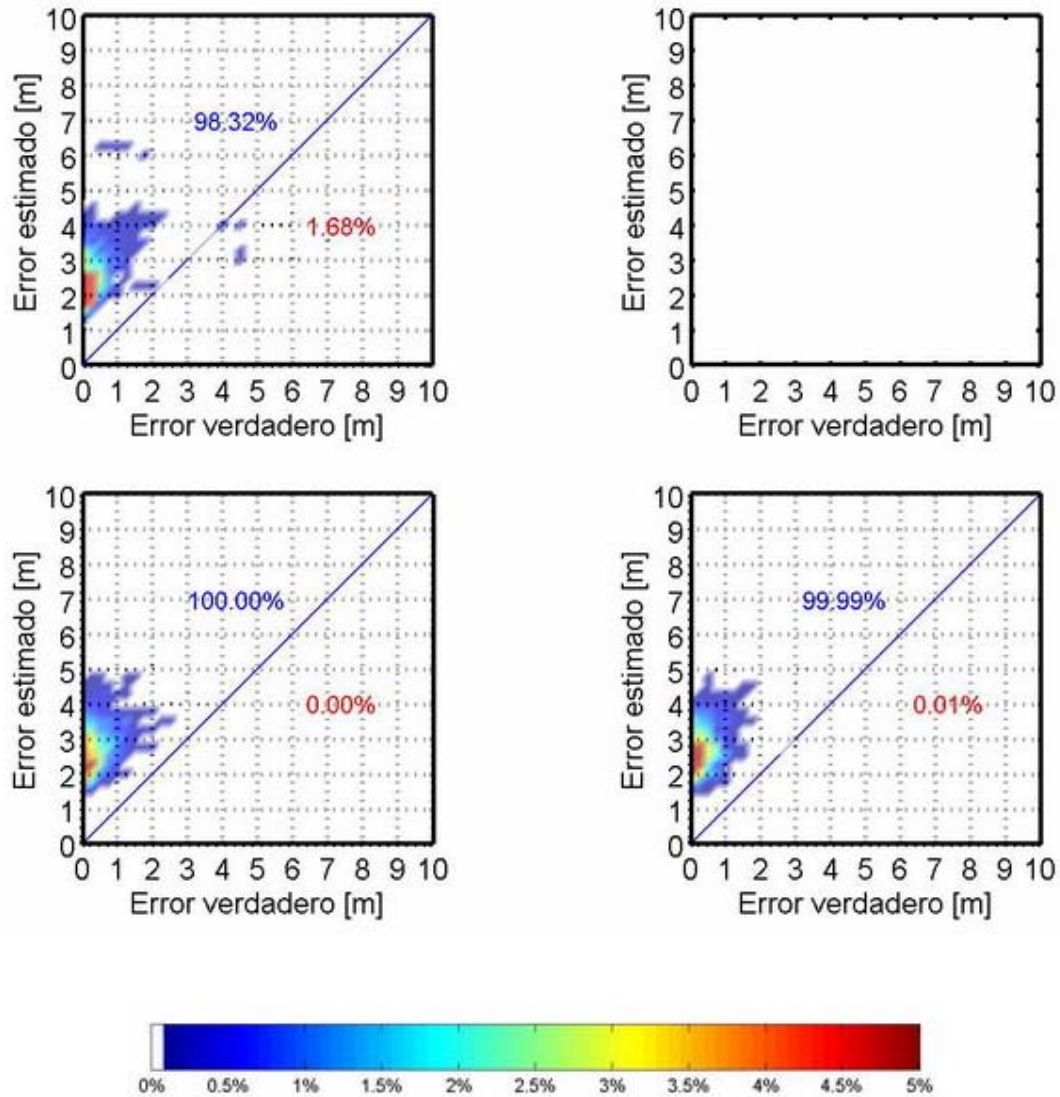
igm1

## Semanas 01 - 04



igm1

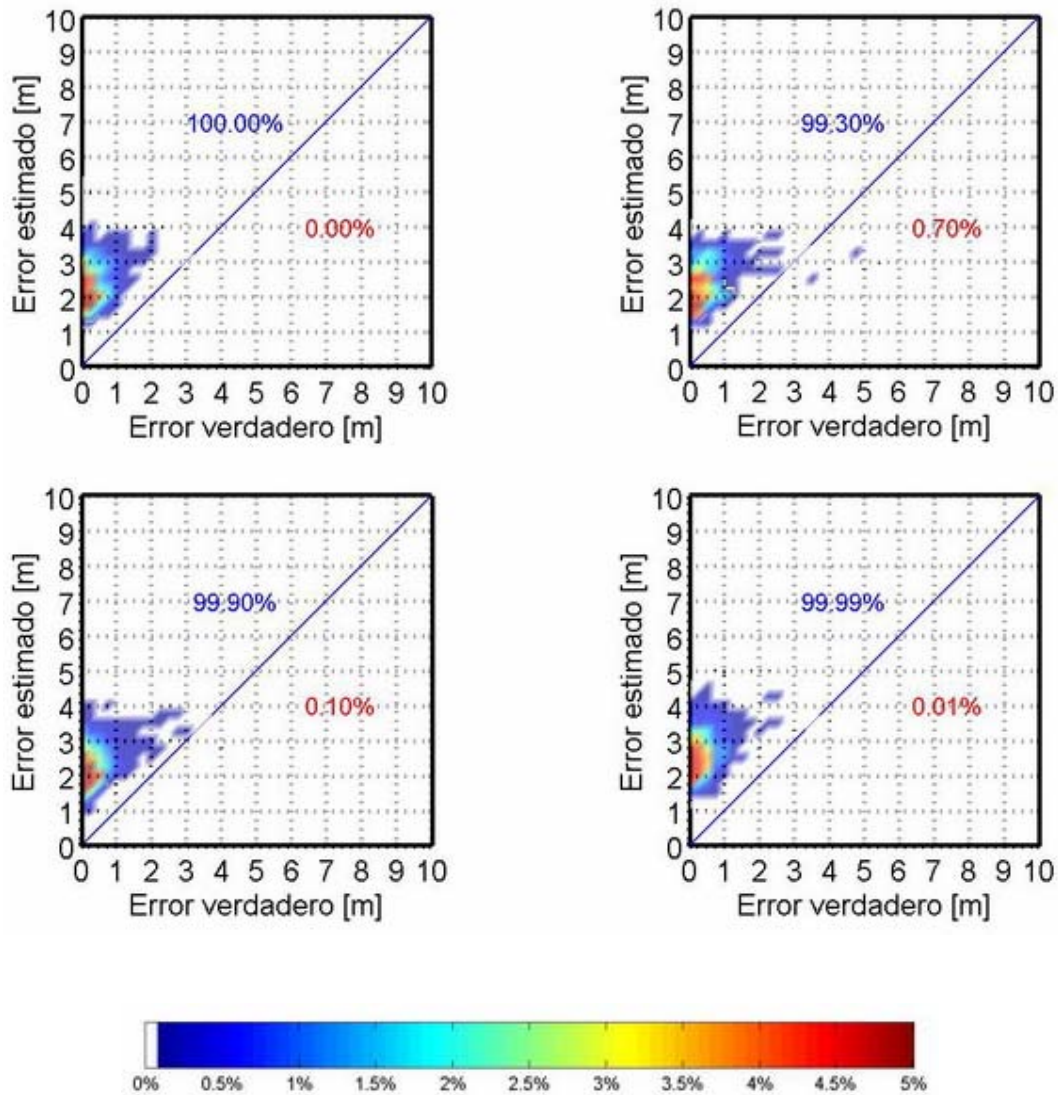
## Semanas 05 - 08





igm1

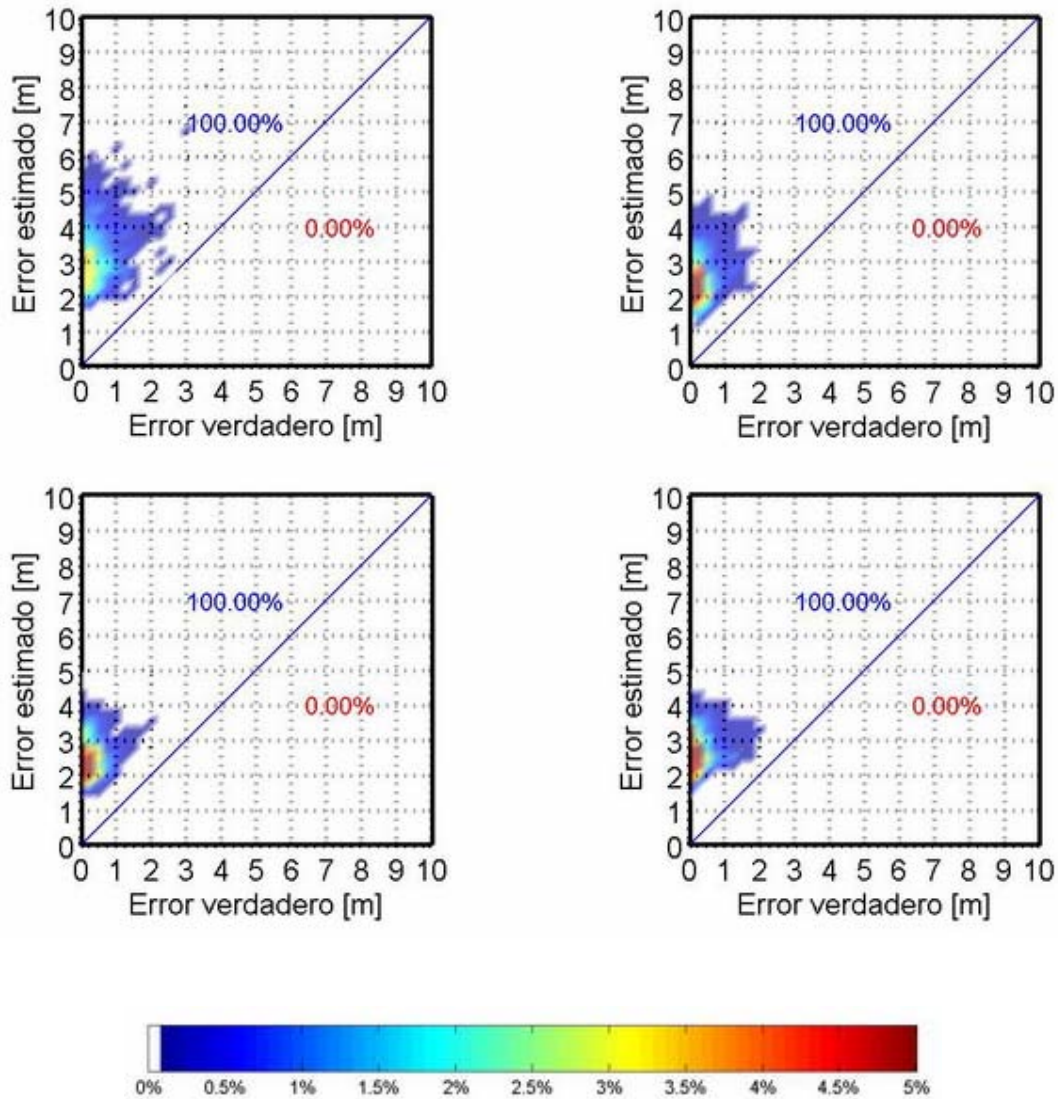
Semanas 09 - 12



xx

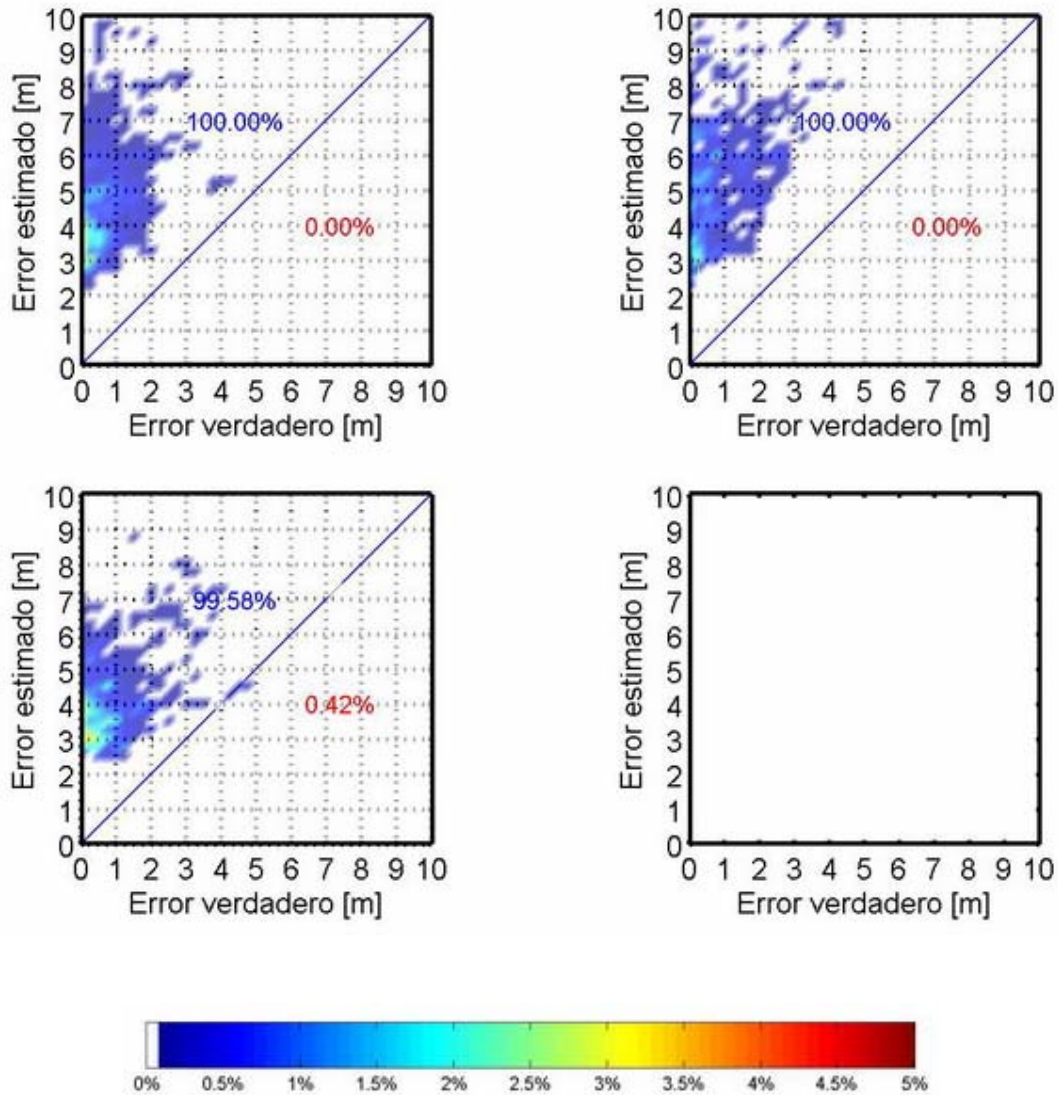
## mapa

### Semanas 01 - 04



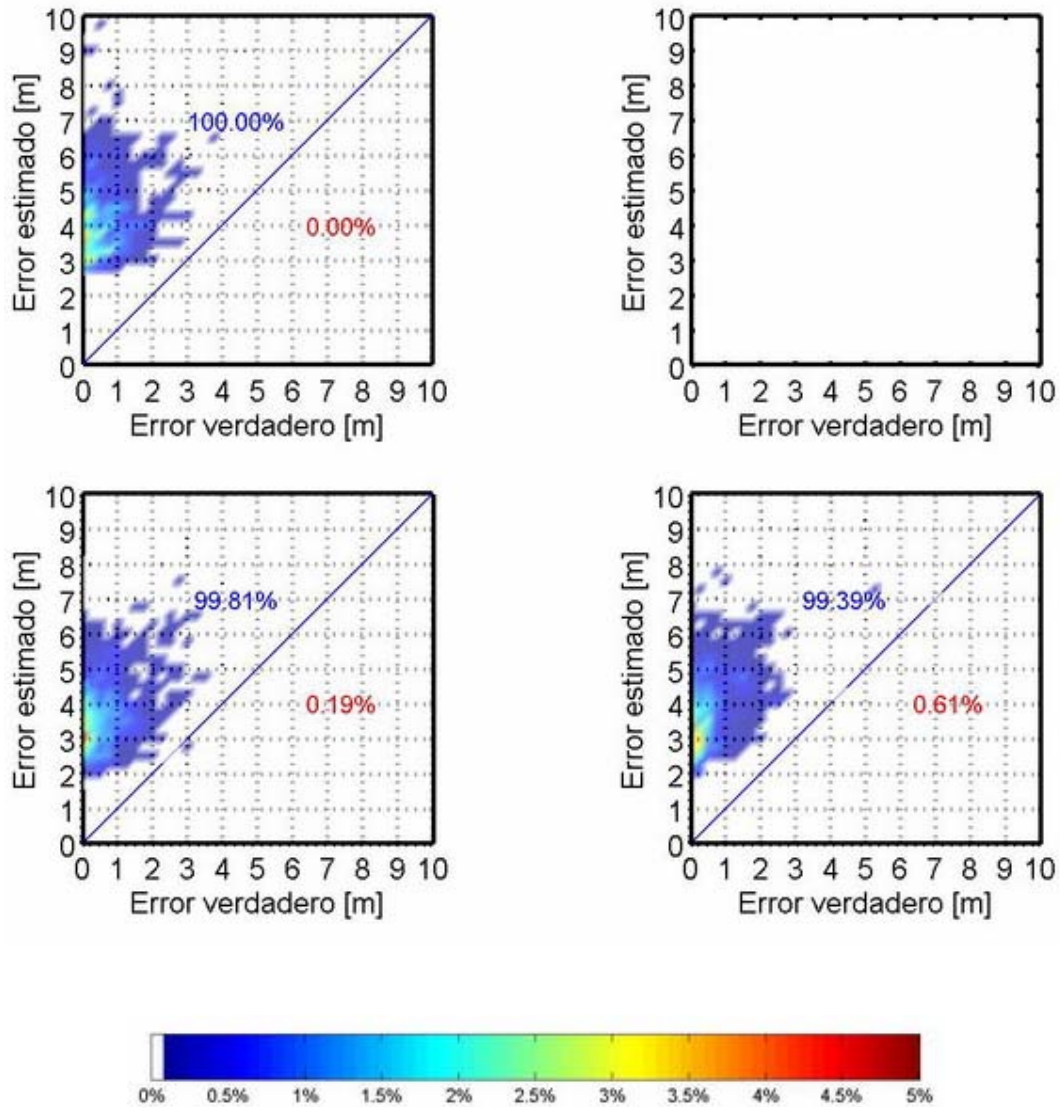
## mapa

### Semanas 05 - 08



## mapa

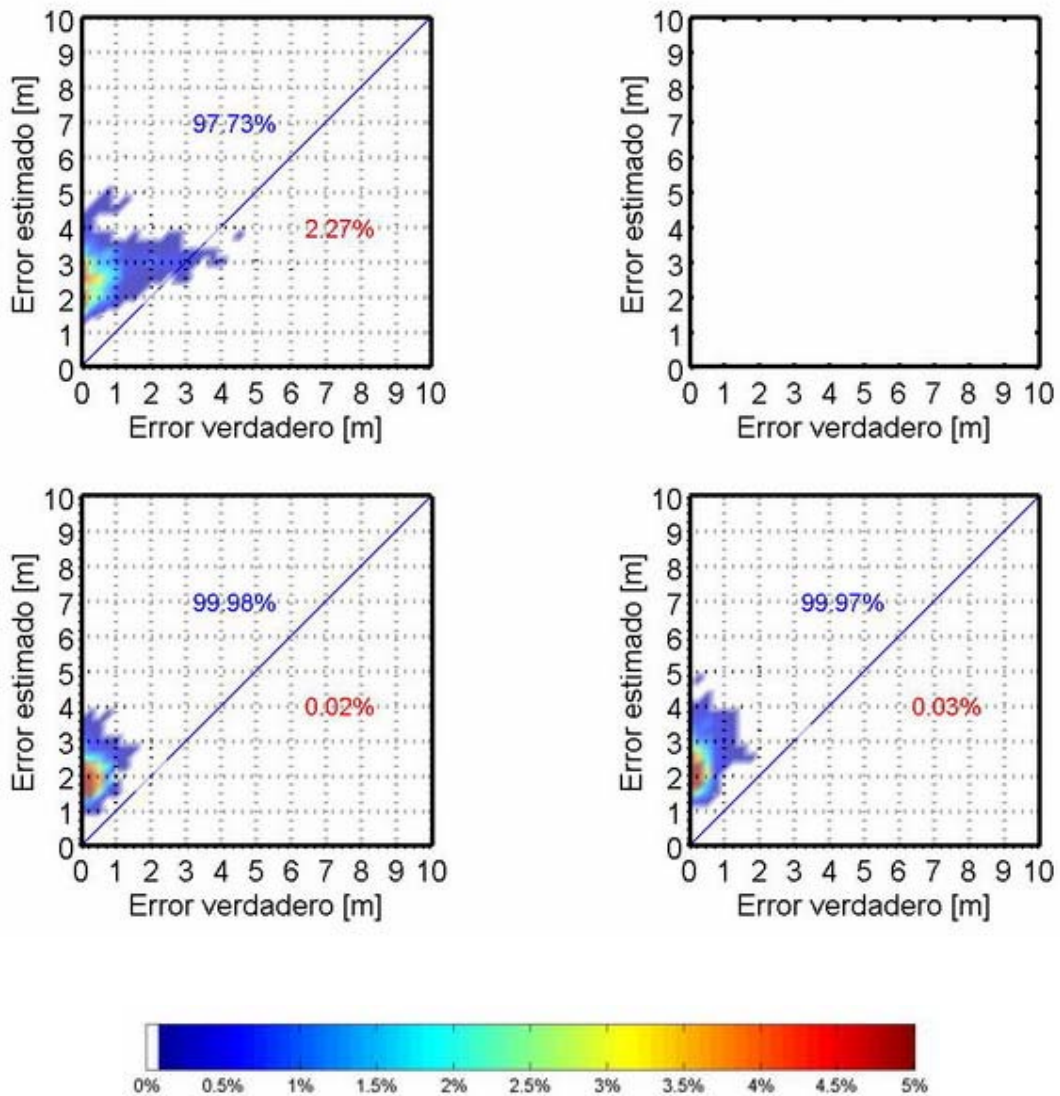
### Semanas 09 - 12





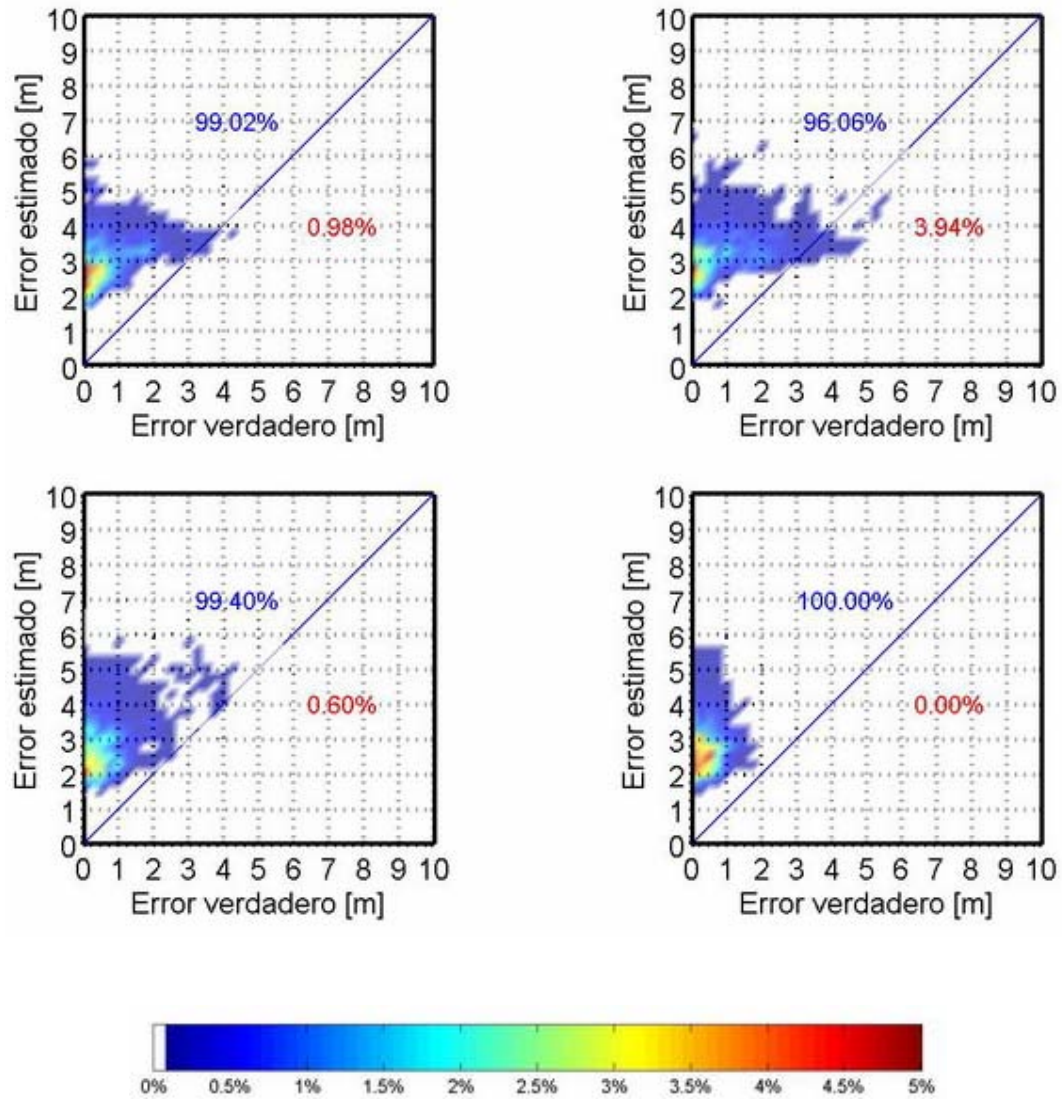
mará

## Semanas 01 - 04



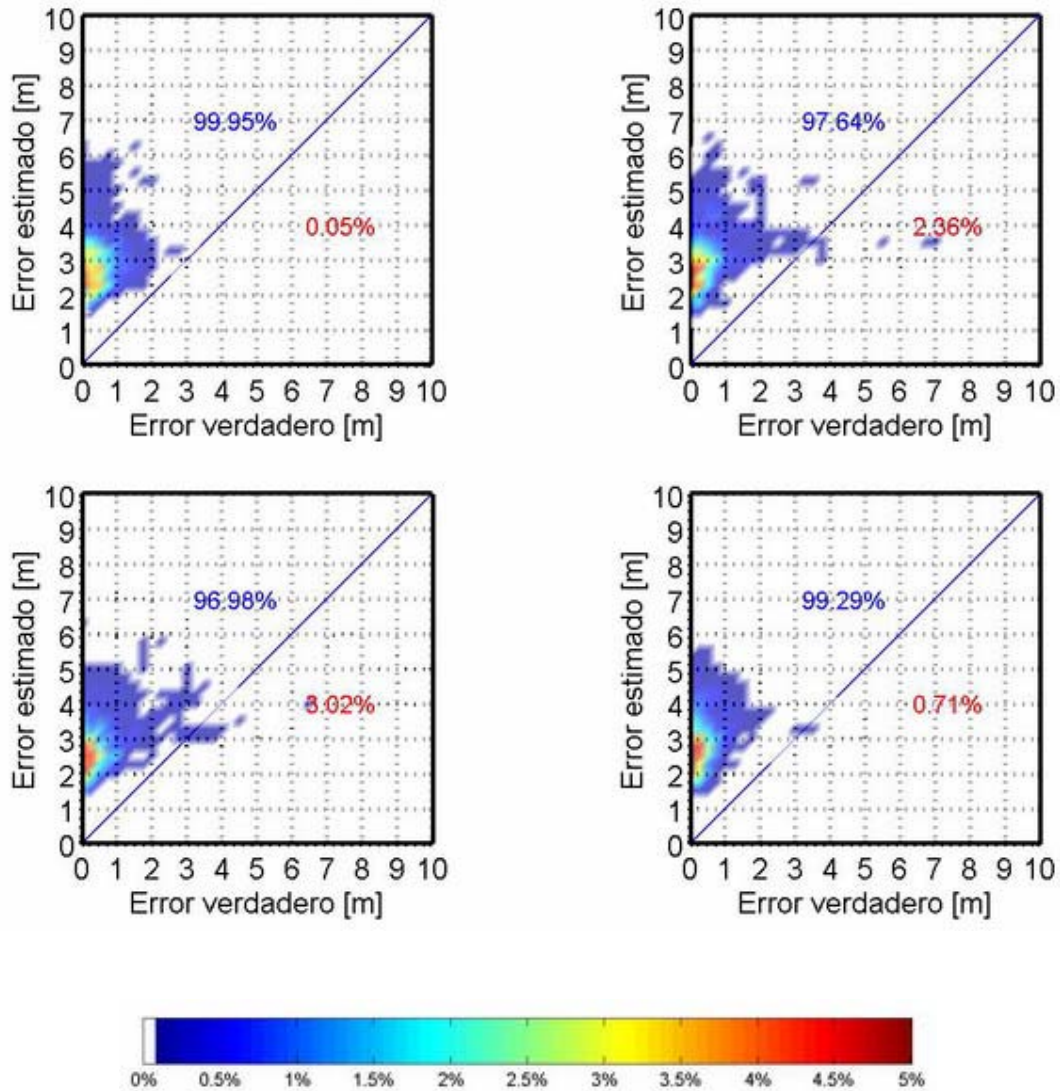
mará

## Semanas 05 - 08



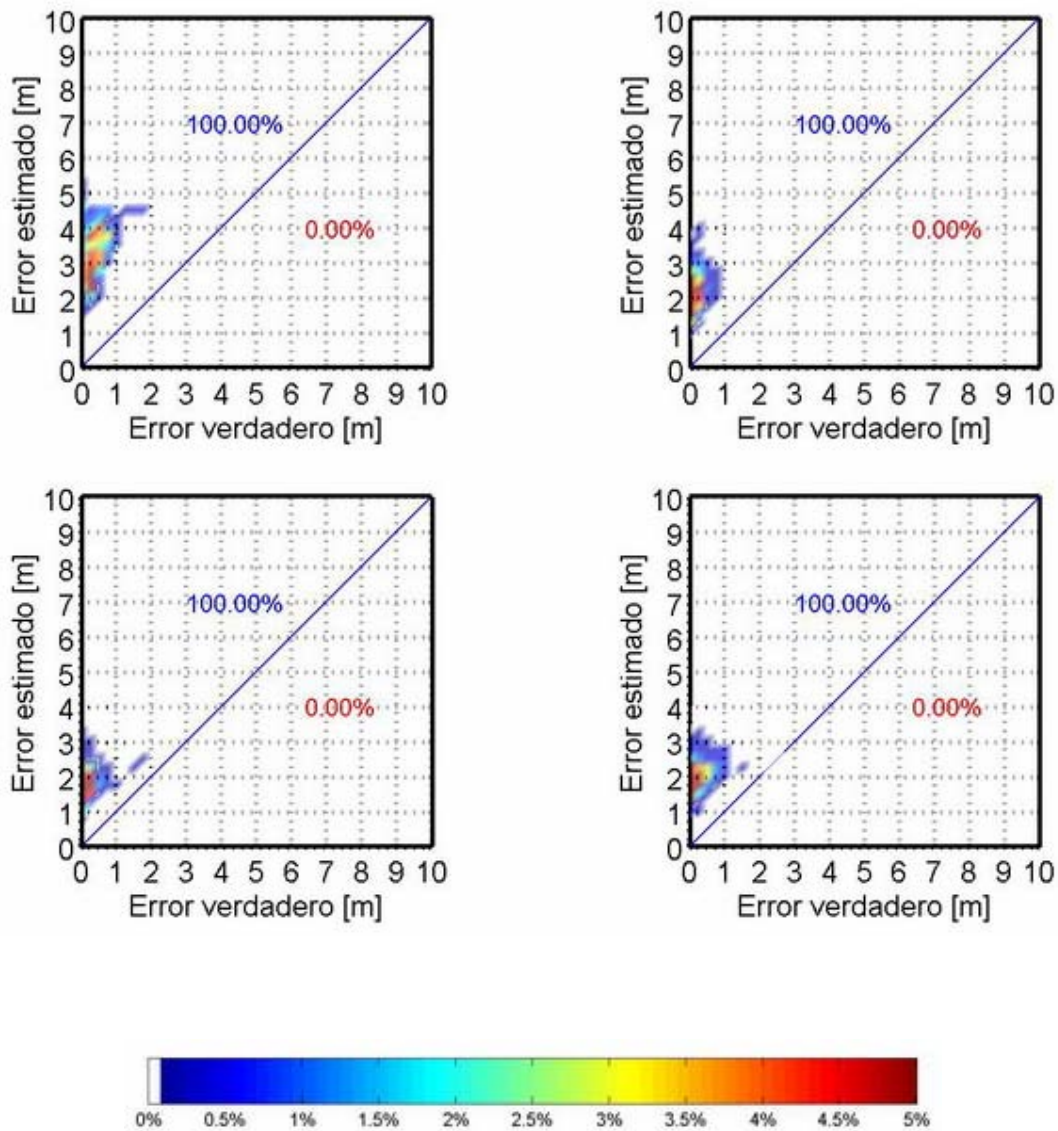
mará

## Semanas 09 - 12



mpla

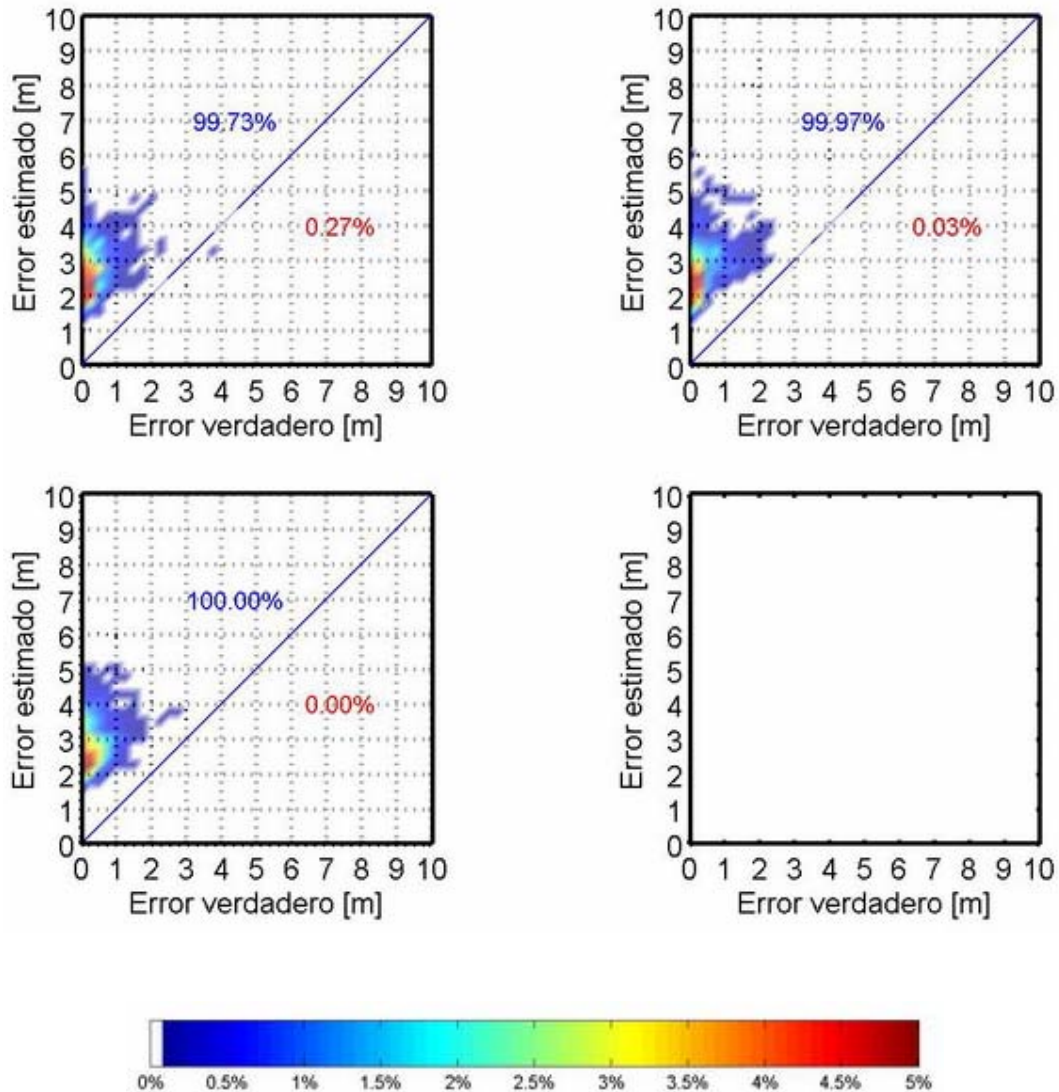
## Semanas 01 - 04





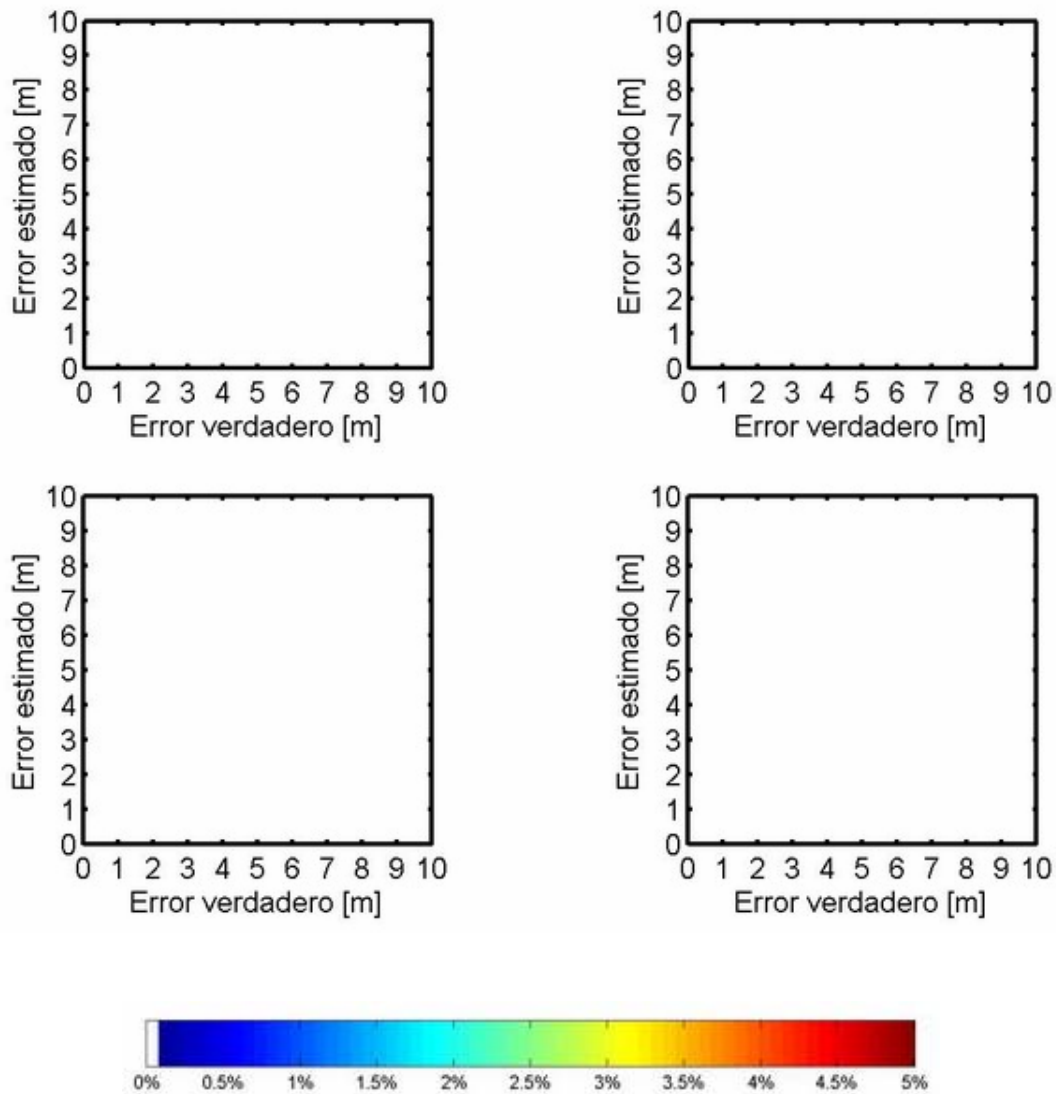
mpla

## Semanas 05 - 08



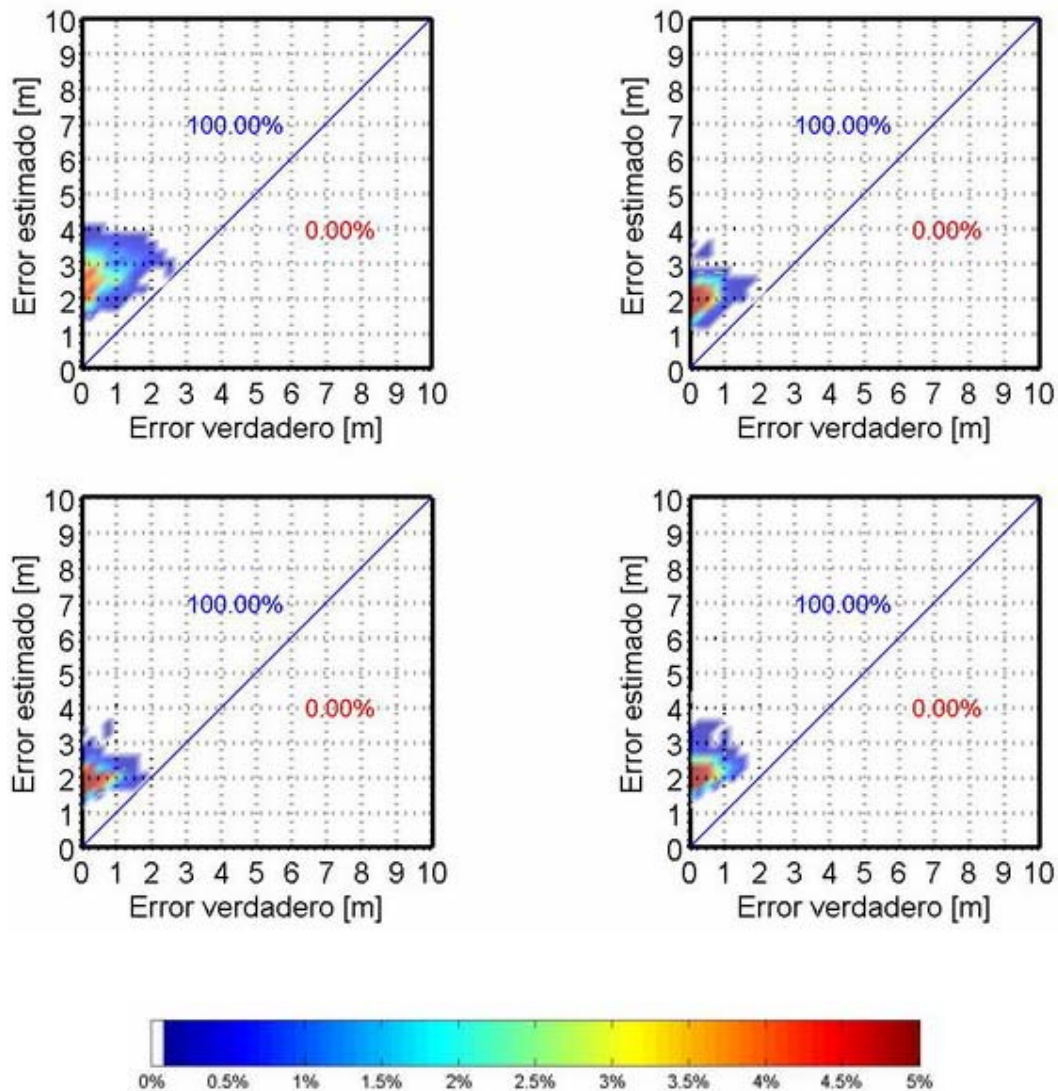
mpla

## Semanas 09 - 12



naus

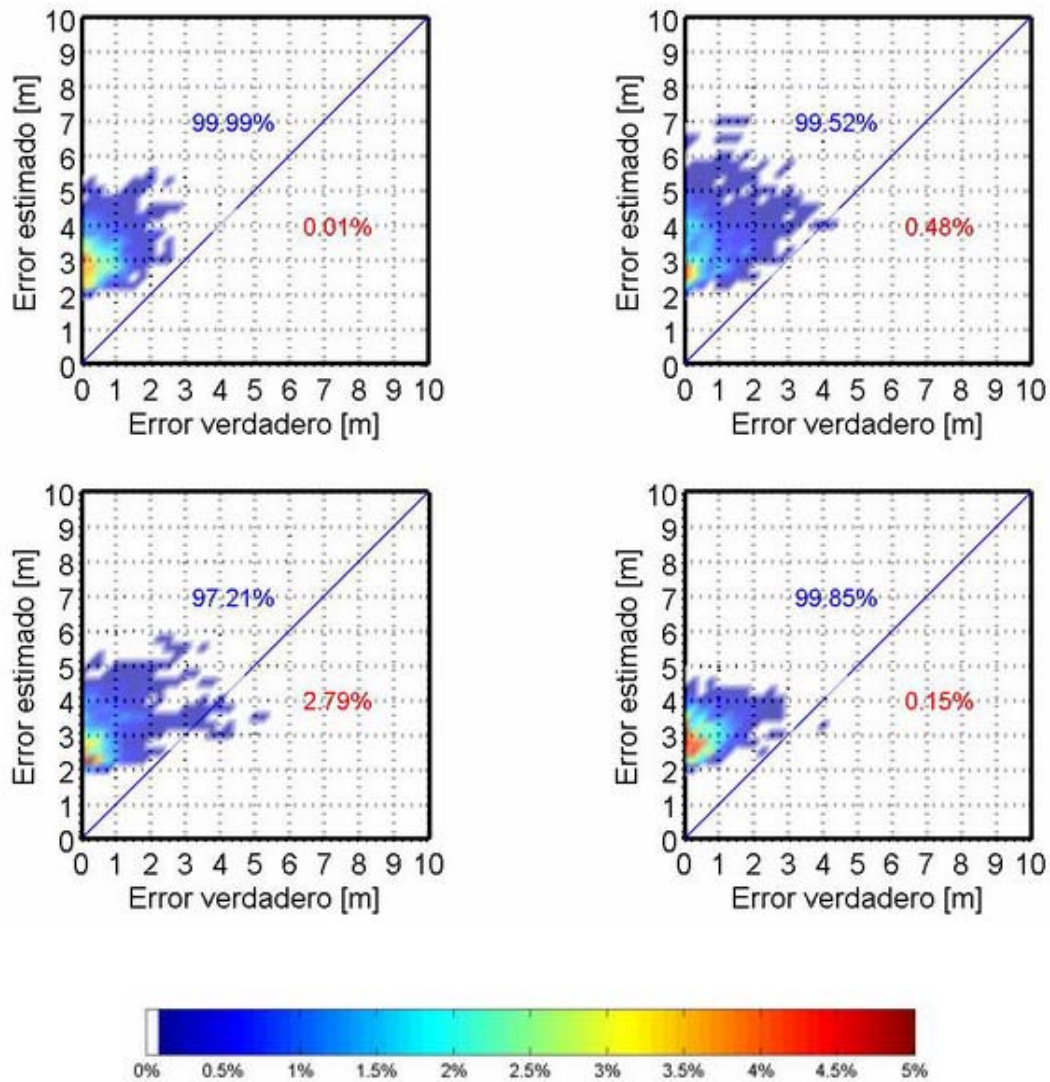
## Semanas 01 - 04



xxx

naus

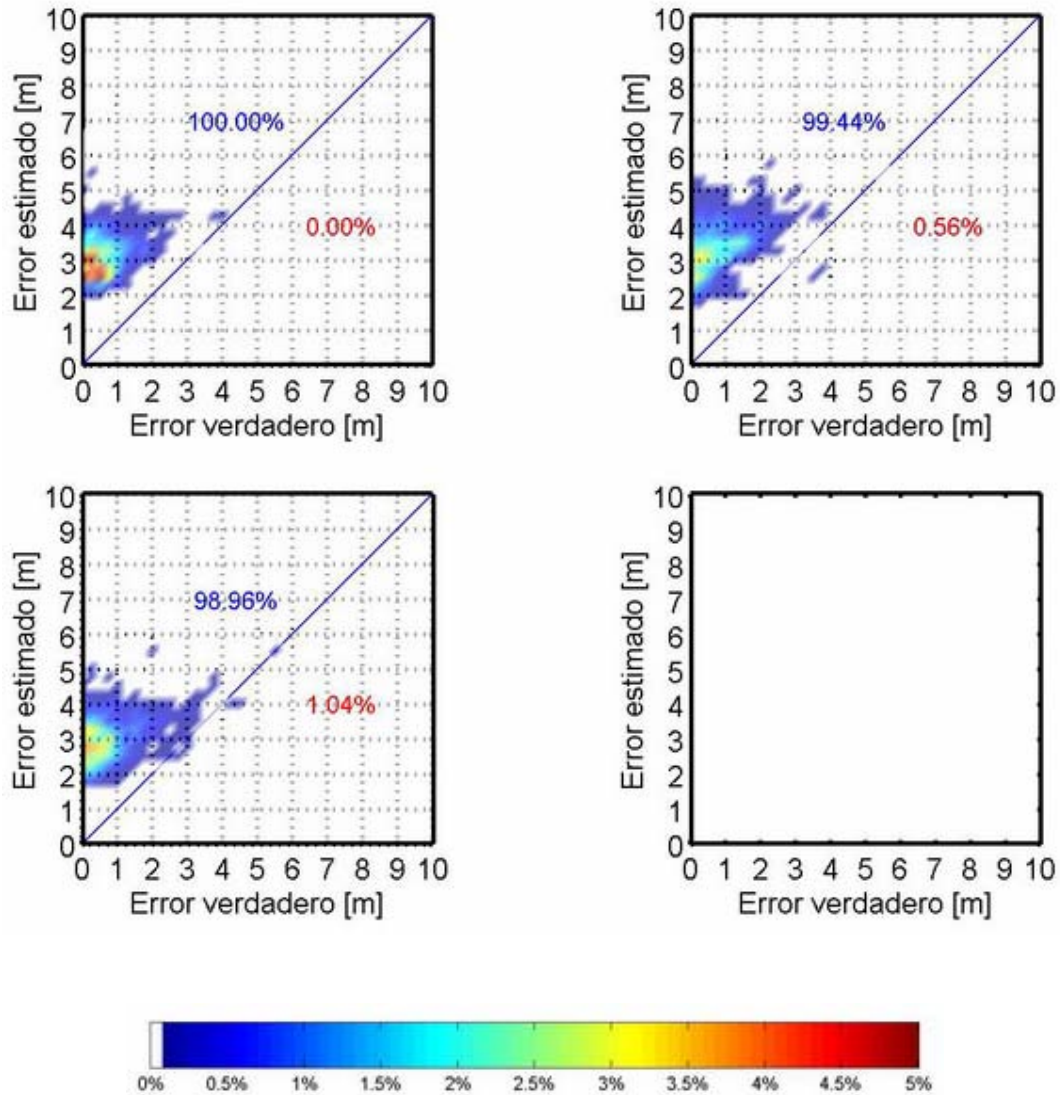
## Semanas 05 - 08





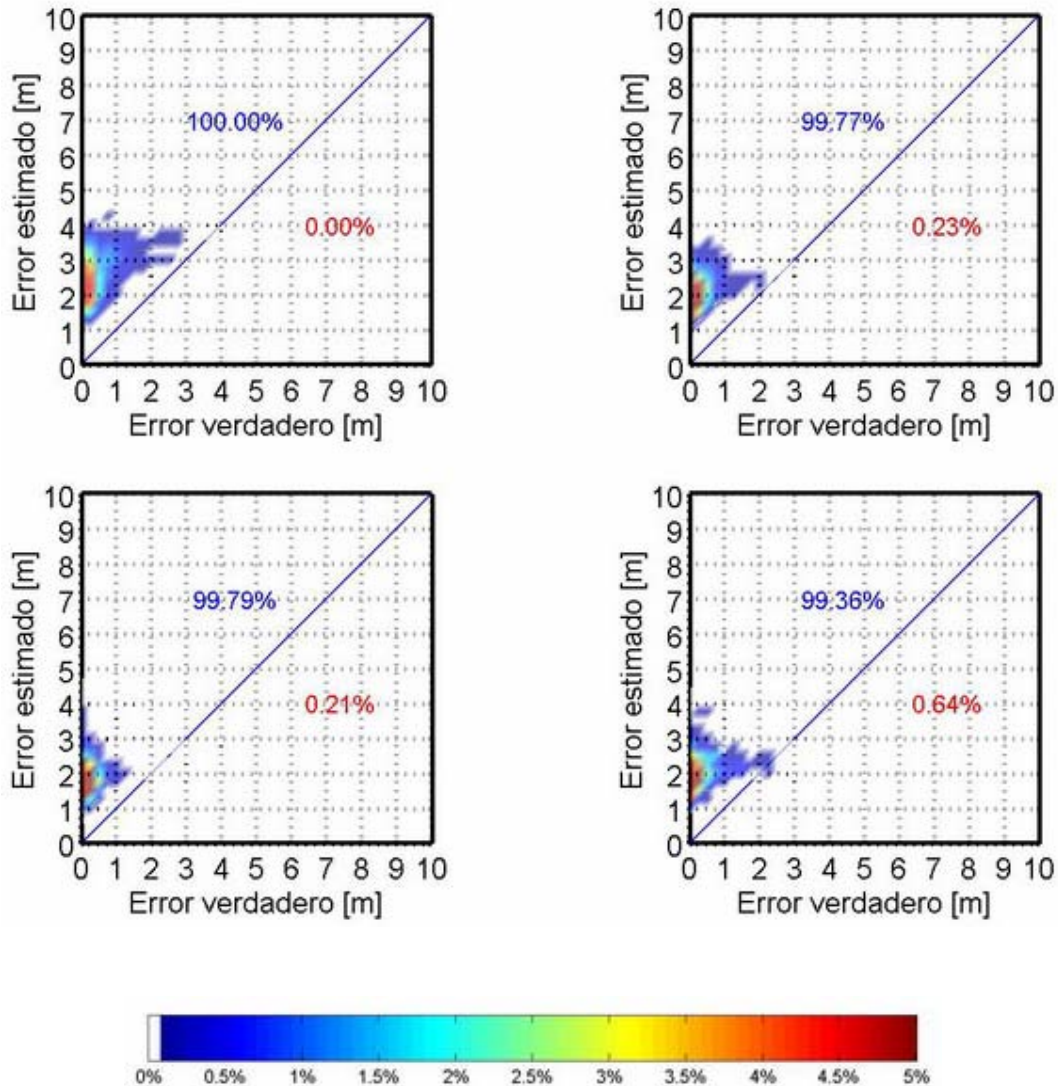
naus

## Semanas 09 - 12



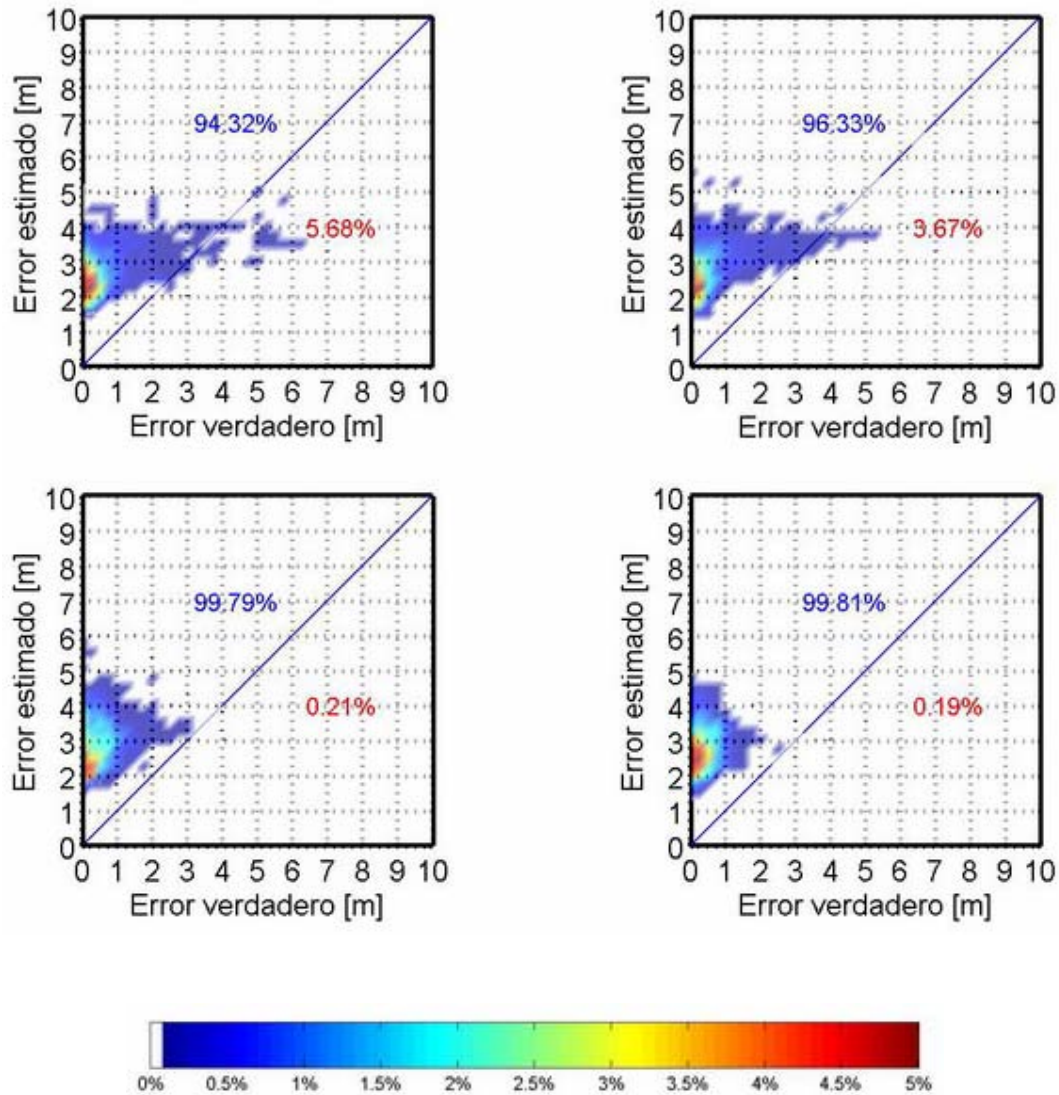
ucor

## Semanas 01 - 04



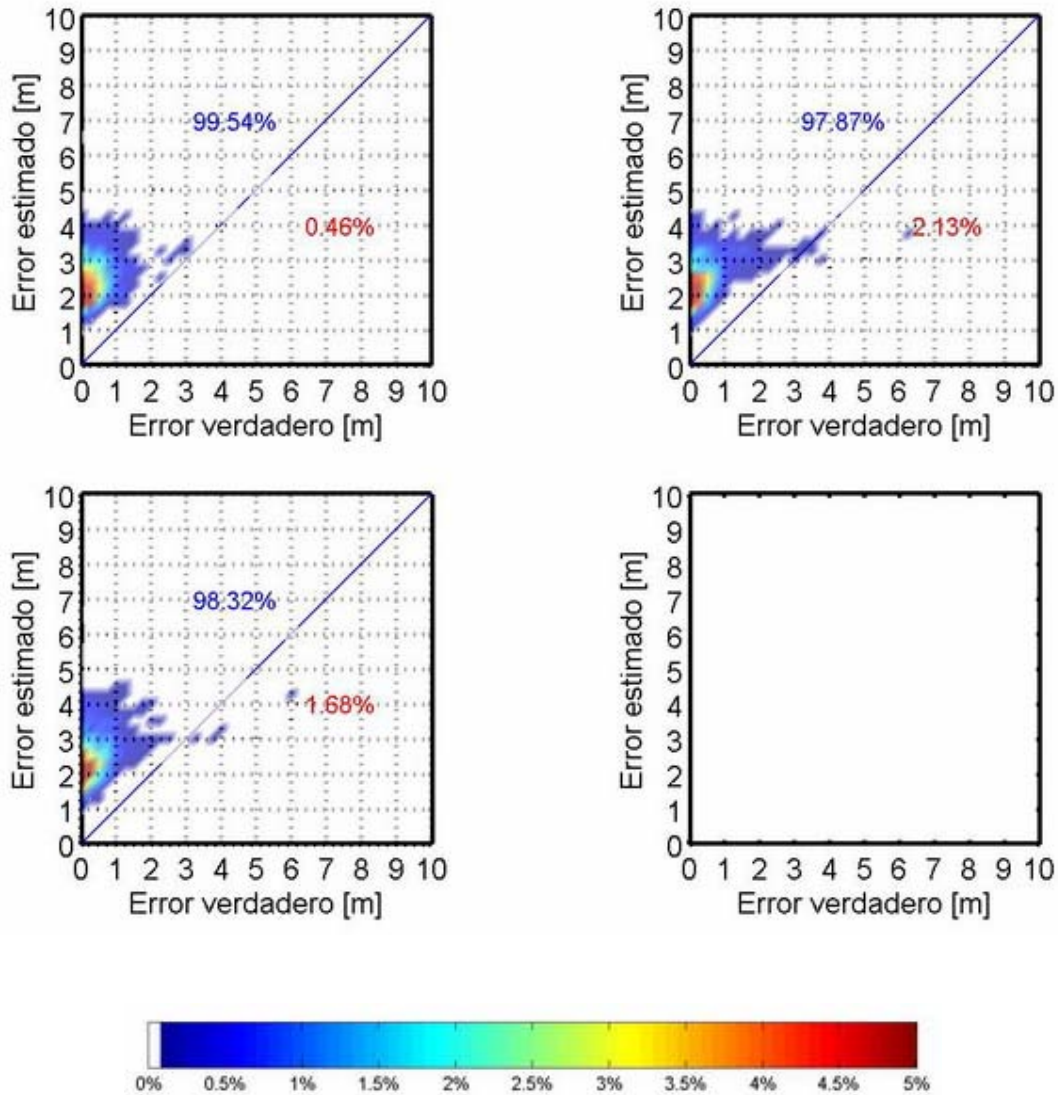
ucor

## Semanas 05 - 08



ucor

## Semanas 09 - 12

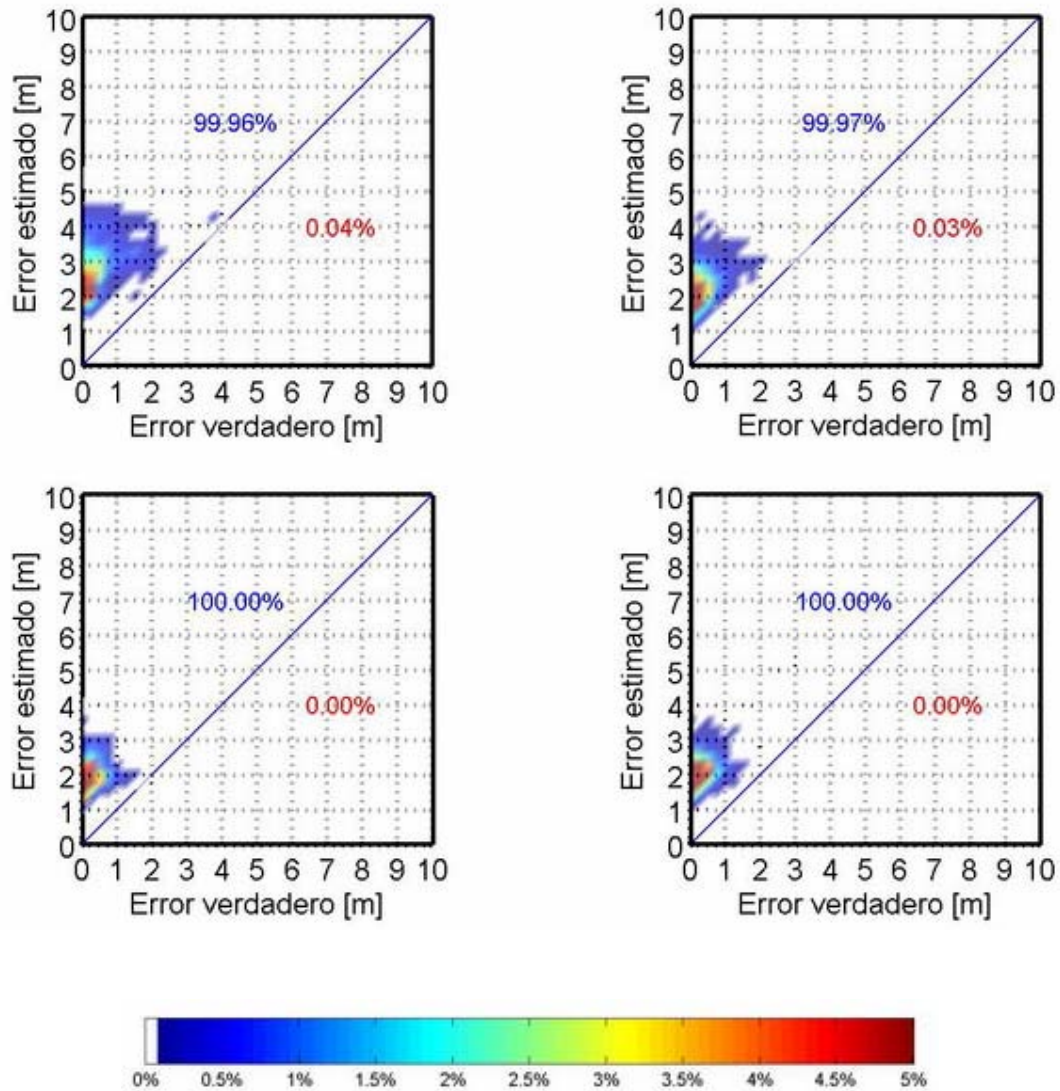


XXXV



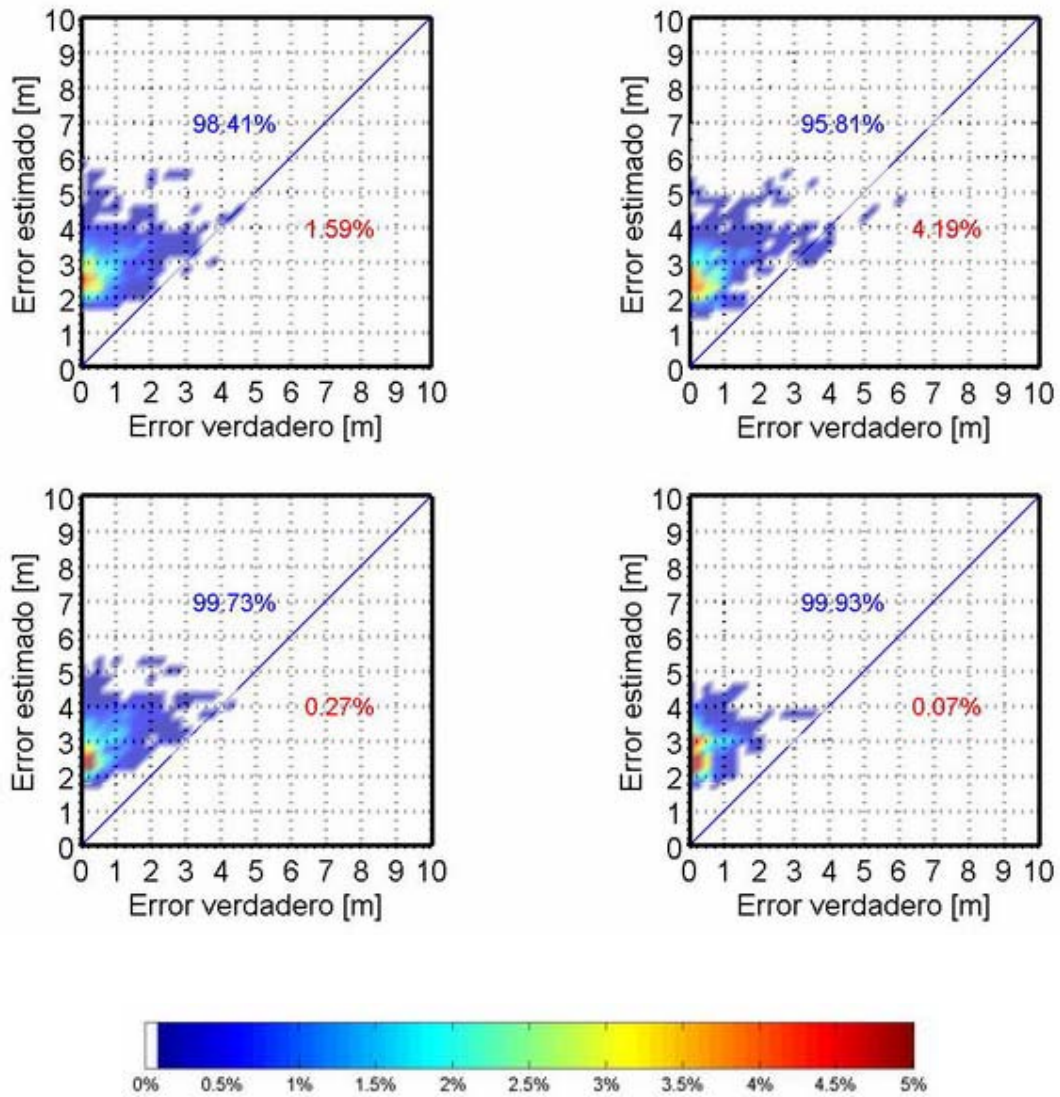
unsa

## Semanas 01 - 04



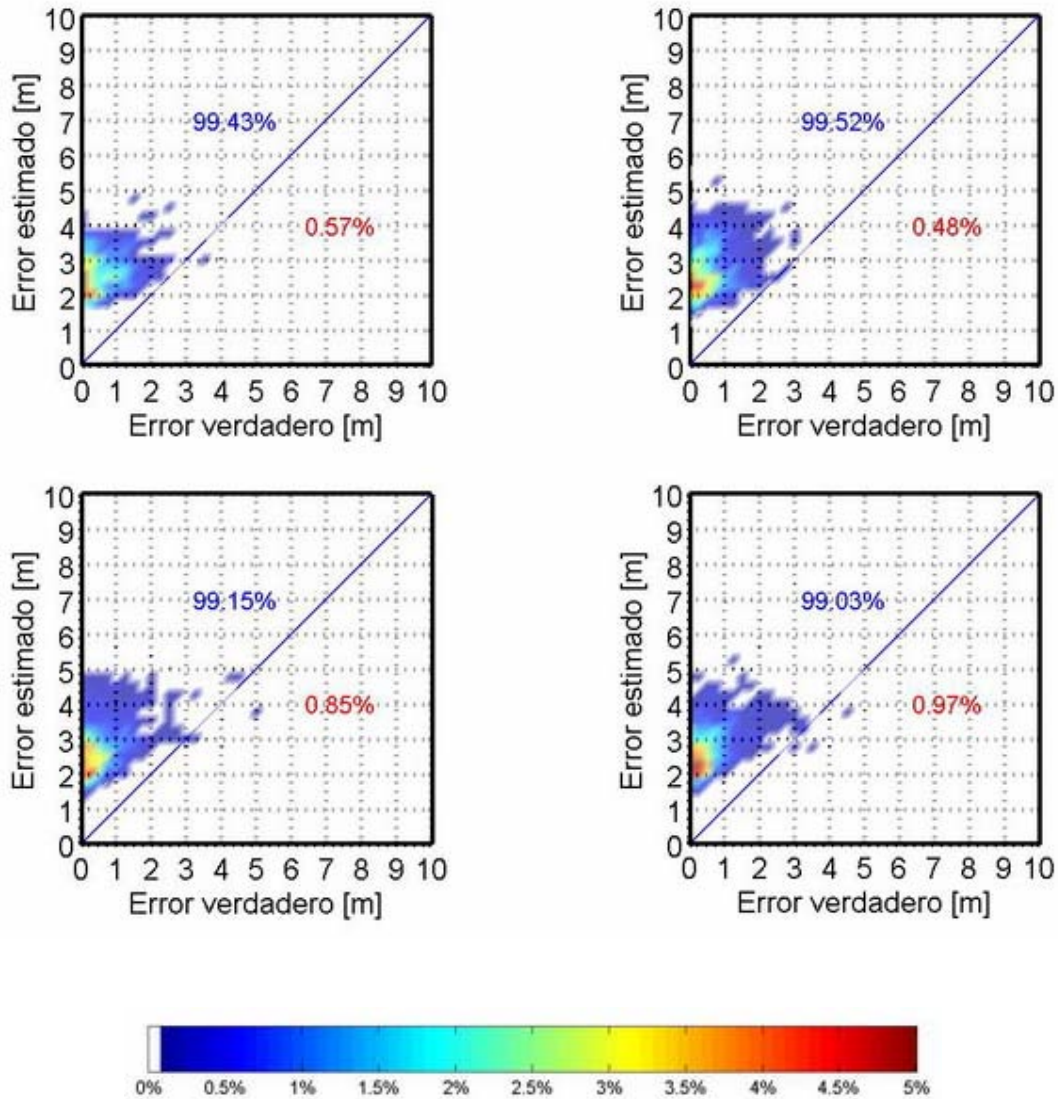
unsa

## Semanas 05 - 08



unsa

## Semanas 09 - 12



[illegible]

**Tabla 1.** Resumen de los Gráficos de Integridad por Estación. En azul se muestran las soluciones con porcentajes inferiores a 99%. Las casillas en blanco indican ausencia de datos.



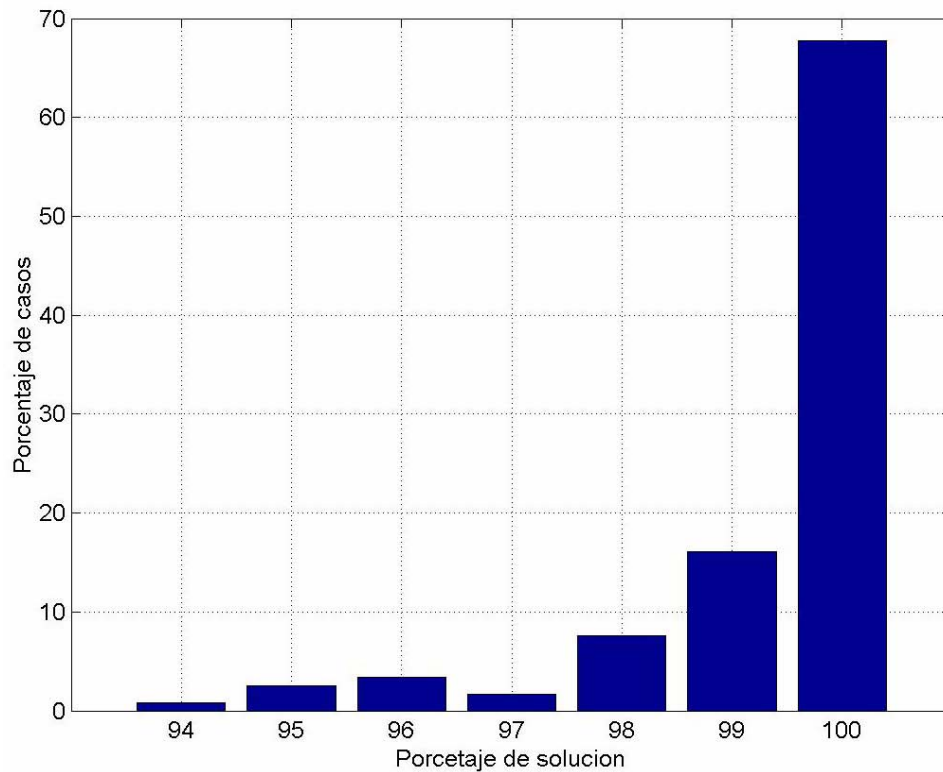


Figura 1. Porcentajes de soluciones en función del nivel de confiabilidad de los Gráficos de Integridad.

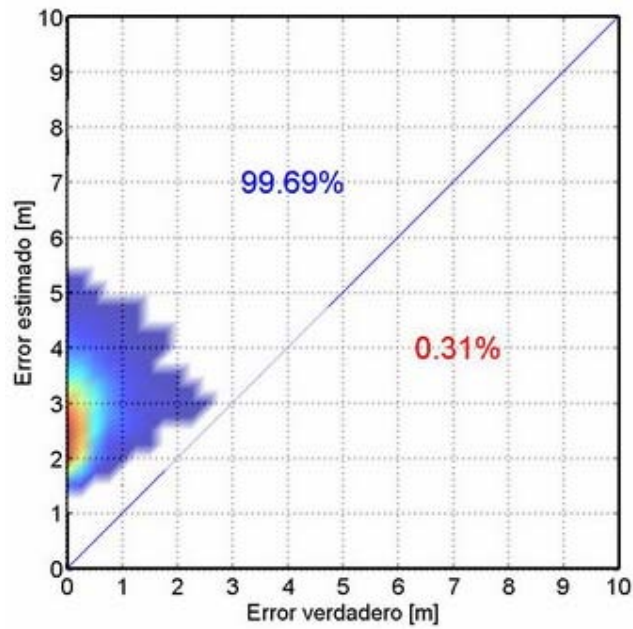
## APÉNDICE B

### GRÁFICOS DE INTEGRIDAD POR SEMANA

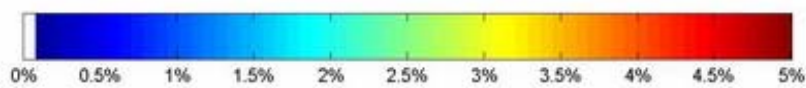
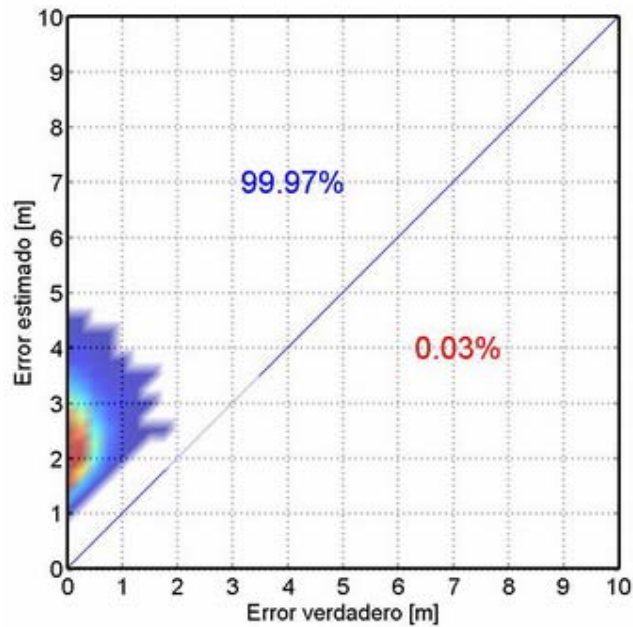
Los gráficos incluidos en este Apéndice, deben entenderse del mismo modo de los presentados en el Apéndice A.

A continuación se muestran doce gráficos, uno por cada semana analizada, que combinan las soluciones de todas las estaciones del Segmento de Usuario.

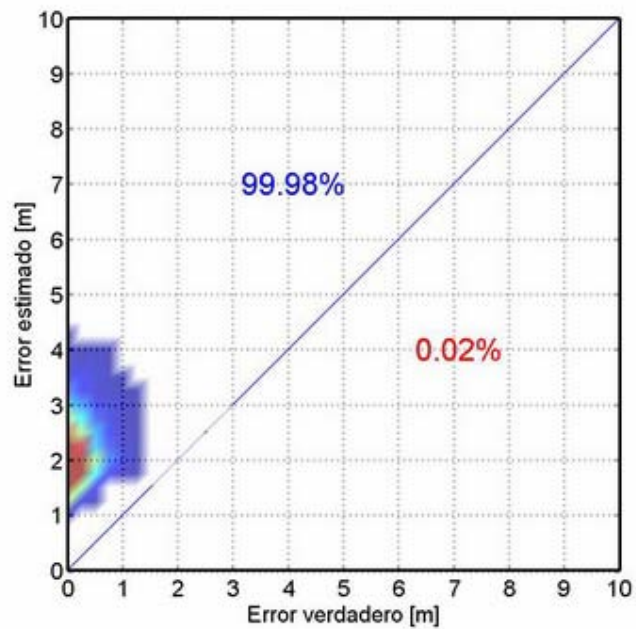
## Semana 01



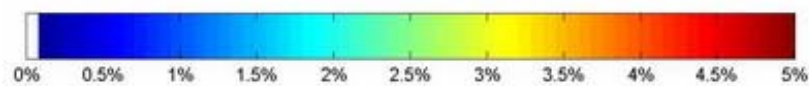
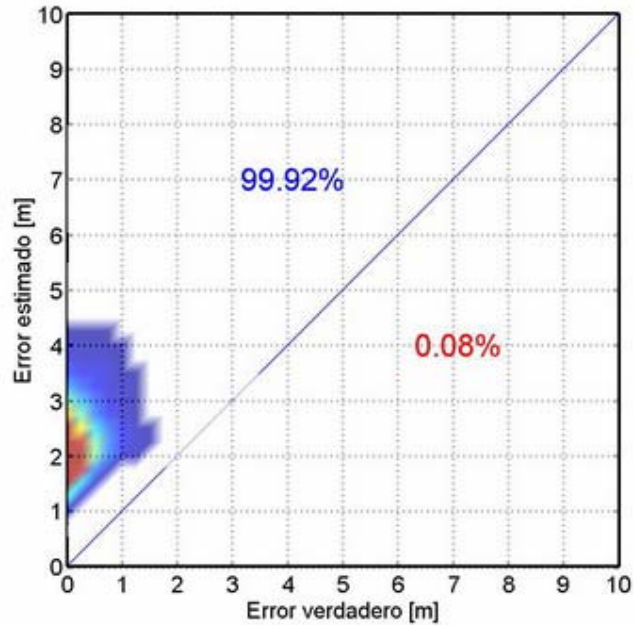
## Semana 02



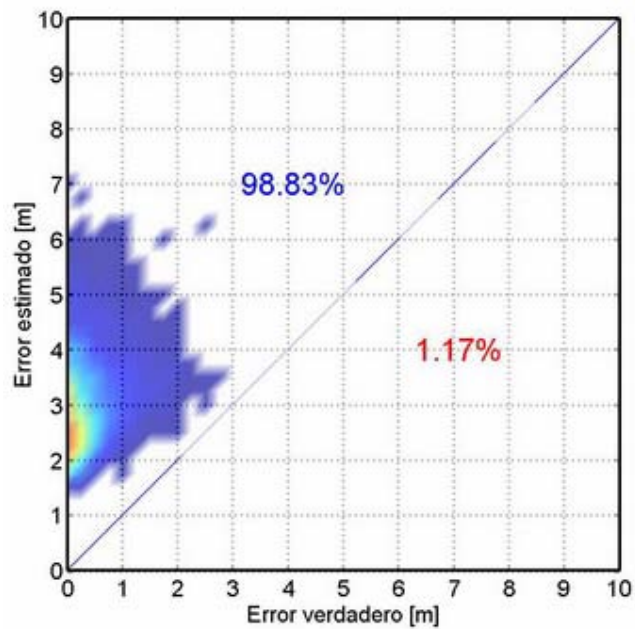
## Semana 03



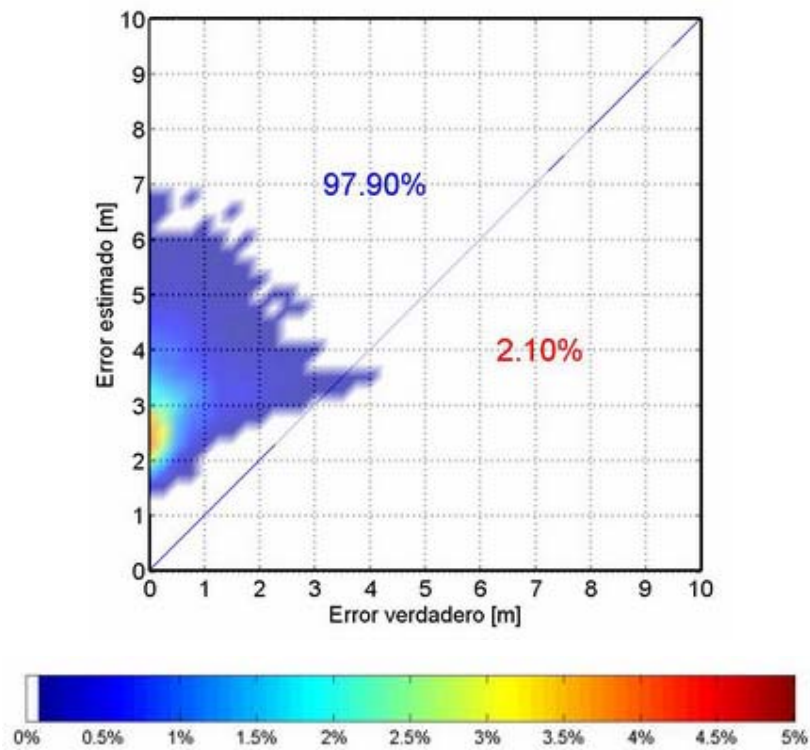
## Semana 04



## Semana 05

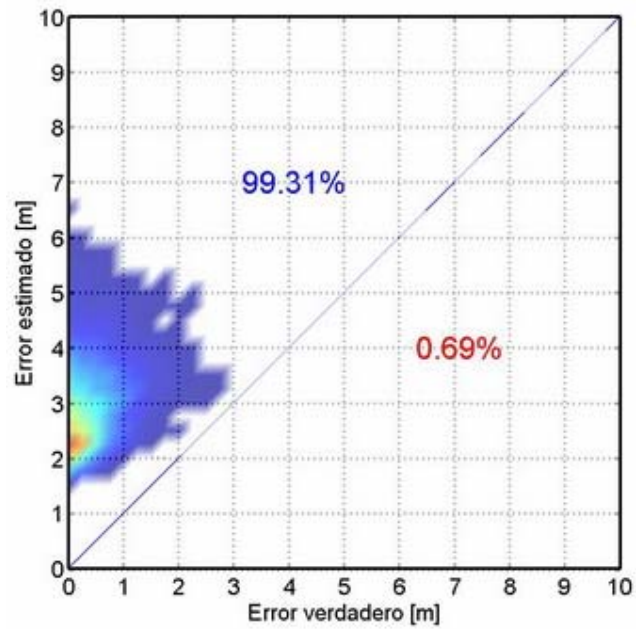


## Semana 06

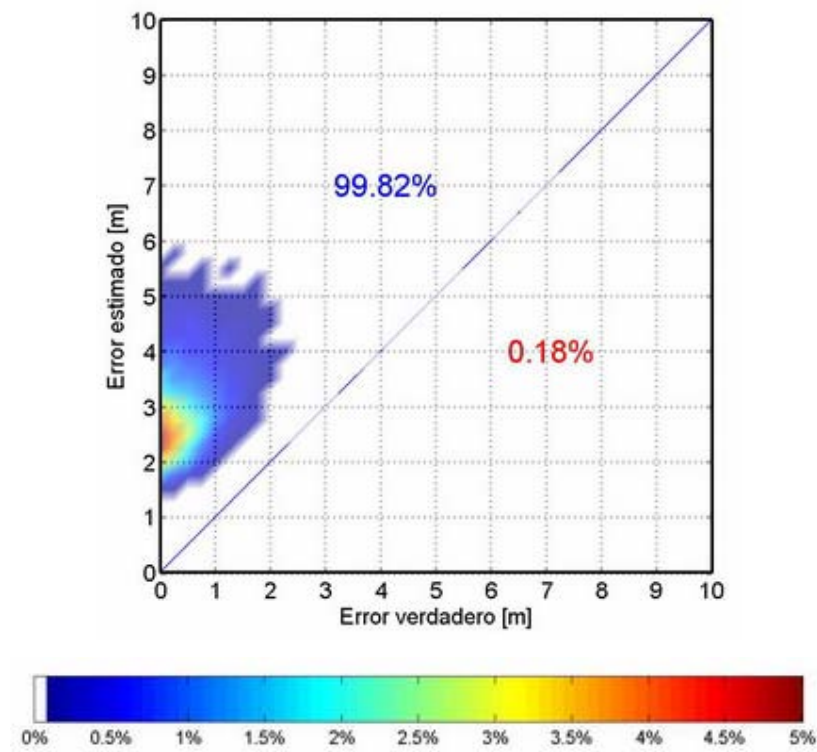




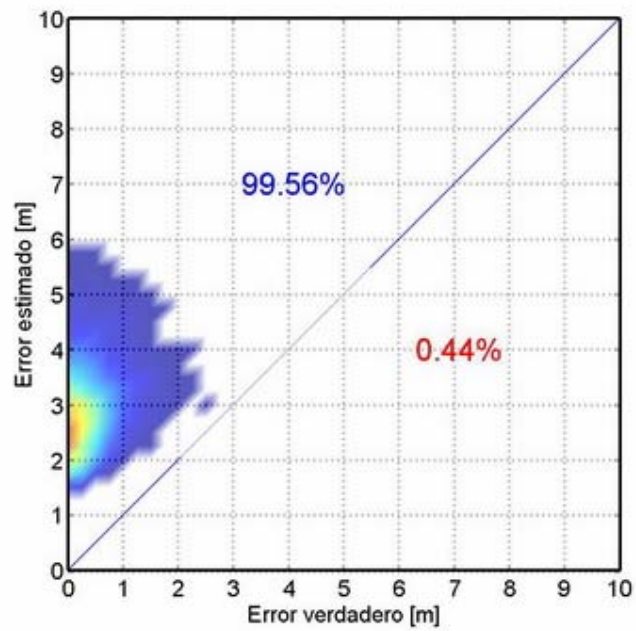
## Semana 07



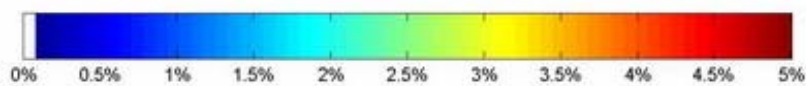
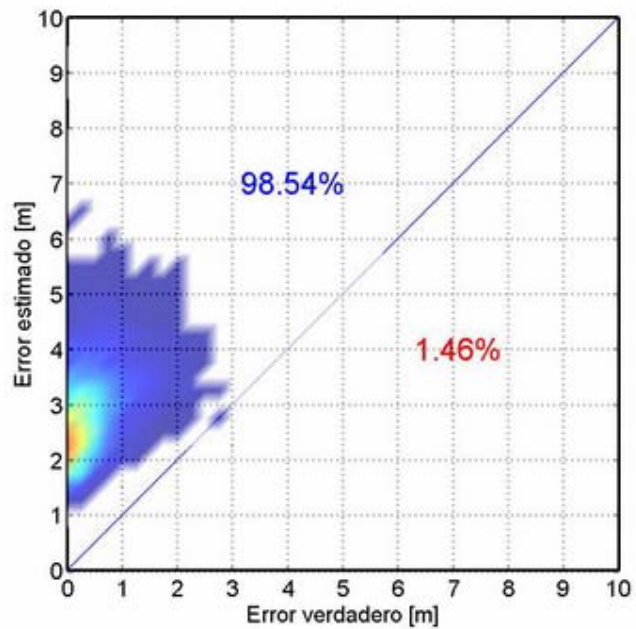
## Semana 08



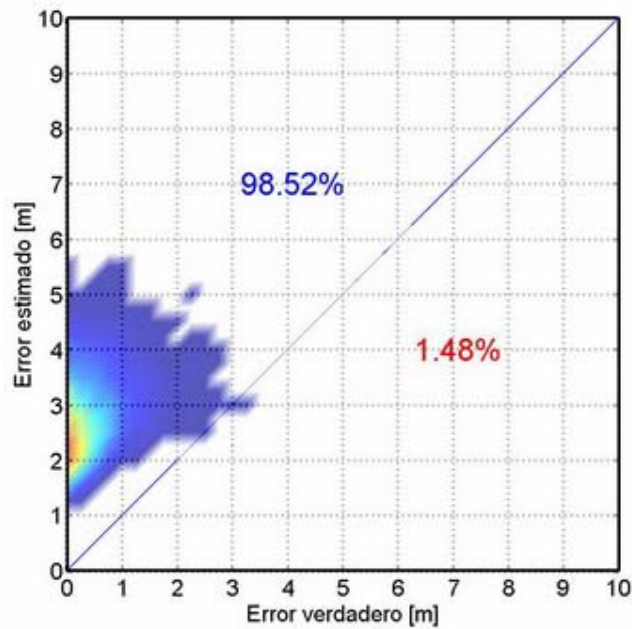
## Semana 09



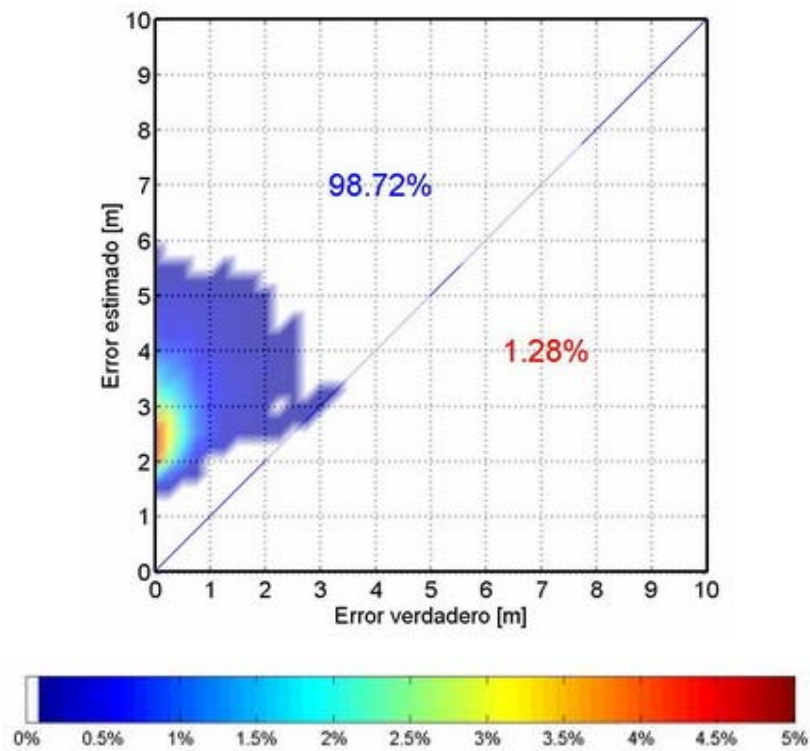
## Semana 10



## Semana 11



## Semana 12





Semana	Porc. Integridad
01	99.69
02	99.97
03	99.98
04	99.92
05	98.83
06	97.90
07	99.31
08	99.82
09	99.56
10	98.54
11	98.52
12	98.72

Tabla 1. Resumen de los Gráficos de Integridad por Semana.