

## Identificación

Proyecto PR\_FMV\_2009\_1\_2647

## Título en español y en inglés

Modelo Digital de Elevación de mejora continua con aporte voluntario de datos  
Progressive improvement of DEM with contributed GPS data

## Resumen

La información geográfica de calidad es costosa de adquirir y mantener, y con presupuestos en baja y exigencias en alza hay que explorar soluciones técnicas novedosas. En ese sentido es oportuna la aparición de nuevos paradigmas de la WEB 2.0 que apuntan a explotar la inteligencia colectiva mediante participación de voluntarios en la creación de información. En el caso de los datos numéricos el principal problema es cómo asegurar la exactitud. El presente proyecto apunta a investigar en este aspecto, con el objetivo de asegurar la mejora continua de la exactitud vertical de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de partida de baja exactitud.

Para ello se estarían aprovechando las mediciones que realizan con GPS profesionales independientes en el cumplimiento de sus tareas así como distintos organismos públicos y empresas privadas para proyectos específicos. Se implementará un prototipo de sistema de colaboración voluntaria para la entrega de las mediciones de campo, el cual dispondrá de algoritmos diseñados para a) la crítica de los nuevos datos a los efectos de validarlos o rechazarlos, así como para b) integrarlos a la información existente. La investigación en este proyecto se centra en esos algoritmos. El sistema permitirá además también acceder al MDE vigente y consultar su exactitud para una zona particular del territorio.

Se logrará un MDE con mejora continua y bajo costo; se implementará una red de cooperación científico-profesional, se ensayará una tecnología inédita válida para otros datos, y se aportará un dato esencial para la Infraestructura de Datos Espaciales.

## Abstract

High quality geographic information is expensive to acquire and hard to maintain, moreover taking into account the demand of lower budgets with rising exigencies, making the research of novel technics very important. In that sense,

the apparition of the new web 2.0 paradigm that aims to exploit collective intelligence with the participation of volunteers into the information creation is quite suitable. The main problem involving numeric data is how to ensure precision. With the objective of ensuring the progressive improving of the vertical precision of the digital elevation model (DEM) this project aims to the research on this issue.

A voluntary collaboration system prototype is going to be implemented for field measurements deliverance, which will have algorithms desgined for a) a reflexion about new data with the objective of accepting or rejecting it, and also b) to integrate it into the existing information. This project investigation is based on these algorithms. The system will allow enter to the valid DEM and to make consultations about its precision for a particular place on the territory. A progressive improving DEM with low cost is going to be accomplished; and a scientific-professional coopertation network is going to be implemented, and also an unpublished technology which is valid for other data is going to be used, and finally, an essential data for Spatial Data Infrastructure will be contributed.

## Antecedentes

### **Generalidades**

La Web como tecnología y como concepto reconoce una evolución dramática desde sus comienzos a principios de los 90. Lo que hoy se denomina Web 1.0 era esencialmente un mecanismo organizado de Publicación de información disponible en servidores. El término Web 2.0 fue acuñado por Tim O'Reilly (O'Reilly, 2005) para enfatizar el contraste con la Web 1.0 donde toda la información iba desde el servidor al usuario. Una característica de la Web 2.0 es permitir que todos los usuarios sean potenciales fuentes de información. Ejemplos populares de estas tecnologías son servicios como Youtube, Fotolog, Wikipedia, Google Earth, Google Maps, etc. que comparten algunas características pero tienen algunas diferencias sustanciales con lo que se plantea en este proyecto.

Servicios como Google Earth o Google Maps han popularizado el acceso a los datos geoespaciales y muchos ciudadanos utilizan de manera rutinaria esos servicios para conducir un vehículo en cierta dirección, comprar casas o planificar viajes al extranjero.

La Web 2.0 de hoy convierte a cada usuario en un potencial creador de datos geográficos a través de Google Earth y Google Maps. Esa creación puede ilustrarse con ejemplos:

1. informar de daños en carteles en una carretera, indicando la posición sobre Google Earth.
2. informar sobre el tipo de cultivos, rendimientos, humedad del suelo, etc. en aplicaciones de agricultura de precisión.
3. enriquecer la descripción de un sitio de interés cultural mediante textos históricos, fotos, etc. asociadas a un punto en el espacio.
4. reportar el nivel hora a hora de un río durante un episodio de creciente.

Estos ejemplos comparten entre sí la necesidad de asociar la información a un punto del espacio. Sin embargo, hay diferencias sustanciales entre ellos, y similitudes con otros servicios de la Web 2.0. Por ejemplo, el ítem 3) puede operar en forma bastante similar a la Wikipedia: si alguien sube una información errónea, hay previsto un mecanismo de crítica que implica que la misma puede adecuarse. El mismo se basa en el concepto de la inteligencia colectiva, la cual podría tener una vaga analogía estadística en asignarle más valor al promedio de varias lecturas que a una lectura aislada. Así, si alguien define al número Pi de una manera incorrecta o inadecuada, en la medida que tal definición es conocida por un universo significativamente grande de navegantes, la misma puede ser corregida sin mayores sobresaltos.

No ocurre lo mismo con aplicaciones como Fotolog: si la foto de Juan en realidad es de Pedro, quizá no exista un número tan grande de navegantes que lo puedan corregir.

Los datos geospaciales tienen características específicas que complican en varios sentidos la aplicación de las técnicas de la Web 2.0. Cuando aparece la necesidad de dar coordenadas a los eventos surgen inmediatamente un sinnúmero de problemas técnicos (sistema de coordenadas, origen de las cotas, proyección utilizada, etc.) que se suman al hecho que la propia coordenada es una magnitud experimental cuya exactitud depende de muchos aspectos. Así, si el observador identificó el sitio pinchando en una imagen de satélite, la exactitud está limitada simultáneamente por la georreferenciación de la imagen, la resolución del pixel y por supuesto por la nitidez del objeto geográfico. No es imposible que la exactitud sea del orden de las decenas de metros. En cambio, si el observador es un técnico entrenado que utiliza un GPS de tipo geodésico, entonces la exactitud podrá ser sub-decimétrica.

En el ejemplo número 1) cualquier observador puede opinar sobre el mal o buen estado de un cartel localizado en una ruta, pero puede pensarse que es razonable lograr una unanimidad de opiniones sobre el evento. En cambio en los ejemplos 2) (informar sobre el tipo de cultivos, rendimientos, humedad del suelo, etc ) o 4) (reportar el nivel hora a hora de un río durante un episodio de creciente ) puede no ser tan obvio que se consiga un número grande de observadores que tengan acceso al sitio y al instrumento correcto para producir el número que se ha subido a la Internet. En el caso 4) el problema está además agravado por la dinámica en el tiempo: si el dato fue mal tomado no es posible volver al lugar al día siguiente y asumir que la lectura no debe haber cambiado. El problema técnico que se plantea para aplicaciones de Web 2.0 con datos numéricos es cómo asegurar (o gestionar) la exactitud, evitando la manipulación maliciosa de las cifras por una minoría de perturbadores (*griefers, spammers, etc.*)

Dada la enorme cantidad de datos geoespaciales, comienza a crecer la necesidad de que la evaluación de la exactitud de los mismos, sea realizada por los propios usuarios de la web.

### **La Web Geoespacial**

Las definiciones de la GeoWeb hacen énfasis en el poder de la localización geográfica de la información como una clave para integrar el conocimiento y darle un contexto. En efecto, es posible concebir un mundo en el cual es posible saber donde está ocurriendo algún hecho en particular.

Sin embargo, a pesar de su importancia hoy es difícil encontrar una preocupación explícita respecto de la exactitud espacial en sitios web muy populares; por ejemplo, no están disponibles para el usuario información básica como fechas y horas concretas en las cuales ciertas imágenes fueron tomadas (caso de Google Earth).

Como se ha señalado la exactitud geométrica es una parte esencial de una integración de datos, ya que puede suceder que dos medidas tomadas de una cierta característica sobre la superficie terrestre no concuerden, o dicho de otra manera, saber si dos referencias  $x_1$  y  $x_2$  no se refieren en realidad al mismo lugar.

Surgen entonces, quienes se denominan a sí mismos neogeógrafos, quienes sin un formal entrenamiento en ciencias geográficas, generan y publican datos geoespaciales usando un simple software. Desafortunadamente, a medida que crece el interés por generar y publicar, también crece la tendencia de la Geo Web en explotar datos provenientes de diferentes fuentes. Al mezclarlas sin tener en cuenta la calidad del dato de partida (del cual la exactitud posicional es una de sus características) el resultado puede ser bastante diferente del esperado. Ello sin perjuicio que en muchas aplicaciones hay además otras exactitudes a considerar (como la de la cota del río, o el de la concentración de nutrientes en el terreno) que son independientes de la posición.

La tecnología para publicar datos en la Web está más o menos madura: el problema que está surgiendo es *cómo* gestionar la calidad del dato publicado por los voluntarios, rechazando, aceptando o calificando en alguna forma los mismos.

### **El usuario como generador de evaluación de calidad**

En el mundo de la Web 2.0, el término *usuario generador de contenidos*, refiere a la capacidad del usuario web en crear contenidos, integrarlos, y hacerlos disponibles a través de los sitios de Internet.

Hay numerosos sitios web que han sido establecidos con el propósito de solicitar colaboración y organizar los datos que llegan. Esta actividad es llamada voluntariado de información geográfica. (VIG por sus siglas en inglés).

Como se ha señalado, se asume que la información puede ser más exacta si es aportada por grupos (inteligencia colectiva), en lugar de que sea provista por un solo individuo.

Es claro que tiene sentido que los colaboradores sean locales, expertos en su propia área, a los efectos de adquirir y proveer la información. La participación puede ser voluntaria, llevada a cabo por motivos altruistas, o ser recompensados en alguna forma.

El mecanismo previsto para comunicar la información de calidad de los datos, es describirlos a través de los metadatos, recogiendo los cinco aspectos de la calidad previstos (uno de los cuales es la exactitud). Paradójicamente en muchas aplicaciones la exactitud relevante puede no ser la intrínseca (i.e. contra la realidad del terreno) sino la que surge al comparar contra un segundo

juego de datos. Eso hace que deban generarse nuevas formas de describir la exactitud, al importar la discrepancia relativa de pares de grupos de datos. Como ejemplo, se puede decir que la exactitud una imagen Google Earth es adecuada para ciertas aplicaciones, e inaceptable para otras, cuando intrínsecamente su exactitud es baja.

### **La calidad de VGI**

Como producto creado por voluntarios no necesariamente entrenados ni calificados, VGI plantea sus propios problemas respecto de la exactitud.

Los usuarios tienen expectativas claras en lo que concierne a los datos geospaciales producidos de forma tradicional por las agencias cartográficas, y dichas expectativas se basan en las experiencias, estándares publicados por los productores, o simplemente por la reputación de una cierta marca.

VGI simplemente brindan una afirmación, dada por usuarios sin marca, sin experiencia ni entrenamiento, y sin estándares; lo que se contrapone a fuentes “con autoridad” como las agencias cartográficas mencionadas en el párrafo anterior.

La necesidad de un marco de comparación es evidente: ¿Qué tan lejos está la Wikipedia de la Enciclopedia Británica? ¿Qué tan inexacto serán las lecturas provistas por voluntarios que viven en el lugar de interés, frente a lo que podría lograrse instalando un puesto permanente de observación tradicional? ¿Se justifica el costo adicional frente a la alternativa con voluntarios?

En lo que a datos se refiere la métrica adecuada podría requerir comparar la realidad contra la contribución de los usuarios; parte de esa comparación será simulada durante la ejecución del proyecto. Pero resta aún resolver cómo se hará ese procesamiento cuando no se tenga acceso a una realidad del terreno, sino simplemente a los datos previos. El problema puede formularse en el sentido de resolver cómo se criticarán los datos que arriban para descartar ataques maliciosos (de cyber-matones o *griefers*; *spammers*, etc.) o simples errores no intencionados.

El término *citizen science* es a menudo utilizado para referirse a las actividades de comunidades de voluntarios, que no obstante proveen datos con criterios científicos y bajo ciertos estándares. Se pueden encontrar experiencias previas de larga data en temas de recopilación, validación y tratamiento de datos para

modelos de superficie oceánica o en el área de datos meteorológicos. Por ejemplo, la red de la Organización Meteorológica Mundial cuenta con sofisticados algoritmos para incorporar/descartar datos obtenidos de los países miembros (Di Mego, 1988; Gandin, 1988; Parrish, 1992). Cuando se considera la recolección de datos por parte de voluntarios se trata, hay un par de ejemplos relevantes: redes en tierra firme (Smith and Simmons, 2001; Weaver 2002; Creager 2006) o en el mar (Allsup and Hosom, 1996).

Estos casos ilustran la idea general; sin embargo hay dos características sustanciales que señalar. La primera es que en meteorología hay ecuaciones fundamentales que deben verificarse (balance de masa, leyes de Newton, etc.), lo que no ocurre con otras magnitudes espaciales. La segunda diferencia es que en estas redes voluntarias el instrumento es provisto o especificado por la autoridad meteorológica, cosa que no ocurre en general.

Para explorar las posibilidades de aplicación de conceptos de VGI se propone trabajar con Modelos Digitales de Elevación (MDE).

Los MDE han sido siempre requeridos y utilizados por ingenieros, arquitectos, responsables del ordenamiento territorial, militares y expertos en otras disciplinas. Desde la década de los 50, con la introducción de la computación, el terreno pasó a modelarse numéricamente o digitalmente. En ocasiones se usa como sinónimo el término Modelo Digital de Terreno (MDT) aunque no hay unanimidad de los autores en este aspecto, ya que algunos reservan el nombre para la cota del terreno mientras que utilizan el otro para el punto más bajo de la atmósfera (que corresponde al terreno despejado, al techo de los edificios o la copa de los árboles)

*Un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representan la distribución de las alturas de la superficie del terreno.* (Felicísimo, 1994).

No todos los MDE son igualmente útiles: se diferencian entre sí por la resolución y por la exactitud, y diferentes aplicaciones plantearán diferentes requisitos.

Los MDE se generan tradicionalmente en una única gran tarea, utilizando esencialmente tecnología uniforme en toda una región. Es por lo tanto encarado en el marco de un gran proyecto, costoso y complejo, encomendado

a especialistas trabajando en un grupo coordinado. Se logran así exactitudes óptimas para la tecnología usada.

Los cambios tecnológicos (Internet, SIG, potentes CPU, etc.) han hecho que se incremente el número de usuarios, se facilite el acceso de los mismos a la información, y se planteen nuevos desafíos utilizando para resolverlos más información que ahora está disponible. Los usos previstos para los MDE han desbordado las previsiones, y hoy se necesitan exactitudes mucho mayores a las requeridas en el pasado. ¿Cómo se satisfacen esas nuevas necesidades? En algunos países ricos, simplemente se adopta una nueva tecnología y se repite el trabajo de construir un nuevo MDE cuando es necesario, ya que la exactitud obtenida permanecerá constante. Normalmente el viejo MDE se descarta; Podobnikar (2005) ha evaluado el resultado que podría obtenerse si se realiza una mezcla adecuada entre MDE de diferente exactitud, las cuales (dependiendo de la técnica de producción) tienen a su vez zonas problemáticas (áreas forestales para MDE fotogramétricos; superficies libres para SRTM) que con máscaras adecuadas pueden filtrarse. Para los MDE de baja resolución hay incluso disponibles versiones públicas que cubren el globo terrestre, lo cual no deja de ser adecuado para algunas aplicaciones.

En los países en desarrollo simplemente no es posible aspirar a que se genere/actualice el MDE, y el ciudadano deberá resignarse a utilizar información inadecuada proveniente de fuentes globales.

Nótese que técnicamente la construcción de un MDE no constituye hoy un problema; se pueden obtener con diferentes tecnologías y exactitudes que se describirán brevemente.

### **Obtención de un MDE**

En términos generales, los datos para conformar un MDE, pueden provenir de de:

- **Relevamientos de campo usando receptores GPS o estaciones totales.**

En la hipótesis de un uso correcto del instrumental y de las herramientas informáticas de post proceso, los MDE que se generen con estos datos tendrán alta exactitud. Se debe tener en cuenta sin embargo, que se tratan

de métodos caros y lentos, por lo que no son prácticos para el relevamiento de grandes áreas ya que hay que recorrer físicamente el terreno.

- **Imágenes aéreas o espaciales**

El uso de este tipo de imágenes, es una de las maneras más efectivas para producir y actualizar mapas topográficos en regiones de tamaño medio y grande, dando la mejor relación costo/beneficio. Los MDE obtenidos en base a fotografías aéreas, pueden presentar una enorme variedad en la exactitud del mismo, dependiendo de la altura de vuelo y la distancia focal de la cámara, la exactitud en el apoyo de campo, el método de aerotriangulación utilizado, la resolución al escanear los fotos, así como la experiencia del operador y el instrumental utilizado.

No hay tanta variedad cuando las imágenes son obtenidas por satélites. Por ejemplo, imágenes obtenidas por el sistema SPOT de 20 m de resolución, son usadas para crear MDE de escala pequeña cubriendo grandes superficies. Por otra parte, las imágenes obtenidas por el satélite IKONOS tienen resolución de 1 m, y evidentemente permiten mejorar exactitudes. La ventaja de los satélites sobre las fotos aéreas es que hay una fuerte periodicidad en la toma de datos. La desventaja es la resolución fija.

En los casos mencionados las imágenes se generan de forma pasiva, ya que los sensores espaciales reciben las radiaciones electro magnéticas reflejadas por el terreno. Otros sistemas permiten enviar ondas electro magnéticas al terreno y recibir las reflejadas por el terreno, como es el caso del RADAR que se analizará más adelante.

- **Mapas topográficos existentes y digitalización cartográfica**

En general, los países tienen cartografiados sus territorios, y dependiendo de los recursos invertidos, la calidad de los mapas topográficos suele ser variable. Uruguay dispone de cobertura completa, con curvas de nivel incluídas, a escala 1:50.000 para todo el país. Las curvas de nivel están cada 10 m y en la zona sur costera cada 5 m. Para centros poblados hay curvas cada 2 m, en formato digital. No se ha intentado producir un MDE digital oficial, sin perjuicio de existir esfuerzos aislados en ese sentido.

En cualquier caso, dichos mapas, pueden ser considerados una fuente para obtener un MDE a partir de sus curvas de nivel. Claramente, la escala del

mapa, condicionará la equidistancia de las curvas, y en consecuencia la exactitud con la que se pueda obtener un MDE. En general, se espera que la exactitud de un punto aislado esté entre  $1/2$  y  $1/3$  del intervalo de la curva aunque eso no ha sido sistemáticamente confirmado. Méndez (2008) evaluó la exactitud planialtimétrica de la cartografía papel en la carta J-28, resultado de su trabajo que en ese caso la exactitud vertical de acuerdo al NSSDA era del orden de 6 m. Respecto de la digitalización cartográfica, se puede mencionar 2 métodos básicos:

- Vectorización
- Rasterización

Los procesos mencionados, tienen además, diferentes grados de automatización que dependerá de los recursos disponibles de la organización a cargo del trabajo.

El proceso de vectorización no es sencillo, y el resultado es muy dependiente de la exactitud del dato original en papel. La relación costo/beneficio es mejor que con el trabajo de campo, aunque ello es engañoso ya que claramente se presupone que se ha realizado un trabajo fotogramétrico previo, que es la parte más laboriosa y costosa.

- **SAR (Synthetic Aperture Radar)**

Las imágenes adquiridas por SAR, son ampliamente utilizadas ya que es muy sensible a las variaciones del terreno. La imagen radar es producida por un sensor activo que emite microondas, recibiendo y registrando los ecos reflejados por el objetivo. La ventaja sobre sistemas infrarrojos y ópticos, es que las imágenes radar siempre son nítidas independientemente de que se capten de día, de noche, o bajo cualquier condición climática.

Es la base para 3 tipos de técnicas: radargrametría, interferometría y radarclinometría. La radargrametría adquiere datos a través de medidas de paralaje. La interferometría SAR capta los datos a través de la determinación de desfase entre dos ecos. Imágenes de la misma área tomadas desde posiciones distintas, pueden usarse para formar un interferograma, y la diferencia de fases registradas en el interferograma

pueden ser usadas para generar un mapa topográfico La radarclinometría no tiene una exactitud suficiente para la generación de un MDE.

La relación costo/beneficio es similar a la de otras imágenes de satélite, aunque en contrapartida la frecuencia de las observaciones es menor ya que el satélite consume energía al captar la imagen.

- **LIDAR**

El LIDAR es un sistema activo, por lo que envía energía electromagnética y registra la reflejada por la superficie del terreno y los objetos sobre el mismo.

El uso del láser aplicado a sensores remotos tiene una historia de unos 30 años. El sistema fue mejorando la resolución y el scanner láser aerotransportado (ALS) se convirtió en una importante herramienta opcional para sensores remotos, fotogrametría, y mapeo (Ackermann, 1996). El sistema ALS, sistema remoto activo, es más comúnmente denominado LIDAR .

Este sistema es de gran ayuda cuando la fotogrametría falla o se torna demasiado costosa, como por ejemplo en áreas con vegetación muy densa (Estornell *et al.*, 2007). El costo de producir un MDE con esta tecnología es alto, y en América del Sur solamente hay disponible sensores en Venezuela.

### **Datos disponibles. Modelos globales**

La propuesta del proyecto apunta a refinar un MDE de partida, asimilando datos proporcionados por voluntarios descoordinados sin perjuicio de otras fuentes. Para contemplar aspectos de propiedad intelectual ese MDE de partida tendría que tener claramente estipulados los derechos de copia, etc.

Por otra parte, la estrategia de difusión consiste en poner a disposición de todos los interesados del software a desarrollar, el cual será más fácil de operar en otro país si el MDE de partida es el mismo. Para atender ambos fines es que se ha relevado la existencia de MDE globales de libre uso. Los MDE globales han sido generados en diferentes momentos por organismos como NASA, y gradualmente pasan a ser de acceso público mediante la Web. Se mencionan a continuación los modelos más importantes y recientes:

## SRTM

La misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) se realizó en colaboración entre National Aeronautics and Space Administration (NASA) y National Imagery and Mapping Agency (NIMA), denominada NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) desde 2003. En principio se generó un modelo de 90 metros de resolución, y luego se logró un modelo de 30 metros de resolución de acceso más restringido

## ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model)

ASTER es un sensor de imágenes construido por el METI de Japón (Ministry of Economy, Trade and Industry), e instalado en el satélite Terra de la NASA. Puede realizar coberturas estereoscópicas y obtener un MDE de resolución de 30 metros y alturas con errores medios cuadráticos que van de 10 a 25 metros. La producción del ASTER GDEM involucró el procesamiento de 1,5 millones de imágenes, incluyendo estéreo correlación para crear el modelo en mosaicos de 1° por 1°.

Luego de generado el modelo, se creó el ASTER GDEM Validation Team, grupo de trabajo que tuvo por cometido la validación del modelo en todo el mundo. Para llevar a cabo esta validación se realizó un llamado internacional para colaborar voluntariamente con la tarea. En el marco de esta iniciativa, el Servicio Geográfico Militar apoyó a un grupo de trabajo, (Méndez y López, 2009), y participó en la misma evaluando 5 mosaicos de 1° por 1° que cubren parte del territorio nacional.

Hoy, el ASTER GDEM es un MDE auditado y de uso libre. Dependiendo de la parte de la Tierra que se considere representada por el ASTER GDEM, los errores son bastante variables, pero en el informe final, se acordó estimar una exactitud vertical global de 20 metros, con el 95% de confianza.

## **Comparación de las distintas formas de obtener un MDE.**

La variedad de métodos disponibles para obtener un MDE, ofrece posibilidades que deberán ser seleccionadas según un criterio técnico y económico. Una correcta decisión al respecto permite cumplir con los objetivos técnicos, con la mejor relación costo/beneficio posible.

La tabla 1 resume las principales características de los métodos en cuanto a su velocidad, exactitud y costos.

<b>Método para la adquisición de datos</b>	<b>Precisión de los datos</b>	<b>Velocidad de captura del Dato</b>	<b>Costos</b>	<b>Dominio de aplicación</b>
Relevamiento tradicional	Alta (cm - m)	Muy lento	Muy altos	Areas pequeñas
Relevamiento GPS	Relativamente alta (cm - m)	Lento	Relativamente altos	Areas pequeñas
Relevamiento Fotogramétrico	Media a alta (cm - m)	Rápido	Relativamente bajo	Areas medias a grandes
Fotogrametría espacial	Baja a media (m)	Muy rápido	Bajo	Areas grandes
InSAR	Baja (m)	Muy rápido	Bajo	Areas grandes
Radargrametría	Muy baja (10 m)	Muy rápido	Bajo	Areas grandes
LIDAR	Alta (cm)	Rápido	Alto	Areas medias a grandes
Digitalización de mapas	Relativamente baja (m)	Lento	Alto	Para cualquier área

*Tabla 1 Relación costo/beneficio para producir un MDE según cada tecnología considerada. Adaptado de Li et al., 2005*

### **Técnicas de interpolación para modelar la superficie del terreno**

La interpolación en los MDE es usada para determinar el valor de la altura de un punto, en base a la altura conocida de puntos cercanos.

Modelados según la unidad geométrica básica:

- Puntos. Se construye una superficie plana para cada punto, por lo que el modelo se forma de manera discontinua por superficies contiguas
- Triángulos. Se toman 3 puntos que determinan una superficie, el modelo se genera entonces por un conjunto de triángulos contiguos. La superficie es continua pero hay saltos abruptos de pendiente a lo largo de los lados de los triángulos.
- Grillas. Se usan al menos 4 puntos para generar la superficie (superficie bilineal). En teoría pueden ser usados cuadriláteros de cualquier forma, pero por razones prácticas una grilla cuadrada es lo más adecuado. El ASTER GDEM es de este tipo.
- Método híbrido que utilice 2 de los 3 ya mencionados

Trabajos relativamente recientes, proponen métodos de modelados de superficies aplicados a la construcción de MDE, basados en el Teorema

Fundamental de Superficies (Yue *et al.* 2007), los que serán evaluados durante el proyecto.

Para interpolar típicamente se asume lo siguiente:

- La superficie del terreno es continua
- Hay una alta correlación entre puntos cercanos o vecinos (ley de Tobler de la geografía)

La función de interpolación  $z = f(x, y)$  no es única, y diferentes funciones producirán diferentes MDE. Este no es un problema nuevo ni específico para los datos geográficos, (Meijering, 2002). Para el caso de datos geográficos, existen muchos trabajos que comparan el desempeño de diferentes formas funcionales con el ánimo de concluir que algunas son sistemáticamente mejores que otras (Lam, 1983; Caruso and Quarta, 1998; Li and Revesz, 2004; Yue *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2009; Sluiter, 2009). Todos ellos tienen una estructura similar: aplican un conjunto de métodos de interpolación a un juego de datos en particular, y comparan los resultados utilizando una métrica representativa (típicamente el error medio cuadrático), concluyendo que uno de los métodos presenta mejores resultados que los demás. Los autores no se han esforzado en darle validez estadística a esa conclusión, ni evalúan métricas alternativas que podrían apoyar o desmentir la jerarquía entre métodos. Tampoco se extraen conclusiones sobre la generalidad de los resultados: los mismos siempre están asociados al juego de datos bajo evaluación. López y González (2009) han descrito un procedimiento de Monte Carlo (igual al que será utilizado en este proyecto) que al menos da validez estadística y niveles de confianza a la jerarquía entre métodos, dejando abierto el problema del efecto del juego de datos mismo.

Sluiter (2009) clasifica los métodos en determinísticos y probabilísticos. Entre los primeros, los métodos más populares incluyen:

- interpolación ponderada con el inverso de la distancia al cuadrado
- Interpolación polinomial a trozos (splines, TIN, etc.)
- Redes neuronales artificiales (López, 1997)
- Uso de Teoremas fundamentales (Yue *et al.*, 2007)

Entre los segundos se incluyen:

- Krigado (con sus variantes Ordinaria, Universal, Residual, etc.)

- Interpolación óptima (Gandin, 1988)

Para establecer una jerarquía entre los métodos que permita ordenarlos de acuerdo a su desempeño se aplicará una simulación de Monte Carlo. Para cada instancia de la simulación la jerarquía entre los métodos es determinista y basada en el NSSDA, pero ello no implica ni asegura un criterio al considerar toda la simulación ya que algunos métodos podrán ser mejores en algunas instancias, y muy malos en otras. López y González (2009) han aplicado por primera vez el test de Friedman a este tipo de problemas permitiendo así la definición del algoritmo estadísticamente más adecuado para un nivel de confianza dado.

### **Errores en la producción de un MDE**

Las fuentes de errores durante la generación un MDE son diversas (Fisher y Tate, 2006), por lo que si se desea obtener uno de alta exactitud se deberá poner especial atención en:

- Minimizar errores que se introducen durante la adquisición de datos
- Aplicar procedimientos que eliminen errores o que reduzcan sus efectos
- Minimizar los errores introducidos durante el proceso del modelado de la superficie.

En la medida que por hipótesis no se tiene incidencia en la producción del MDE de base no parece necesario extenderse más en este aspecto, muy abordado en la literatura especializada.

### **Mejora *a posteriori* de la exactitud de un MDE**

Los MDE se obtienen con un procedimiento que, como se ha visto, puede ser muy variados en su técnica, exactitud resultante y costos asociados. Con el MDE terminado, se puede evaluar su exactitud con algún estándar adecuado.

Se puede lograr también mejorar esa exactitud, ya sea con un procedimiento que detecte errores groseros, (Felicísimo, 1994; López, 1997; López 2000; López, 2002), o bien implementado un mecanismo por el cual, con puntos de campo seguros y ciertos métodos de interpolación, se pueda mejorar la exactitud (Eulliadés y Vénere, 2003; Golyandina *et al.*, 2007).

En un experimento con cierta relación al que se propone los autores manipulan un MDE generado con imágenes SPOT tratando de mejorar su exactitud.

Como primer transformación proponen realizar transformaciones rígidas (traslaciones, rotaciones, etc.) de forma de minimizar el error medio cuadrático calculado en los puntos de control disponibles. Posteriormente, y utilizando conceptos de tratamiento de señales, postulan que la superficie de error remanente tiene componentes de baja y alta frecuencia. Para corregir la primera se aplica un filtro pasabajos, y para corregir el error local se apela a una función de corrección resolviendo una ecuación de Laplace.

Una herramienta muy importante para llevar adelante estos procesos, es la geoestadística, que provee de ciertos conceptos que mejoran el modelado del terreno y el tratamiento de su error (Fisher, 1998; Oksanen, 2006; Björke and Nielsen, 2007)

### Antecedentes del equipo de trabajo

Daniel Deagostini tiene una larga trayectoria como experto internacional en fotogrametría, participando en importantes proyectos de producción de información de base, incluyendo las obtenidas por métodos fotogramétricos. Ha sido asesor de varios gobiernos, profesor en varias universidades de Europa y la región, siempre sobre el área de fotogrametría y cartografía numérica. Carlos López ha realizado su tesis en la mejora de exactitud de datos geográficos en general y MDE en particular, basado en la detección y remoción de datos aberrantes. Ello podría ser un antecedente válido para aplicar al mecanismo de crítica de datos suministrados por los voluntarios, pero no considera los datos no aberrantes. Dentro del SGM Rodolfo Méndez ha realizado trabajos de medida de exactitud en MDE, tanto para el país como en colaboraciones internacionales. Su tesis de doctorado versa sobre el tema del proyecto. El equipo de la División Fotogrametría del SGM tiene una nutrida experiencia en esas técnicas, que comienza en los años 50. Entre sus trabajos más recientes pueden citarse la restitución de las zonas urbanas y suburbanas del interior, incluyendo la generación de MDE a partir de curvas de nivel cada 2 m. Dispone de equipamiento adecuado (digital y analógico) para estos fines y del asesoramiento del Prof. Deagostini.

### Descripción del proyecto

En el marco actual de Uruguay, en donde se apunta a sistemas integrados de información geográfica útiles para la toma de decisiones, un componente de esa información son los Modelos Digitales de Elevación (MDE) (GTIDE, 2006). La creación de un MDE adecuado para un país puede tener un costo importante. Cuando se trata de países con grandes recursos económicos, los MDE pueden ser obtenidos con la tecnología disponible, y vuelto a adquirir cuando sea necesario con otra tecnología más nueva. Si no hay un límite para los recursos, cada nueva tecnología puede utilizarse para hacer un nuevo modelo más preciso. Claramente hay que repetir el proceso en caso de terremotos, deslizamientos significativos de terreno, etc. que no es la hipótesis que se está analizando.

Los MDE no son todos igualmente útiles, y se distinguen entre sí por la resolución (concepto asociado con la exactitud planimétrica) y exactitud (entendido como la exactitud altimétrica). Dependiendo de las aplicaciones se necesitan diferentes requerimientos. Para aplicaciones de erosión la exactitud no necesita ser muy alta, pero para diseño de una red de alcantarillado o de canales de riego la misma pasa lo contrario. En estos últimos casos siempre se recurre a trabajo de campo, donde se toman medidas de alta exactitud en puntos aislados. La idea del proyecto es refinar progresivamente un MDE disponible, incorporando adecuadamente puntos suministrados por voluntarios (típicamente ingenieros agrimensores, pero no necesariamente restringido a ellos) de forma de ir mejorando la exactitud altimétrica. Como subproducto se obtendrá una estimación del error en aquellos puntos no evaluados, lo que orientará a los usuarios para decidir sobre el uso o no del MDE disponible.

Uruguay no dispone a la fecha de un MDE oficial y auditado, por lo que hay una necesidad productiva a satisfacer.

Los resultados del proyecto pueden en principio extenderse a otro tipo de datos que varíen en el espacio. Por ejemplo, en aplicaciones de agricultura de precisión podría requerirse información de niveles de nutrientes que se conocen en los puntos de muestreo. De determinarse que la exactitud no es suficiente para describir la variación en el espacio, es necesario agregar nuevos puntos los cuales se pueden asimilar con los ya existentes mejorando progresivamente el dato. El sistema informático podría, con pequeñas modificaciones, procesar información de ese tipo.

Los beneficiarios potenciales incluyen a los profesionales agrimensores mismos, instituciones del estado, productores individuales y agremiados, etc. típicamente en áreas rurales. La literatura en MDE y sus aplicaciones es extensa (Li, 2005; Felicísimo, 1994, etc.) incluyen

- Aplicaciones en agricultura de precisión
- Análisis del potencial de erosión
- Estudios eólicos
- Diseño preliminar de carreteras
- Diseño preliminar de tendidos de redes eléctricas de alta tensión
- Estudio de intervisibilidad entre antenas
- Diseño preliminar de regadíos, represas, etc.

En algunos casos lo relevante no es el MDE sino el gradiente (i.e. modelo de pendientes) el cual se obtiene mediante procesamiento. En la mayor parte de los casos la cota absoluta (respecto al cero del puerto de Montevideo) no es relevante, sino solamente con respecto a una cota de referencia local.

La demanda no ha sido cuantificada, pero se tiene noticias de trabajos realizados mediante una laboriosa digitalización de la cartografía en papel del SGM. Los MDE de dominio público (como el ASTER GDEM) probablemente satisfacen en parte las necesidades de la demanda, pero no constituyen una solución para la mayoría. Como indicadores del interés pueden mencionarse las expresiones de interés recogidas de organismos del estado y de asociaciones profesionales, lo que en modo alguno implica que son los únicos a beneficiarse.

Se estima que la demanda esperada estaría conformada de algunos cientos de interesados. A diferencia de un MDE estático, en este caso es posible que esos cientos de interesados vuelvan regularmente a descargar la información ya que la misma podría actualizarse con regularidad.

### [Aplicabilidad de la propuesta](#)

Como todo proyecto que presupone la contribución voluntaria del público, la aplicabilidad está vinculada al volumen y calidad de esos aportes. Se han hecho contactos con las autoridades de la Asociación de Agrimensores del Uruguay, quienes han visto con muy buenos ojos la iniciativa. También se han visitado otros organismos e instituciones que pueden ser potencialmente proveedores de datos (en campañas organizadas para sus propios fines y que

requieren la recolección de información con GPS) como ser Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), y Universidad de la República-Facultad de Ingeniería (UDEAR –Fing), así como empresas proveedoras de tecnología aplicada a la geomática (GEOSYS) para impulsar la popularización de la tecnología en la plaza. Todos ellos han manifestado por escrito su interés y auspicio al proyecto, lo cual se documenta en los adjuntos. Nótese que se ha obviado la nota de adhesión del SGM, el cual es un organismo que realiza típicamente 90 días de trabajo de campo en diferentes regiones del país. En esas campañas se recoge información de variado tipo, y es estándar el uso de GPS de media y alta precisión que pueden perfectamente contribuir al MDE que se está proponiendo. Sin perjuicio de ello, el SGM probablemente realice trabajos en zonas específicas si se identifican problemas y/o necesidades en las mismas. Los aspectos de libre distribución estarían asegurados al tomar como punto de partida el ASTER GDEM de la NASA, y diseminar el dato a través del SGM con una licencia adecuada. El MDE producido (que tendrá su exactitud auditada) será un aporte muy importante a la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) que se está creando coordinada por AGESIC (ver [www.agesic.gub.uy](http://www.agesic.gub.uy)), ya que se considera que el MDE es una de las capas de información fundamentales. En el caso de Uruguay no existe al presente un MDE oficial a pesar de su necesidad, necesidad que se ve reflejada también directamente por los auspicios expresados (MGAP, MTO, DNM, UDEAR, AGESIC, GEOSYS Y ORT.)

Además de las ya mencionadas obviamente deberá existir una plataforma informática apropiada (i.e. servidor de datos, servidor de cálculo, acceso a Internet, etc.) todo lo cual sería suministrado por el SGM dentro de sus cometidos.

### Objetivo general y objetivo específicos

Objetivos generales	Indicador verificable
Explorar aplicaciones tipo Web 2.0, en las que la comunidad participe/colabore en la	Implementar una aplicación concreta

recolección/generación de datos de calidad	
Ilustrar con un MDE los procesos de creación, gestión y crítica con mejora continua aplicables a datos de similares características	El sistema produce instancias del MDE cada vez más exactas
Respaldar científicamente la auditoría de exactitud de los datos geográficos en general, y del MDE en particular	Se producen informes estandarizados de la exactitud del MDE
Apoyar a la Infraestructura de Datos Espaciales de Uruguay incorporando un dato básico hoy faltante	El MDE pasa a ser oficial

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Indicador verificable</b>
Auditar un MDE inicial ya existente, generando información sobre su exactitud en diferentes zonas	Publicación de la cobertura de exactitud de un MDE dado
Generar MDE de alta exactitud con métodos tradicionales para una o más zonas bien delimitadas del territorio, junto con la medida de su exactitud	Publicación de los MDE obtenidos
Investigar algoritmos que cumplan con el cometido de incorporar datos de precisión heterogénea para mejorar el modelo de partida.	Publicación de artículo con el estado del arte
Implementar algoritmos anteriores	Sistema informático funcionando
Producir un MDE que mejora progresivamente su exactitud a bajo costo	El MDE se publica en el portal de la IDE-UY
Implementar y poner a prueba el sistema de captura de datos recogidos por voluntarios	Sistema informático funcionando

### Resultados esperados

<b>Resultado esperado</b>	<b>Indicador</b>
---------------------------	------------------

Generar un ejemplo válido de una cultura de cooperación para la obtención de datos geográficos, en la que los organismos productores toman ventaja de aportes no organizados.	Nivel de visitas a la página web, socios registrados y número de datos contribuidos
Desarrollar una tecnología innovadora de la cual hay poco o ningún antecedente en aplicaciones geográficas.	Informe y publicaciones científicas
Permitir la creación y mejora continua de un modelo digital oficial auditado para Uruguay.	MDE disponible con metadatos

### Metodología y Plan de Trabajo

En lo que a los aspectos técnicos se refiere el proyecto tiene dos problemas a resolver: a) encontrar métodos y algoritmos que permitan la mejora progresiva al incorporar nuevos datos y b) proveer criterios para criticar los datos que arriban, rechazando los inadecuados y aceptando los otros. También hay otras actividades accesorias, funcionales a las anteriores, que serán descritas con menos detalle.

### ***Encontrar métodos y algoritmos***

Es necesario definir previamente la métrica que se aplicará para confirmar que la exactitud del MDE es mejor, peor o similar a la de encarnaciones previas del mismo. Para ello ya utilizará un estándar existente (NSSDA, 1998) el cual, en pocas palabras, utiliza como métrica el error medio cuadrático de la discrepancia observada en al menos 20 puntos de control adecuadamente distribuidos en la región de interés. Si bien el NSSDA refleja la práctica corriente, su extrema sencillez conspira contra la utilidad de sus resultados. Así, Oksanen (2006) señala que caracterizar la superficie del error de un MDE con un único número es una sobresimplificación. El autor realizó además un experimento en el que comprobó que ese número tampoco define un escenario de peor caso si se analizan estadísticamente los efectos/perjuicios en productos derivados del MDE (pendientes, delimitación de cuencas, etc.).

Los métodos que se describirán arrojan resultados que dependen en alguna medida de la localización en el espacio de los nuevos puntos de dato que se vayan incorporando. Ello es una limitación inevitable, propia de los métodos, y que tampoco puede remediarse en el escenario de aplicación de la investigación ya que no podrá diseñarse una localización óptima de esos puntos, del estilo de la descrita en Samper y Carrera (1990). Por ese motivo se realizará una simulación de Monte Carlo en la que se aplicarán los algoritmos a diferentes conjuntos de puntos, seleccionados total o parcialmente al azar, y la decisión sobre la mejora o no del MDE se tomará considerando una población de resultados y no un único número. Ello le conferirá solidez estadística al resultado, el cual será suministrado con un nivel de confianza.

Otro aspecto que en cambio será difícil de ensayar es asegurar que los resultados estadísticos no son peculiares de la región estudiada. Si bien se podrá aplicar el procedimiento que se describirá en dos o tres regiones de diferente morfología, es claro que hay (para Uruguay) inevitables limitaciones en este sentido. En cambio, en otros países en los que se ya se disponga de un MDE de alta exactitud y otro como el ASTER GDEM, podría hacerse un análisis más detallado variando también la región analizada. Esta posibilidad de momento queda por fuera de los objetivos de este proyecto.

## **Datos**

Para facilitar la difusión de los resultados de la investigación es conveniente utilizar un MDE global, de dominio público y ya auditado, ya que el experimento podría ser replicado más fácilmente en otras regiones. Esta elección no es crucial, y en su versión operacional el sistema podría comenzar su operación con cualquier otro MDE disponible. Como ventaja adicional, el ASTER GDEM ya ha sido evaluado en Uruguay por Méndez y López (2009) como parte de las actividades descritas por un equipo del METI (Japón), NASA y USGS (USA) en Anon (2009).

El ASTER GDEM tiene cobertura mundial, con una resolución nominal de 30 m en planimetría. Es el sucesor de SRTM, y su diferencia fundamental es que se removieron automáticamente los pixels con nubes y las imágenes se promediaron antes de correlacionar de forma de tener un valor promedio libre de ciertos problemas. Los errores en la vertical fueron evaluados con gran

cuidado sobre USA y Japón, y para el resto se realizó un muestreo. En el caso de Uruguay se participó evaluando cinco mosaicos que arrojaron un error típico en cota entre 9 y 18 m. En ese trabajo no se intentaron correcciones del estilo de las propuestas por Euilliades y Vénere, (2003) que podrían bajar este error inicial ajustando el datum vertical.

Para tener elementos de comparación es necesario tener acceso a la realidad del terreno  $R_T$  a través de medidas de campo. Las mismas serán realizadas por personal del SGM utilizando equipos GPS geodésicos (L1, L2) marca X-Treme y ASTECH Z-12, capaces de lograr exactitudes relativas subdecimétricas. Se tomará un número grande de puntos sobre el terreno, con el objetivo de conformar dos conjuntos que se describen más abajo. El error esperado en la cota absoluta con este instrumental es del orden del decímetro.

Como se explicará más adelante, para los experimentos de Monte Carlo será necesario disponer de un MDE de referencia, suficientemente preciso para que pueda ser considerado como una realidad alternativa  $R_A$ . De esa forma, la bondad del MDE de mejora continua será medida *a los efectos de la simulación de Monte Carlo* con referencia a  $R_A$  (lo cual puede hacerse dentro del computador) sin requerir relevar cotas en puntos arbitrarios de  $R_T$ .

La producción de  $R_A$  se realizará utilizando los procesos habituales de la División de Fotogrametría, Sección Restitución, del SGM, utilizando fotos aéreas disponibles. Uno de los conjuntos de puntos de campo mencionados antes se denominará Puntos de Apoyo de Campo (PAC en lo que sigue) los cuales serán utilizados para la construcción del modelo fotogramétrico  $MDE_A$  siguiendo procedimientos estándar. El resto de los puntos constituirán el conjunto de Puntos de Evaluación Vertical (PEV), los cuales como su nombre indica serán utilizados para controlar la exactitud del propio  $MDE_A$  así como del ASTER GDEM.

### **El proceso de producción de $R_A$**

A los efectos de alimentar a la simulación que se describirá más abajo es necesario construir una realidad alternativa con ciertas características. El proceso es un poco más largo, e incluye lo siguiente:

## **Selección de una zona de trabajo**

La selección de la zona a trabajar, será una decisión que estará basada en

- Criterios económicos
- Criterios técnicos
- Criterios de oportunidad

Los criterios económicos serán tomados en cuenta para poder elegir una zona de trabajo, que sin contradecir los criterios de oportunidad o técnicos, minimicen los costos operativos, en particular en toda la logística relacionada a la preparación, mantenimiento y transportes necesarios para enviar un equipo a campaña.

Desde el punto de vista técnico, se elegirá una zona que pueda tener un vuelo fotogramétrico a la escala más grande posible; en particular, hay varias zonas con vuelos a escala 1:5000 que podrían ser útiles para el proyecto.

Los criterios de oportunidad tendrán en cuenta hechos circunstanciales que puedan hacer que el llevar a cabo el proyecto en alguna zona en particular, sea de particular interés técnico o productivo.

Llegado el momento, se tendrán en cuenta los criterios mencionados, para que la elección de la zona se traduzca en el máximo beneficio posible en todo aspecto. Una vez determinada la zona, se extraerá del ASTER GDEM la parte que corresponda para ser utilizado como punto de partida.

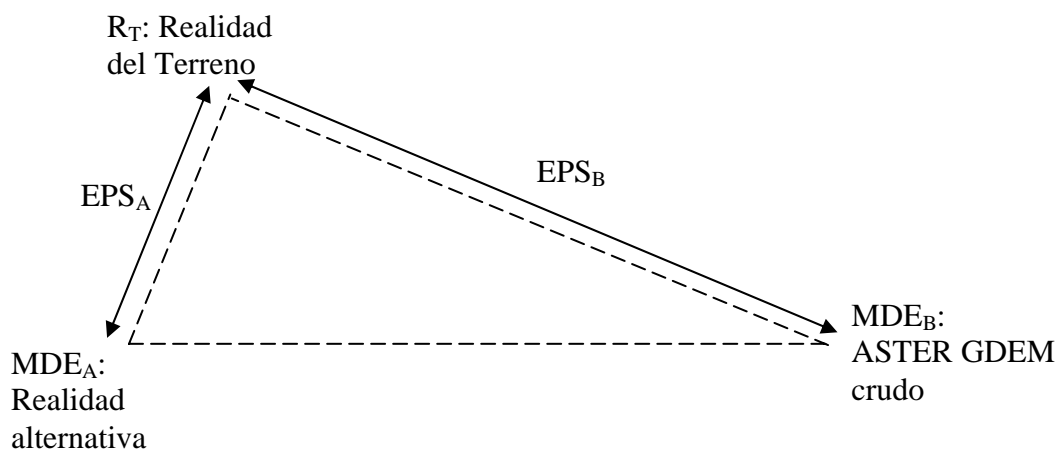
## **Generación del MDE\_A**

Con la zona seleccionada de trabajo, se abordan las siguientes tareas:

- a) Como primera etapa, se planifica el trabajo de campo en la zona seleccionada. El equipo de Fotogrametría elegirá los puntos en los cuales serán necesarias mediciones para poder realizar la restitución. Estos serán los puntos de apoyo de campo (PAC). El equipo de campo tendrá a cargo también la selección y medición de suficientes puntos adicionales cuyo conjunto será denominado PEV (puntos para cálculo de exactitud vertical). Como producto final resultan los conjuntos PAC y PEV.
- b) Construcción de un modelo digital de elevaciones de alta exactitud, obtenido por procedimientos por métodos fotogramétricos. (MDE\_A)

Con las fotografías y los PAC, el equipo de fotogrametría será capaz de generar el MDE\_A. Para conocer la exactitud vertical de dicho modelo, se le aplicará el estándar NSSDA con no menos de 20 de los 30 puntos del conjunto de puntos PEV (los cuales no necesariamente deben ser fotoidentificables). El resultado de aplicar el estándar permitirá conocer la exactitud vertical del MDE\_A con un 95% de confianza. Llamaremos a dicho estimador EPS\_A.

El MDE basado en el ASTER GDEM se denominará MDE\_B y será también evaluado en su exactitud vertical utilizando los mismos puntos del grupo PEV. El valor que arroje el estándar será denominado EPS\_B. La relación entre EPS\_A y EPS\_B se ilustra en la Figura 1.



*Fig. 1 Relación entre EPS\_A y EPS\_B*

La distancia R-MDE\_A, está representado por el indicador métrico EPS\_A Del mismo modo, la distancia R-MDE\_B, está representada por el indicador métrico EPS\_B.

Si se diseña todo el proceso fotogramétrico para que el MDE\_A sea muy próximo a la realidad R\_T, esto se reflejará en que EPS\_A será muy pequeño en comparación con EPS\_B. Bajo esta condicionante se tomará al MDE\_A como una realidad alternativa.

Esto es uno de los sustentos que permite argumentar que se mejora de manera continua la exactitud del MDE\_B, es llevándolo a que se asemeje cada vez más a la realidad del terreno  $R_T$ . Como ella es imposible de conocer, la comprobación de que el proceso de mejora continua funciona, es confirmar que el MDE\_B se asemeja progresivamente al MDE\_A (que sí es accesible) a medida que se le incorporan datos.

### **Algoritmos de interpolación**

La simulación descrita requiere la existencia de una función de interpolación  $z = f(x, y)$ . Se verá que la elección de esa función no es única, y diferentes funciones producirán diferentes MDE. Una vez seleccionado el mejor método se daría por cumplida la primer parte de los objetivos (*encontrar métodos y algoritmos que permitan la mejora progresiva al incorporar nuevos datos*). Sin embargo, la necesidad de atender también el segundo aspecto (*proveer criterios para criticar los datos que arriban, rechazando los inadecuados y aceptando los otros*) es una limitante para el método de interpolación. Los métodos que podrían cumplir ambos fines son los que Sluiter (2009) denomina como Probabilísticos, los cuales serán considerados en detalle.

### **Algunas características de los métodos geoestadísticos**

Si bien en el ámbito meteorológico suele ser más popular la Interpolación Óptima (devida a Gandin), se puede ver (Samper y Carrera, 1990) que en realidad podría ser considerado como una variante del krigeado. Ambas metodologías fueron desarrolladas simultánea e independientemente en la década del 60 por Gandin en la Unión Soviética (para aplicaciones meteorológicas) y Matheron en Francia (para aplicaciones en minería) a partir del trabajo pionero de Krige en Sudáfrica.

Lo que sigue es un breve resumen de las definiciones y resultados del Krigeado, tomado de Samper y Carrera (1990). El lector familiarizado con los conceptos puede omitir esta parte, y pasar directamente a la aplicación.

Según los autores, la Geoestadística es la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio. En teoría de la probabilidad una serie de  $k$  variables aleatorias dependientes  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$  definen un vector aleatorio  $\mathbf{Z}=[Z_1 Z_2 \dots Z_k]$  con  $k$  componentes. Análogamente, cuando el valor de una función  $Z(\mathbf{x})$  al variar  $\mathbf{x}$  en

el espacio  $R^n$  de  $n$  dimensiones  $Z(\mathbf{x})$  define una familia de variables aleatorias. A cada punto del espacio  $\mathbf{x}_0$  le corresponde una variable aleatoria  $Z(\mathbf{x}_0)$ .

De la misma manera que al tomar una muestra aleatoria  $\omega$  de una variable aleatoria  $Y$  (de acuerdo a su función de distribución) se obtiene una *instancia* o valor numérico  $Y(\omega)$ , al tomar una muestra aleatoria de una función aleatoria  $Z(\mathbf{x})$  se obtiene una función  $Z(\mathbf{x}, \omega)$ . La función  $Z(\mathbf{x}, \omega)$  se denomina realización, observación, instancia, etc. de la función aleatoria  $Z(\mathbf{x})$ . En lo que sigue se omitirá  $\omega$ .

En el caso de un MDE, lo que estaríamos asumiendo de adoptarse el modelo geoestadístico, es que la superficie del terreno es en realidad una función aleatoria. El terreno "real" no es más que una *instancia* particular de esa función, no más importante que otra (que no existe) que sea derivada de la misma función de densidad de probabilidad. Esta hipótesis es la piedra angular de la Geoestadística, y será la base de este proyecto. La función de densidad de probabilidad asumida en la teoría es la de Gauss, debiendo realizarse un proceso de anamorfosis si esta hipótesis no se cumple.

Se dice que la función aleatoria es estrictamente estacionaria si su función de distribución es invariante respecto a cualquier traslación de vector  $\mathbf{h}$  o lo que es lo mismo, la función de distribución del vector  $\mathbf{Z}=[Z(\mathbf{x}_1) \ Z(\mathbf{x}_2) \ \dots \ Z(\mathbf{x}_k)]$  es idéntica a la del vector  $[Z(\mathbf{x}_1+\mathbf{h}) \ Z(\mathbf{x}_2+\mathbf{h}) \ \dots \ Z(\mathbf{x}_k+\mathbf{h})]$  para cualquier  $\mathbf{h}$ .

Esta hipótesis es bastante fuerte, y se puede ver que la teoría puede desarrollarse asumiendo hipótesis de estacionaridad más débiles. Sin entrar en más detalles, se dice que una función aleatoria  $Z(\mathbf{x})$  es estacionaria de orden 2 (o de segundo orden) si:

- a) el valor esperado de  $Z(\mathbf{x})$  existe y no depende de  $\mathbf{x}$

$$E(Z(\mathbf{x})) = m \quad \forall \mathbf{x}$$

- b) Para toda pareja de variables regionalizadas  $\{Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}), Z(\mathbf{x})\}$  su covarianza existe y sólo depende del vector separación  $\mathbf{h}$ , es decir

- c)  $C(\mathbf{x}+\mathbf{h}, \mathbf{x}) = E[Z(\mathbf{x}+\mathbf{h}) * Z(\mathbf{x})] - m^2 = C(\mathbf{h})$

La covarianza estacionaria implica que la varianza  $Var(Z(\mathbf{x}))$  existe, es finita y no depende de  $\mathbf{x}$ , ya que  $Var(Z(\mathbf{x})) = C(0)$ . Se puede definir el semivariograma y bajo esta hipótesis ver que es también estacionario y que cumple

$$\gamma(\mathbf{x} + \mathbf{h}, \mathbf{x}) = \gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} E \left\{ [Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})]^2 \right\}$$

el cual es estrictamente no negativo. Para terminar esta presentación general, puede decirse que el semivariograma en general depende del vector  $\mathbf{h}$ , el cual tiene módulo y dirección. Si se puede asumir isotropía, entonces  $\gamma = \gamma(h)$ , siendo ahora  $h$  el módulo del vector  $\mathbf{h}$ .

Ya que el así llamado Kriging Universal incluye como caso particular otras variantes, y que los aspectos esenciales del método pueden ser ilustrados con ese ejemplo es que se hará un pequeño resumen.

### Notación del Kriging Universal

Sea  $Z(x)$  una función regionalizada no estacionaria. Su valor esperado será una función  $E[Z(x)] = m(x)$  que existe y puede ser modelada como una combinación lineal de funciones base  $f_l(x), l = 1, \dots, P$ . La diferencia  $\varepsilon(x) = Z(x) - m(x)$  se asume que es una variable regionalizada de media cero y segundo orden, que tiene un variograma  $\gamma_\varepsilon$  (Samper and Carrera, 1990):

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon(x); E(\varepsilon(x)) = 0 \text{ y } m(x) = \sum_l^N a_l f_l(x) \quad (1)$$

donde  $a_l$  son coeficientes a determinar. Se asume que la ec. (1) vale localmente (ya que en caso contrario debería utilizarse kriging residual). Se asume también que el variograma es conocido. El puede ver que el estimador del Kriging Universal se construye por lo tanto como combinación lineal de los datos disponibles de acuerdo a

$$Z^*(x) = \sum_l^N \lambda_l Z(x_l) = \sum_l^N \lambda_l Z_l$$

Para que sea insesgado, este estimador debe verificar:

$$E(Z^*) = E\left(\sum_l^N \lambda_l Z_l\right) = E(Z) = E[m(x) + \varepsilon(x)] = E[m(x)] = m(x)$$

lo cual implica que los coeficientes del kriging  $\lambda_l$  deben satisfacer las siguientes ecuaciones

$$\sum_l^N \lambda_l m(x_l) = m(x) \quad (2)$$

Siempre asumiendo que  $m(x)$  puede ser apropiadamente descrito con el subespacio de funciones denominado  $f$ , la ec. (2) puede ser reescrita como (Samper and Carrera, 1990):

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \left( \sum_{l=1}^P a_l f_l(x_i) \right) = \sum_{l=1}^P a_l \left( \sum_{i=1}^N \lambda_i f_l(x_i) \right) = \sum_{l=1}^P a_l f_l(x)$$

lo cual vale si

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i f_l(x_i) = f_l(x) \quad l = 1..P$$

Las ecuaciones para los coeficientes del krigado se obtienen luego de minimizar el error de estimación, y resultan ser

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma_\varepsilon(x_i - x_j) + \sum_{l=1}^P \mu_l f_l(x_i) = \gamma_\varepsilon(x_i - x) \quad i = 1, \dots, N(x)$$

donde  $\mu_l$  es el  $l$ -ésimo multiplicador de Lagrange y  $N(x)$  es el número de puntos vecinos (vecindario) que se desee participe en el cálculo. Su valor máximo es  $N$  pero típicamente se toma algo menor para considerar únicamente los puntos más próximos. Para simplificar se asumirá que  $N(x)=N$ , por lo que el estimador será global. El sistema a resolver puede ser escrito en forma matricial como

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \underline{\lambda} \\ \underline{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma & \mathbf{F} \\ \mathbf{F}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\lambda} \\ \underline{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\gamma} \\ \underline{f} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde  $\underline{\lambda}$  es el vector de coeficientes del krigado,  $\underline{\mu}$  es el vector de multiplicadores de Lagrange,  $\mathbf{F}$  es una matriz rectangular con elementos  $f_l(x_i)$ ,  $\underline{\gamma}$  es el vector de valores del variograma  $\gamma_j = \gamma_\varepsilon(x - x_j)$  y  $\underline{f}$  es el vector de valores de  $f_l(x)$  conocidos en los puntos dato.

Una vez determinados los coeficientes del krigado  $\underline{\lambda}$  es posible evaluar la varianza en el punto  $\mathbf{x}$ , que se calcula como

$$Var(Z(x)) = E \left[ \left( Z^*(x) - Z(x) \right)^2 \right] = \sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma_\varepsilon(x - x_j) + \sum_{l=1}^P \mu_l f_l(x)$$

### ***Crterios para criticar los datos***

Llegados a este punto, y bajo las hipótesis que correspondan (que habrá que verificar), se puede decir que el valor de la cota del MDE en el punto  $\mathbf{x}$  es un

número aleatorio de distribución normal con media  $Z^*$  y desviación estándar  $S = \sqrt{\text{Var}(Z(x))}$   $Z(x)$ , ambos conocidos luego de los cálculos realizados. Si el dato contribuido por el voluntario está fuera de un rango de confianza centrado en  $Z^*$  y cuya longitud depende de  $S$  y del nivel de confianza adoptado, entonces se puede descartar el dato. Si está dentro, el dato se puede asimilar y proceder en consecuencia.

También hay otra línea de investigación (Felicísimo, 1994; López, 1997) que provee criterios para detectar outliers. El primer método admite trabajar indistintamente con MDE en formato raster o TIN, mientras que el segundo es exclusivamente para formato raster.

### ***El experimento de Monte Carlo***

Una vez argumentado el porqué del algoritmo de interpolación y esbozado la forma en que se le utilizará para aceptar/rechazar los datos, es oportuno cuantificar las ventajas en términos de la métrica de exactitud de la aplicación de todo el procedimiento. Para ello se ha diseñado un experimento de Monte Carlo el cual incluye varias etapas.

Para la  $k$ -ésima simulación ( $k=1, \dots, P$ ), seleccionar  $N$  puntos contribuidos por los voluntarios  $(X_j, Y_j)$ , con  $j=1 \dots N$ , que se distribuirán en el espacio de alguna manera aleatoria. A cada punto se le calculará una cota que corresponda a la del modelo de alta exactitud para la misma posición. Al terminar esta etapa se dispondrá de  $N$  puntos  $(X_j, Y_j, Z_j)$  perteneciente a la realidad alternativa  $R_A$  caracterizada por  $MDE\_A$ .

Dependiendo de las propiedades matemáticas del algoritmo seleccionado, en las coordenadas planas  $(X_j, Y_j)$  ambos  $MDE\_A$  y  $S_{k,N}$  hacen contacto. Presumiblemente se podrá comprobar que la superficie  $S_{k,N}$  será más semejante a la realidad alternativa que el  $MDE\_B$  que no incorpora puntos voluntarios.

Se realizará un cálculo de la exactitud de  $S_{k,N}$  en los puntos PEV, comparando contra la realidad alternativa  $R_A$ . El número resultante, que varía para cada simulación  $k$ , se denominará  $EPS\_S_{k,N}$ . La relación entre las magnitudes mencionadas se ilustra en la figura 2

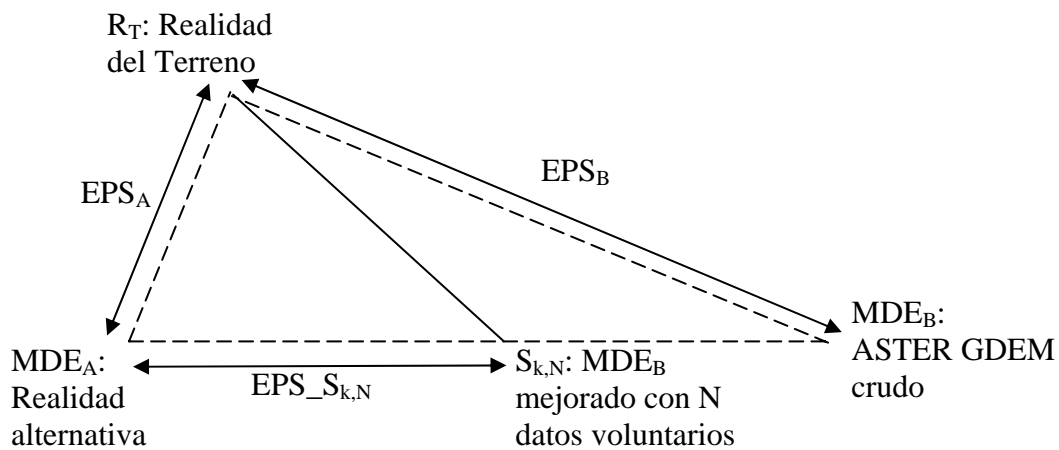


Figura 2 Relación entre  $EPS_A$ ,  $EPS_B$  y  $EPS_{S_{k,N}}$

El ideal sería comparar, en cada una de las  $P$  simulaciones, el MDE con mejora continua dado por  $S_{k,N}$  contra  $R_T$ . Como el terreno sólo es conocido en los puntos de campo, y se desea que las coordenadas de los puntos suministrados por los voluntarios sea al azar, es que se recurre al uso de la realidad alternativa  $R_A$ . Esta simplificación será válida si las diferencias entre  $R_A$  y  $R_T$  (medidas por  $EPS_A$ ) es pequeña frente a  $EPS_{S_{k,N}}$ .

El proceso, desde la selección aleatoria de los  $(X_j, Y_j)$ , hasta el cálculo del  $EPS_{S_{k,N}}$  se repetirá  $P$  veces, lo que permitirá tener una cantidad de resultados que den validez estadística a las afirmaciones o conclusiones resultantes. De la colección de valores  $EPS_{S_{k,N}}$ ,  $k=1, \dots, P$  se evaluarán media, desviación estándar, etc. y se analizará también si la población es de tipo normal. Para facilitar la interpretación se analizará la expresión  $100 \cdot (1 - (EPS_{S_j,N} / EPS_B))$  que puede interpretarse como un porcentaje de mejora frente al ASTER GDEM, siendo el punto de partida 0% y el óptimo 100%. Nótese que no hay garantía que evite tener valores negativos; podría ocurrir que una combinación perversa de  $N$  puntos sea tal que afecte desfavorablemente el estadístico, empeorando la exactitud de partida. Será importante detectar esos casos y cuantificar su frecuencia relativa.

El proceso se repetirá para  $N=30$ ,  $N=60$ , etc. Asumiendo que asintóticamente (i.e. para  $N$  infinitamente grande) la superficie  $S_{k,N}$  tiende a parecerse a la realidad alternativa podrá cuantificarse la mejora con contribuciones parciales. La utilidad de todo el sistema se basa en la hipótesis que con  $N$  moderado ya





				<p>Para el CEIBAL se estima en 500 el número de perfiles que fue necesario evaluar. Si hubiese existido un MDE de exactitud adecuada, el trabajo podría haberse hecho primero en oficina y luego ir al campo únicamente para aquel pequeño número de casos en que la incertidumbre en la cota del MDE no asegura con certeza la intervisibilidad. Se estima que esos casos son menos del 10% del total. Por carecerse de un MDE adecuado, los 500 perfiles fueron/serán hechos por métodos tradicionales, a un costo de U\$S 350-400 c/u. El estado ha gastado del orden de U\$S 200.000 en estos trabajos... y en el futuro habrá que repetirlos si se cambia la localización de alguna antena por interferencias con un nuevo silo, crecimiento de un monte, etc. El plan CARDALES tiene similares requerimientos de conectividad e información topográfica. Si se considera la transmisión de datos en la telefonía celular, es todavía más evidente la enorme</p>
--	--	--	--	---

				<p>ayuda que podría proporcionar un MDE de alta exactitud.</p> <p>En este caso, no se estudia una línea o perfil, sino una zona o área en un cierto radio de influencia. Existen software comerciales que permiten saber para una posición dada de una antena y ubicada a una cierta altura, cuales son las zonas que tendrán cobertura y cuales no. En cualquier caso, el dato de base más importante será un MDE, y siendo éste de alta exactitud, las conclusiones tendrán mayor confiabilidad, lo que hará eficiente la decisión técnica que se tome respecto de la ubicación de la antena. Ciertamente, habrá casos en que la exactitud del MDE será aún insuficiente, por lo que se requerirá un trabajo de campo específico, pero el ahorro en la etapa de prediseño es significativo aunque no fácilmente cuantificable.</p>
Ahorro para estudios preliminares de granjas eólicas	UTE, empresas privadas, productores rurales, intendencias	U\$S	50.000	<p>En Uruguay hay varias iniciativas recientes (1),(2),(3),(4) para la construcción de parques eólicos, con potencial acumulado de cientos de MW y que afectan a decenas de miles de hectáreas. Para formular un proyecto</p>

			<p>de parque eólico se hace necesario un estudio preliminar de la topografía del terreno para determinar la ubicación general de la obra.</p> <p>Si se quiere representar la altimetría de 10.000 hectáreas recurriendo a métodos fotogramétricos, y en la suposición de que se usan fotografías aéreas ya existentes, se deben invertir no menos de 50.000 dólares. Si se recurre a un levantamiento directo de campo o se necesita un vuelo fotogramétrico nuevo, el costo será mucho mayor.</p> <p>(1) SOWITEC, 7.681 hectáreas,  <a href="http://www.elpais.com.uy/090217/pecono-399410/economia/empresa-alemana-propone-instalar-mega-parque-eolico">http://www.elpais.com.uy/090217/pecono-399410/economia/empresa-alemana-propone-instalar-mega-parque-eolico</a></p> <p>(2) Paysandú, 20.000 hectáreas,  <a href="http://www.larepublica.com.uy/economia/379272-avanza-el-proyecto-del-parque-eolico">http://www.larepublica.com.uy/economia/379272-avanza-el-proyecto-del-parque-eolico</a></p> <p>(3) Rocha, 3.000 hectáreas,  <a href="http://www.larepublica.com.uy/comunidad/323598-una-granja-rochense-alberga-el-primer-parque-eolico-del-pais">http://www.larepublica.com.uy/comunidad/323598-una-granja-rochense-alberga-el-primer-parque-eolico-del-pais</a></p>
--	--	--	--

				(4) Rocha, 650 hectáreas, <a href="http://www.construya.com.uy/obrasyproyectos/oyp_2.htm">http://www.construya.com.uy/obrasyproyectos/oyp_2.htm</a>
Ahorro en otras obras de ingeniería	MTOP, Intendencias UTE, Productores rurales	U\$S	100.000	Del mismo modo, para diferentes obras de ingeniería, el conocimiento del relieve del terreno es importante para la toma de decisiones adecuadas, al menos en la etapa de diseño. La ubicación de los detalles importantes de la obra, minimizar los costos de transporte y movimiento de tierras, y resolver problemas de intervisibilidad son algunos de los aspectos que deben ser resueltos. Si bien en cada caso que se aborde, habrá situaciones concretas que puedan concluir en inversiones económicas diferentes, se puede afirmar que para la generalidad de los casos un MDE de alta exactitud permitirá importantes ahorros en los estudios preliminares de las obras. Ello no implica prescindir de trabajos topográficos posteriores, una vez tomadas las decisiones correspondientes. Para los costos se puede tomar como referencia los precios de los levantamientos

				fotogramétricos mencionados para parques eólicos.
--	--	--	--	---

### Estrategia de difusión y transferencia de resultados

La transferencia de resultados es obvia para el MDE mismo, ya que estará prevista en el sistema informático a desarrollar. La promoción y difusión se realizará, para Uruguay, en el ámbito académico, profesional y en el de la IDE (vía [www.agesic.gub.uy](http://www.agesic.gub.uy)). Paralelamente la difusión internacional estará orientada a ámbitos relacionados con el producto ASTER GDEM (con el que ya hay antecedentes) así como presentaciones en revistas y congresos científicos.

### Propiedad y uso de resultados si corresponde

Resultado	Factibilidad de protección	Forma de apropiación
Modelo Digital de Elevación	Baja; no estaría contemplado entre los objetos pasibles de protección artística, y no es usual que se proteja mediante contratos	El público en general mediante acceso a la URL del sitio del SGM
Algoritmos (pero no códigos) de mejora continua de superficies Z(x,y)	Alta. Se trataría de un algoritmo, lo cual está contemplado en la legislación internacional. No hay intención de protegerlo, sin embargo más allá de la publicación de los resultados en revistas científicas.	Los autores, mediante publicación en revistas y eventos científicos.

### Estrategia de sustentabilidad post-proyecto

Luego de creados los algoritmos y con el ambiente web funcionando, se depende solamente de la llegada de datos para que la mejora continua se siga llevando a cabo. Para la sostenibilidad de estos servicios no se necesitan inversiones adicionales de importancia (sitio web operativo, conexión de banda ancha, servidores de cálculo, etc.).

El proyecto tiene previsto que el sistema general, que comprende la llegada de datos, la evaluación de los mismos, el mantenimiento de los ambientes web, o las medidas de campo adicionales cuando se necesiten en alguna zona en

particular, sean procedimientos automáticos que no se detengan y que se incorporen a la operativa normal del sitio web del SGM.

El proyecto está pensado de manera de aprovechar tareas que de una u otra forma se llevarán a cabo de todas formas:

- Las mediciones de campo hechas por profesionales en todo el territorio
- Idem realizadas por otros organismos y/o profesionales
- Las tareas relacionadas que el SGM lleva a cabo por Ley.

Se le planteará a la Asociación de Agrimensores que solicite a sus asociados el mantenimiento en el tiempo de la colaboración en la entrega de datos. Lo mismo se realizará frente a otros actores que ocasional o rutinariamente puedan suministrar datos de calidad; el mecanismo idóneo para el contacto es la IDE-UY.

Por otra parte, es importante tener claro que el SGM, como organismo dedicado a la confección y mantenimiento de la cartografía nacional (con todo lo que esto implica), realiza rutinariamente tareas tanto de campo como en oficina que pueden ser aprovechadas para sostener el proyecto en el tiempo. Entre las tareas de oficina pueden incluirse el mantenimiento de la página web, publicitar los datos del MDE con sus metadatos correspondientes, etc. así como solicitar la colaboración voluntaria antes mencionada.

En la gran mayoría de los trabajos de campo que el SGM realiza, ya sea por tareas de mantenimiento, inspección, o trabajos especiales, es posible aprovechar los traslados y realizar mediciones GPS para alimentar la base de datos de mediciones. En particular serán de especial ayuda, las medidas que el Servicio pueda realizar específicamente en zonas donde, por razones circunstanciales, haya escasez de puntos de campo, lo que implica que el MDE tiene una baja exactitud en relación a otras zonas del territorio nacional.

### [Recursos para la ejecución del proyecto](#)

#### Otros recurso

Oficinas a reacondicionar:

2 de 20 m<sup>2</sup>

Instrumental topográfico y geodésico

Dos receptores GPS L1/L2 marca X-

Dos receptores GPS L1 marca LOCUC

Un nivel electrónico LEICA  
 Dos reglas INVAR  
 Equipamiento fotogramétrico  
 Dos estaciones digitales fotogramétr  
 Restituidores analógicos  
 Un vehículo todo terreno  
 Acceso a Internets para la ejecución del proyecto  
 Servidores WEB del SGM

### Presupuesto

Rubros	ANII	Otros aportes	Costo Total (\$U)
Personal Técnico	225.600	100.00	325.600
Servicios	166.600		166.600
Adecuación Edilicia	76.600	100.000	176.600
Material Bibliográfico	10.000		10.000
Imprevistos	19.950		19.950
Protección de la Propiedad Intelectual		5.000	5.000
Gastos de Administración	26.250		26.250
Total (\$U)	525.000	205.000	730.000

### Cronograma de ejecución financiera

Rubro	Año 1		Año 2	
	Sem. 1	Sem. 2	Sem. 1	Sem. 2
Adecuación Edilicia	76.600			
Material Bibliográfico	10.000			
Personal Técnico	56.400	56.400	56.400	56.400
Servicios	61.600	66.000	39.000	
Imprevistos	5.000	5.000	5.000	4.950
Gastos por Administración	6.562	6.562	6.562	6.562

### Otros aspectos del proyecto

El Proyecto NO está comprendido en la Ley 16.466 ni en el Decreto 349/005

### Bibliografía

Allsup, G.P.; Hosom, D.S., 1996. High quality sea surface temperature for volunteer observing ships OCEANS 96. MTS/IEEE ;Prospects for the 21st Century. Conference Proceedings Volume 3, Issue , 23-26 Sep 1996  
 Page(s):1274 - 1278 3

Anon, 2009 ASTER GDEM Validation: Summary Report?. METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS. 28 pp. Visitado 201002. <<https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/content/download/4009/20069/file/ASTER%20GDEM%20Validation%20Summary%20Report.pdf>>

Bjorke, Jan T., Pilsen, Stein 2007, 'Computation of Random Errors in Digital Terrain Models', Geoinformatica Vol. 11, nº 3, pp. 359- 382, viewed 29 January 2010, < <http://www.springerlink.com/content/7510816075r280v8>>

Caruso, C. and Quarta, F. 1998 'Interpolation Method Comparison' Computer Math Applic, 35, 12, 109-126

Creager, G. J. 2006. Densifying the in-situ surface observing network: The Citizen Weather Observer Program, its role in observation and verification, and avenues for enhancement. 22nd International Conference on Interactive Information Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology

Estornell Cremades, Javier, Ruiz Fernández, Luís Ángel, 2007. 'Generación de MDE y MDS en una Zona de Vegetación Arbórea y Arbustiva mediante datos Lidar e Imágenes de Satélite Quickbird', Visitado 201001, < [Chat.webs.upu.es/bigtiles/Estornell\\_et\\_al\(semGeom07\).pdf](http://Chat.webs.upu.es/bigtiles/Estornell_et_al(semGeom07).pdf) >

Euilliades, P. y Vénere, M. 2003 'Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros' Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing. 19, 1, 33-44

Felicísimo, A. 1994 'Modelos Digitales del Terreno: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales'. Visitado 201002 <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>

Felicísimo, A., 1994, 'Parametric statistical method for error detection in digital elevation models'. ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, 49, 4, 29-33

Fisher, P. F., Tate, N. J. 2006 'Causes and Consequences of error in digital elevation models' Progress in Physical Geography, Vol. 30, nº 4, pp. 467-489, Visitado 201001, < [http:// ppg.sagepub.com/cgi/reprint/30/4/467](http://ppg.sagepub.com/cgi/reprint/30/4/467)>

Gandin, L. S., 1988: Complex Quality Control of Meteorological Observations. Monthly Weather Review, 116, 1137-1156

Golyandina, N.E.; Usevich, K.D.; Florinsky, I.V. 2007, Filtering of Digital Terrain Models by Two-Dimensional Singular Spectrum Analysis' International Journal of Ecology & Development, 8, 81-94.

GTIDE, 2006,'Infraestructura de Datos Espaciales para Uruguay', 35 pp., Visitado 201002, [http://www.agesic.gub.uy/innovaportal/file/305/1/informe\\_2006.pdf](http://www.agesic.gub.uy/innovaportal/file/305/1/informe_2006.pdf)

Lam, N. 1983 'Spatial interpolation methods: a review', The American Cartographer, 10, 2, 129-149

Li, L and Revesz, P. 2004 'Interpolation methods for spatio-temporal geographic data' Computers, Environment and Urban Systems, 28, 2010 227

Li, Z.; Zhu, Q. and Gold, Ch. 2005 Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. ISBN 0-415-32462-9. CRC Press, 318 pp

López, C. 1997, 'Locating Some Types of Random Error in Digital Terrain Models?', International Journal of Geographical Information Science, Vol.11, nº 7,pp.677-698, Visitado 201001, <<http://www.informaworld.com/smpp/title~db=all~content=t713599799>>

López, C. 2000 'On the improving of elevation accuracy of Digital Elevation Models: a comparison of some error detection procedure' Transactions in GIS, Vol. 4, nº 1, pp. 43-64, viewed 29 January 2010, < <http://www.thedigitalmap.com/~carlos/papers/tog2000/index.html> >

López, C. and Samper, J 1996. , 'Numerical aspects of the Universal Kriging method for hydrological applications' In Proceedings of the First European Conference on Geostatistics for Environmental Applications, Lisboa, November

20-22, Visitado 201001 <  
[http://www.thedigitalmap.com/~carlos/papers/rep96\\_1/geo96.html](http://www.thedigitalmap.com/~carlos/papers/rep96_1/geo96.html)>

López, C. 1997 'Quality of Geographic Data - Detection of Outliers and Imputation of Missing Values' PhD thesis, Visitado 201002 <<http://www.thedigitalmap.com/%7Ecarlos/papers/PhDthesis/thesis.htm>>.

López, C. 2000, "On the improving of elevation accuracy of Digital Elevation Models: a comparison of some error detection procedures", Transactions in GIS 4, 1, 43-64 6 (A)

López, C. 2002 "An experiment on the Accuracy Improvement of Photogrammetrically derived DEM", International Journal of Geographic Information Science, 16, 4, 361-375 5 (A)

López, C. y González, C.H. 2009 'Comparación de algoritmos para la confluencia geométrica de información vectorial'. VI Jornadas Técnicas de la Infraestructura de Datos Espaciales de España JIDEE'09, Murcia, España ((<http://orzancongres.com/JIDEE09/40.pdf>))

Meijering, E. 2002 'A Chronology of Interpolation: From Ancient Astronomy to Modern Signal and Image Processing' Proceedings of the IEEE, vol. 90, no. 3, March 2002, pp. 319-342

Méndez, R. y López, C. 2009. 'Evaluación del ASTER GDEM 30 en el Uruguay'. Informe interno 2/2009 del SGM.

METI/ ERSDAC, NASA/ LPDAAC, USGS/ EROS 2009 'Aster Global Dem Validation: Summer Report, June, Visitado 201001, < <http://lpdaac.usgs.gov/?/ASTER%20GDEM%20Validation%Summary%20Report.pdf>>

NSSDA 1998, 'Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy', Federal Geographic Data Committee, FGDC-STD-007.3-1998, 28 pp.

O'Reilly, Tim. 2005. Web 2.0: compact definition', Oct. 1st, 2005. Visitado 201002

[http://radar.oreilly.com/archives/2005/10/web\\_20\\_compact\\_definition.html](http://radar.oreilly.com/archives/2005/10/web_20_compact_definition.html)

Oksanen, Juha 2006, 'Digital Elevation Model error in Terrain Analysis, 'Academic Dissertation in Geography, Faculty of Science, Helsinki, Visitado 201001 < <http://ethesis.helsinki.fi/julkaisut/mat/maant/vk/oksanen/digitale.pdf>>

Parrish, D.F. and Derber, J.C., 1992: "The National Meteorological Center's Spectral Statistical Interpolation Analysis System". Monthly Weather Review, 120, 1747-1763.

Podobinkar, T. 2005, 'Production of integrated digital terrain model from multiple datasets of different quality', International Science, Vol. 19, n°1, pp. 69-89, Visitado 201001, < <http://dx.doi.org/10.1080/13658810412331280130>>

Samper, J y Carrera, J 1990, 'Geostatística: aplicaciones a la Hidrología Subterránea', Ed. CIMNE. Barcelona. España, 484 pp.

Sluiter, R. 2009 'Interpolation methods for climate data: Literature review' KNMI intern rapport; IR 2009-04, 28 pp.

Smith, B.D. and Simmons, T. 2001. Ontario's Volunteer Climate Network: Online Data Entry and Quality Control 11th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation ([http://ams.confex.com/ams/annual2001/techprogram/paper\\_17436.htm](http://ams.confex.com/ams/annual2001/techprogram/paper_17436.htm))

Tian-Xiang Yue, Ping Du, Zhen, Jiang Song, Dun, Gong, Yun 2007, 'A new method of surface modeling and its application to DEM construction', Geomorphology, n° 91, pp. 161- 172

Weaver, S. 2002. National Weather Service Cooperative Weather Observer Program: The backbone of the Nation's Climate records. NOAA Magazine <http://www.magazine.noaa.gov/stories/mag45.htm>

Yue Sun, Shaozhong Kang, Fusheng Li b, Lu Zhang 2009, 'Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China', *Environmental Modelling & Software*, 24, 1163-1170