

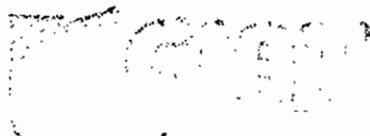


EVALUACION DE MODELOS DE ELEVACION DIGITAL
CON RESPECTO A ALGORITMO E INFORMACION

Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica

Programa Uso de Tierras

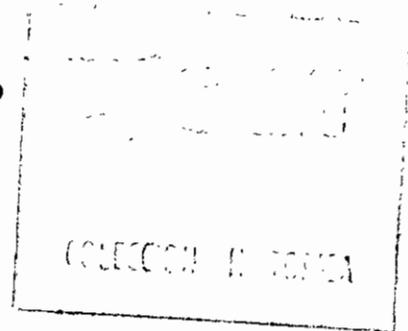
Mauricio Edilberto Rincón Romero



UNIDAD DE INFORMACION Y
DOCUMENTACION

Cali, Noviembre de 1995

31 AGO 2004



CIAT

Centro Internacional de Agricultura Tropical
International Center for Tropical Agriculture



CGIAR

Evaluación de DEMs con respecto al algoritmo e información

Resumen

El presente trabajo muestra desde procedimientos, técnicas, problemas y conclusiones en la comparación de Modelos de Elevación Digital DEM, generados con diferentes técnicas e informaciones. Para construir los DEM se utilizaron diferentes software como son: ARC/INFO, Erdas, Idrisi y se miró también Ilwis. Entre los Algoritmos usados están: interpolaciones lineales, polinomiales, polígonos voronoi, quintic convolucion, Spline, Kriging y las rutinas desarrolladas por el Dr. Michael Hutchinson. Como informaciones usadas en la modelación se tienen curvas de nivel, puntos altitudinales, drenajes, puntos de retícula regular y muestras de campo. Con todo esto se crearon 23 DEMs, los que se compararon desde diferentes puntos de vista y técnicas estadísticas. Las apreciaciones presentadas en las conclusiones son de vital importancia en el empleo de este tipo de informaciones, pues la calidad de los datos, tanto los empleados para producir los DEMs como los DEMs mismos, juegan un papel importante en cualquier tipo de aplicación que se le pueda dar con un SIG.

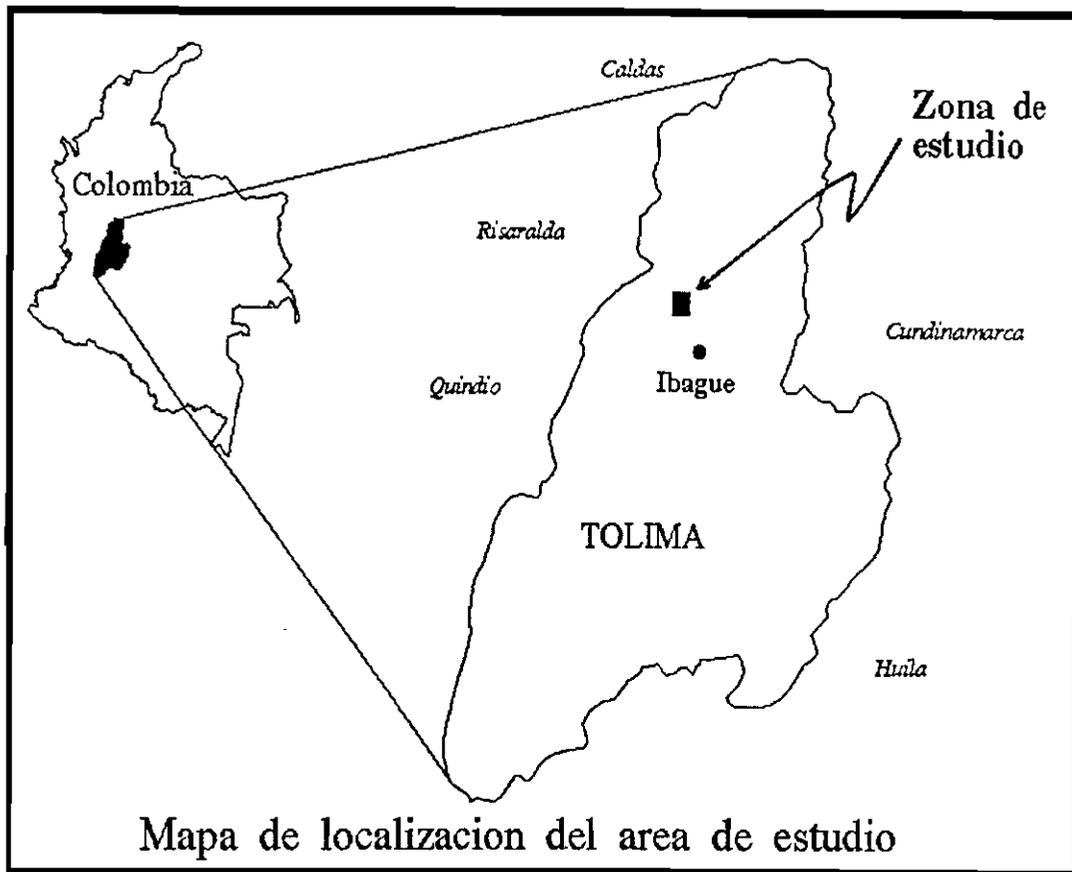
Introducción

Una de las razones que motivan a desarrollar este trabajo es la necesidad de conocer el medio ambiente en que vivimos, y para los estudio enfocados a esto, es importante contar con herramientas y elementos que faciliten la comprensión del medio ambiente y del mismo ecosistema en que se desarrolla nuestra vida. La investigación en Recursos Naturales es una de las principales preocupaciones de hoy en día, pues la gran mayoría de las personas que laboran en esta actividad tienen como objetivo común la protección del medio ambiente.

Los DEMs son informaciones de relativa importancia en la comprensión de un ecosistema, y la calidad de esta información soporta el desarrollo de las investigaciones en el medio ambiente. Las técnicas de producir DEMs son muy variadas y por ende sus resultados.

Objetivo

- Mostrar los diferentes tipos de DEMs que se pueden crear, enfatizando en sus características, viabilidad, información de entrada y discrepancias morfológicas de respuesta.
- Determinar un criterio de selección de DEM según confiabilidad de información de entrada y de salida.
- Inferencia en calidad de DEMs.



Procedimiento

i. Selección del área de trabajo.

El área de estudio está localizada en el departamento del Tolima, en el municipio de Ibagué, corregimiento de Villa Restrepo. La zona queda aproximadamente a 40 minutos de Ibagué por la carretera que conduce al Nevado del Tolima.

ii. Creación de la información base.

Al evaluar las especificaciones de la información base para crear los DEM, se destacan las siguientes características:

- Modelos estereoscópicos de fotografías aéreas a buena escala.
- Puntos de retícula regular y puntos irregulares de altura a partir del modelo estereoscópico de buena calidad y suficiente densidad de información de acuerdo con los requerimientos del relieve.
- Curvas de nivel a intervalos significativos según escala de fotografías aéreas y con las mismas características que los puntos mencionados anteriormente.
- Líneas de morfología del terreno, quiebre y cuestas para el total recubrimiento de la zona de trabajo.

Para producir la información anterior fué necesario contar con la colaboración de las entidades

que poseen los equipos especializados para ésta labor con los software y operarios respectivos.

iii. **Compilación de información general y de campo para la prueba de los DEM.**

Por intermedio de la subdirección de docencia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi hoy el Centro de Investigaciones en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica CIPRES, se logró obtener la información de los modelos de restitución de aerofotografía para la zona de estudio. Toda la información digital y en copia dura se encuentra almacenada en la base de datos del laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del programa de Uso de la Tierra del CIAT y consta de:

- Fotografías aéreas de la zona que conforman los modelos de estudio, escala 1:15000 de 1992.
- Puntos de retícula regular cada 25 mts horizontal para cada modelo estereoscópico (aprox 3500 puntos por modelo)
- Curvas de nivel restituidas cada 25 mts verticales
- Curvas de drenaje de la zona, restituidas de los mismos modelos
- Curvas de nivel cada 100 mts., digitalizadas en el IGAC de la base cartográfica del IGAC, planchas escala 1:25000
- Curvas de drenaje digitalizadas en el IGAC de la base cartográfica del IGAC, escala 1:25000.
- Curvas de nivel cada 50 mts. digitalizada de la base cartográfica IGAC 1:25000 en CIAT.
- Líneas de drenaje digitalizadas de la base cartográfica IGAC 1:25000 en CIAT.

Con base en la información compilada hasta el momento, se planeó el trabajo de campo en tres fases:

Fase 1 Posicionamiento geodésico de los puntos base para el desarrollo del trabajo de campo, con instrumentos de posicionamiento global GPS con comisiones mixtas de las entidades de apoyo (CIAT - IGAC), para determinar las coordenadas geográficas de precisión geodésica, base del control del proyecto.

Los instrumentos utilizados fueron de marca LEICA modelo 2000, de propiedad del IGAC, oficina de control de campo, que trasladaron las coordenadas de dos mojones geodésicos de primer orden de la red nacional ubicados en Alvarado e Ibagué respectivamente.

Fase 2 Levantamientos altimétricos topográficos de los puntos de muestra básicos de la información de quiebre de topografía, desarrollado por las mismas entidades, los cuales determinan la altura puntual para cada elemento de la muestra.

El trabajo de campo altimétrico se realiza con equipos de estación total LEICA de propiedad del IGAC, que operan con un haz de luz electromagnética que es reflejada en el punto en cuestión por medio de un prisma y que registra la distancia entre el punto y la estación además de otros parámetros que son necesarios para la determinación de las coordenadas x,y,z de cada uno de los puntos. La precisión de estos instrumentos es de alta confiabilidad (en distancia

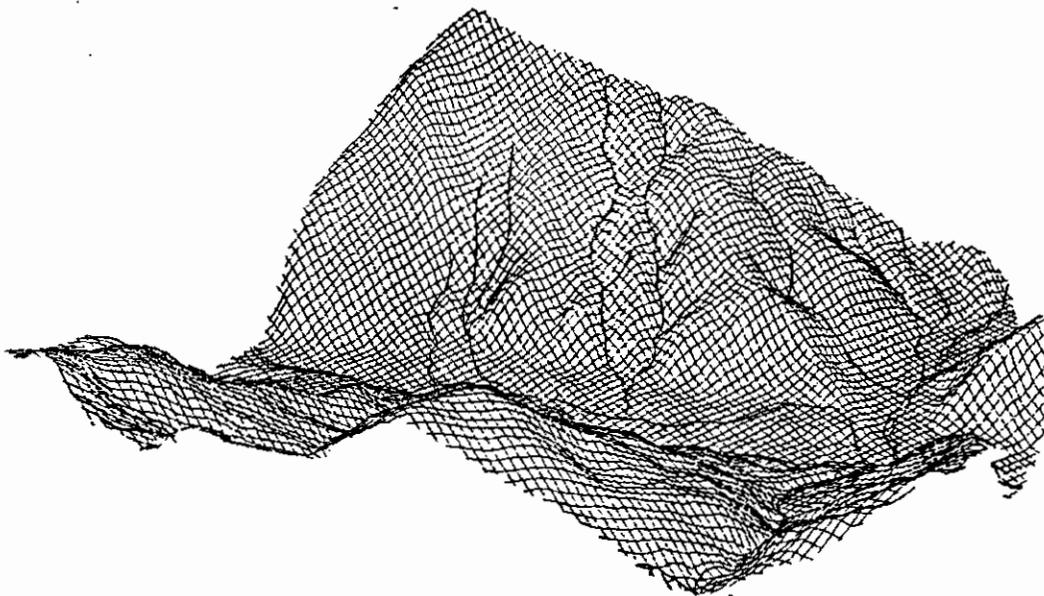
es $.2 + 2pp^1 * dist.$, en dirección 1"(segundo), alcance en distancia 4.5 Kms.).

Fase 3 Levantamiento de puntos de muestra para la evaluación de las variables de aspecto y pendiente, localizados con GPS, desarrollado por las entidades CIAT -INESCO y determinando las variables con brújula y nivel Admey respectivamente.

Los equipos para el levantamiento de la posición de los puntos son de marca TRIMBLE*NAVEGATION de los trabajos de campo de INESCO; se utilizó la técnica de Real Time Kinematic (RTK), da las coordenadas muy aproximadas en tiempo real y posteriormente se realizó el cálculo de post-proceso para ajustar todos los datos a las coordenadas geodésicas dadas para los mojones de la zona.

Para determinar la pendiente de cada punto se utilizó el nivel Admey, el cual mide el ángulo de inclinación y el porcentaje de la pendiente, dato compilado en campo. Para la determinación del aspecto se uso una brújula convencional, que a partir del norte magnético se toma la dirección del vector de máxima inclinación de cada plano en el que se encuentra el punto de muestra. Los instrumentos son del Programa de Manejo de Tierras del CIAT.

iv. Creación de los DEMs.



Con la información confeccionada por el IGAC y la capturada en campo se procede a crear los DEM. Podemos mencionar algunos software que se usaron:

- ARC/INFO

¹ pp. Partes por millón

- ILWIS
- IDRISI
- ERDAS
- FORTRAN (Programas de modelación)
- TURBO PASCAL (Programas de interfase)

De entre los métodos que se tiene a disposición que en el siguiente cuadro se llaman algoritmos, se cuentan los siguientes:

- 1- Método de Interpolación Lineal, en TIN (puede hacerse en grid también) (Tin)
- 2- Kriging en lattice (Krig.)
- 3- Polígonos Voronoi (Voro.)
- 4- Regresión polinomial, bilineal y quintic en grid, dependiendo del tipo de información, si usa rasgos obligados, como drenajes o crestas, usa la interpolación quintic (Quin.)
- 5- Spline, bilineal y cubic en grid (Spli.)
- 6- Algoritmo de Michael Hutchinson (M. Hutchinson, 1989) en grid, usando Spline con forzamiento al drenaje. (Mic.)

Finalmente para facilitar la operatividad del manejo de la información los modelos fueron desarrollados en la plataforma UNIX con ARC/INFO.

Como uno de los objetivos del presente trabajo es comparar la respuesta de cada uno de los métodos mencionados anteriormente a diferentes tipos de información de entrada, por el hecho que no siempre se cuenta con tanta información para generar los DEM, entonces se usan cuatro tipos de información con cada uno de los métodos mencionados. Estos tipos de información son:

Información Tipo 1 : Contiene toda la información existente a mejor escala, o sea a partir de los modelos estereoscópicos

- * Curvas de nivel cada 25 mts. (restituidos)
- * Puntos de retícula regular cada 25 mts.
- * Líneas de quiebre de los modelos (ríos y crestas restituidos)

Información Tipo 2 : Contiene

- * Curvas de nivel digitalizadas en CIAT de la base cartográfica IGAC
- * Líneas de quiebre digitalizadas en CIAT de la base cartográfica IGAC

Información tipo 3 : Contiene

- * Puntos de retícula regular restituidos a partir de los modelos

Información tipo 4: Contiene de la misma información tipo 2 pero degradada a una tolerancia de 20 mts. de las curvas originales, con la idea de disminuir el número de puntos y resolución, para mostrar el caso de información de muy baja calidad.

La conformación de los modelos queda resumida en el siguiente cuadro, manteniendo la notación según las clases mencionadas.

	Tin	Krig.	Voro.	Quin.	Spli.	Hutc..
Inf. 1	Mod 11	Mod 12	Mod 13	Mod 14	Mod 15	Mod 16
Inf. 2	Mod 21	Mod 22	Mod 23	Mod 24	Mod 25	Mod 26
Inf. 3	Mod 31	Mod 32	Mod 33	Mod 34	Mod 35	Mod 36
Inf. 4	Mod 41	Mod 42	Mod 43	Mod 44	Mod 45	Mod 46

Cuadro 2. Simbolización nomenclatura de modelos

v. Procesamiento de la información.

Para producir elementos que nos permitan comparar la información que se tiene, el procesamiento se estructura en los siguientes pasos:

Paso 1 : Creación de muestras para evaluar los modelos

Se cuentan con tres tipos de muestras a saber:

- Puntos altimétricos compilados en campo
- Puntos con pendiente compilados en campo para validar modelos
- Muestra de aspecto compilada en campo para validar modelos.

Para cada una de las informaciones de puntos mencionadas, las distinguiremos de ahora en adelante como muestra1, muestra2 y muestra3 respectivamente.

Paso 2 : Con cada una de las muestras del paso 1, se extrajo la información correspondiente de los modelos, y de estos valores se calculó las diferencias con la muestra y los estadísticos descriptivos con relación a altura.

Adicional a la información mencionada, se creó un mapa que demarca tres zonas en el área de estudio, que clasifica la información de la muestra de altura según el instrumento usado en la determinación de la altura y posición del punto de muestra o la incertidumbre de cual fué el instrumento usado.

		Alg. 1	Alg. 2	Alg. 3	Alg. 4	Alg. 5	Alg.6
Sup. 1	Media desvia Varia.	-2.38790 6.266674 39.27127	-2.35460 6.194484 38.37164	-2.19251 7.469631 55.79539	-2.50653 6.331478 40.08762	-2.21335 6.878741 47.31708	-1.69677 6.938647 48.14482
Sup. 2	Media desvia Varia.	6.069388 29.01260 841.7316	7.673920 28.78784 828.7399	7.837594 30.73313 944.5252	6.877014 29.02656 842.5413	8.353667 28.91667 836.1473	11.84943 26.80966 718.7585
Sup. 3	Media desvia Varia.	-1.38298 6.817990 46.48499	-1.44759 6.714173 45.08012	-1.39340 8.119722 65.92989		-1.69175 6.765445 45.77124	-1.00588 7.546213 56.94533
Sup. 4	Media desvia Varia.	2.983757 29.65025 879.1372	6.542452 28.72744 825.2661	4.402811 34.34994 1179.919	3.888261 30.05158 903.0973	10.65619 29.42686 865.9401	11.15717 28.13457 791.5500

Cuadro 3. Resumen de estadísticas descriptivas de los modelos

Junto con la anterior información, se creó otro mapa que clasifica la muestra según la vegetación, el cual fué hecho con base en la fotografía aérea que muestra las zonas boscosas o de pradera,

con el objeto de determinar la incidencia de la vegetación en la determinación de la altura del punto.

vi. Análisis de la información.

Comprende la evaluación de los modelos teniendo en cuenta los siguientes puntos de vista:

1. Análisis estadístico con respecto a altura.

Utilizando las coordenadas de los puntos de muestra tomada en campo, se extrajo la información de altura de todas las superficies generadas con los diferentes modelos (en total 23). A esta información se le realizó una primera inspección, comparando la información con los valores de altura tomada en campo, encontrándose para algo menos del 2% de la muestra valores desfasados; se evaluó el porque era posible este tipo de discrepancias y para algunos de ellos se les excluyó, justificando el hecho de que los factores determinadores de estos valores podrían ser por la cercanía al límite de la superficie de interpolación, gran distanciamiento a unos valores para ser base de la interpolación con comportamientos diferentes en sus alrededores.

De las diferencias de alturas tomada de la muestra con los valores obtenidos por medio de los modelos se tomaron las estadísticas descriptivas utilizando el programa SAS, fueron parte de los criterios que se usaron en la selección del tipo de información primaria, que se usó en la comparación de los modelos.

Los valores medios de las diferencias de alturas oscilan entre 11.85 y -2.50 metros siendo los valores positivos pertenecientes a los residuales de las comparaciones de los modelos de información de campo y los negativos de la información que contiene puntos de retícula regular, mientras se presentan valores modales oscilando entre 5.287 y -49.720; esto muestra una clara sobre-estimación de la altura al usar la información de cartografía y una sub-estimación al usar la información de puntos de retícula regular.

Con relación al valor de Kurtosis de las distribuciones, se puede decir que existe una heterogeneidad en los modelos en que los valores oscilan desde -0.05 hasta 4.33, pero existiendo una predominancia con valores entre 2.5 y 3.5. Estos valores de kurtosis nos indica que en la mayoría de los modelos existe una dispersión muy semejante a una distribución normal.

Para los valores de varianza de los modelos con respecto al valor observado en campo se presentan dos tipos de varianzas a saber:

la primera tiene valores entre 38 y 66, que se presenta en los modelos en que utilizan información de puntos de retícula regular; la segunda que es un valor muy cercano a 10 veces mas del anterior con valores entre 718 y 1179, se presenta en los modelos que usan la información digitalizada de curvas de nivel cada 50 metros. De la misma forma que los valores anteriores, el error estandar de la media mantiene la consistencia del análisis, tomando valores cercanos a 0.2 para los modelos que usan información de puntos de retícula regular y para los modelos que usan cartografía digitalizada de curvas de nivel cada 50 metros, dan valores cercanos a 0.85.

Como elemento de corroboración se expresará el coeficiente de determinación R^2 entre los valores de altura observados en campo y los valores correspondientes leídos sobre los modelos,

con el fin de dar una estimación con base en la muestra, de cual de los modelos se ajusta más a los observados. Los valores de R^2 y desviación estandar se presentan en el cuadro 4:
 Donde :

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

Modelo	Std	(1 - R^2) * 100
MOD11 (mejor,tin)	6.266674	0.28
MOD21 (carto,tin)	29.01261	5.71
MOD31 (puntos,tin)	6.817992	0.33
MOD41 (cartod,tin)	29.65025	5.82
MOD12 (mejor,kri)	6.194484	0.27
MOD22 (carto,kri)	28.78784	5.68
MOD32 (puntos,kri)	6.714173	0.32
MOD42 (cartod,kri)	28.72744	5.59
MOD13 (mejor,vor)	7.469631	0.39
MOD23 (carto,vor)	30.73313	6.63
MOD33 (puntos,vor)	8.119722	0.47
MOD43 (cartod,vor)	34.34994	8.33
MOD14 (mejor,qui)	6.331478	0.28
MOD24 (carto,qui)	29.02656	5.80
MOD34 (puntos,qui)		
MOD44 (cartod,qui)	30.05158	6.17
MOD15 (mejor,Spl)	6.878741	0.33
MOD25 (carto.,Spl)	28.91621	5.82
MOD35 (puntos,Spl)	6.765445	0.32
MOD45 (cartod,Spl)	29.42686	6.12
MOD16 (mejor,Hut)	6.938647	0.33
MOD26 (carto,Hut)	26.84943	5.08
MOD36 (puntos,Hut)	7.546213	0.40
MOD46 (cartod,Hut)	28.1345	5.62

Cuadro 4. Coeficientes de determinación

De los anteriores valores se determina que la mejor información para tener en cuenta en la continuación de nuestro análisis es la información TIPO 1 o sea la que contiene datos de puntos de altura de retícula regular, más los valores de contornos restituidos de fotografías aéreas con sus respectivos drenajes, pues en todos los modelos en que se usó este tipo de información

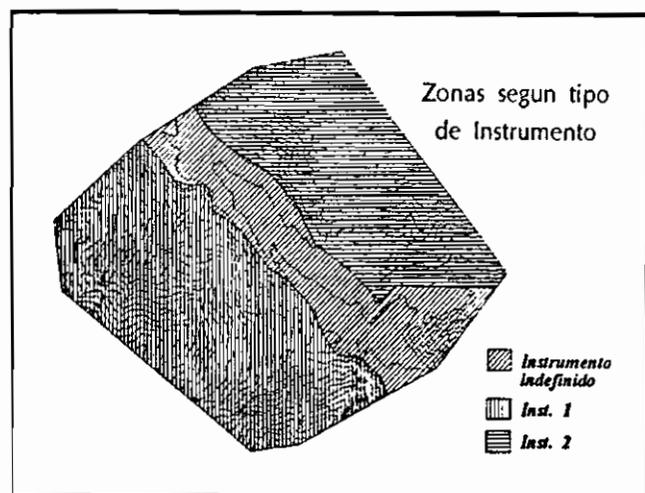
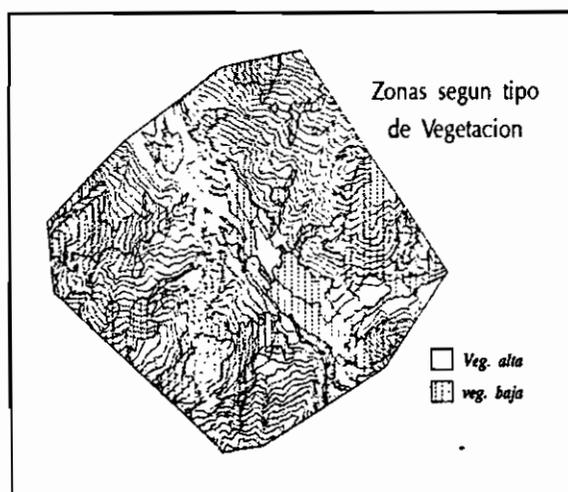
produjo mejor valor de estimación y menor desviación estandar. De hecho estos valores muestran un valor de estimación de los modelos con respecto a los valores de campo, en el caso de que los modelos fueran puramente lineales, es decir sin contemplar la incidencia de las otras variables en la respuesta de los modelos.

Al analizar la información con respecto a la incidencia que tiene la diferencia de vegetación con respecto a la información base de los modelos, se aprecia muy claramente que la variable vegetación dada en dos categorías, vegetación alta y baja; para los puntos de muestra que caen en las zonas de vegetación alta, los valores de determinación de altura de los modelos siempre están en promedio 2.5 mts. mas altos que la información con vegetación baja.

Con respecto a la incidencia de la variable instrumento, que se ha tenido en cuenta dado que en la determinación de la muestra de campo se usaron dos equipos de estaciones totales del IGAC, una a cada lado del río en la zona de trabajo, se estimó que podía existir la posibilidad de que los instrumentos dieran algún error significativo en el análisis, a pesar que hay observaciones de las cuales no se saben con que instrumento se realizaron, esta se calificó con un valor en la variable instrumento de 3. Del análisis de los datos con respecto a la variable instrumento se deduce claramente que puede existir alguna incidencia en esta clasificación, pues los valores determinados con un tipo de instrumento difieren a los determinados con el otro instrumento, en que el primero ofrece valores de diferencias de alturas del orden de 17 mts. a diferencia del otro instrumento que da valores del orden de -15 mts. Claro esta que las magnitudes de estas diferencias de alturas dependen del tipo de información usada en los modelos. Estos datos son dados al evaluar la muestra, pero al analizar las imágenes de diferencias entre modelos, utilizando el mejor, escogido más adelante, se aprecia esta diferencia en toda la imagen, en un lado valores extremadamente positivos por zonas y en el otro valores extremadamente negativos, lo cual hace pensar que la variable instrumento tiene una complicación en la determinación de las alturas; estas discrepancias pueden ser debido a diferencias en el tipo de información usada en los modelos, el primero inf. tipo 1 y el segundo inf. tipo 2. Más adelante se regresará al tema.

En el análisis de varianza se estima un modelo explicativo de la información de la siguiente manera:

Como variables se tienen, Algoritmo, Información, Instrumento y Vegetación, con sus



Evaluando las anteriores relaciones, los modelos Tin y Kriging en valores medios ocupan mejor lugar mientras que en las variaciones los modelos de Michael Hutchinson y Kriging poseen las menores. Los modelos Quintic y Spline siempre están mediando mientras que casi en todos los casos Voronoi es el de menor precisión. Los modelos Spline y Michael Hutchinson tienen los valores medios más grandes posiblemente con las variaciones menores, esto es debido a las exageraciones que produce Spline en ambos modelos.

Para las informaciones del grupo 2 (mejor información y puntos de retícula regular), no se justifica realizar este tipo de comparación por el hecho de que todos los modelos ajustan muy similarmente, dando unas variaciones medias de errores entre -1.3 y -2.3 y para valores absolutos entre 5 y 6, lo cual significa que son muy estables entre sí; lo que sí vale la pena mencionar es que la menor varianza se encuentra usando el modelo Kriging y la mayor usando Voronoi.

De las gráficas que están con los listados estadísticos, lo único que se puede concluir es que el modelo Voronoi produce los valores más aislados y extremos.

Según los datos de análisis de varianza en la prueba T de la menor diferencia significativa (LSD) se destaca la división de los dos grupos de la misma forma que la anterior, siempre los valores del grupo 1 sobre-estimados y los valores del grupo 2 sub-estimados. La generalización se ve de la siguiente manera:

- Para los valores medios

Ord.	Infor.	Carto.	Cartod.	Puntos	Mejor
1		Tin	Tin	Hutc.	Hutc.
2		Quin.	Quin.	Tin	Voro.
3		Voro.	Krig.	Voro.	Spli.
4		Krig.	Voro.	Krig.	Krig.
5		Spli.	Spli.	Spli.	Tin
6		Hutc.	Hutc.		Quin.

- Para valores absolutos de la media

Ord.	Infor.	Carto.	Cartod.	Puntos	Mejor
1		Krig.	Hutc.	Voro.	Voro.
2		Hutc.	Tin.	Hutc.	Spli.
3		Quin.	Quin.	Spli.	Hutc..
4		Tin	Krig.	Tin	Quin.
5		Spli.	Spli.	Krig.	Tin
6		Voro.	Voro.		Krig.

La misma jerarquía la expresa la prueba F múltiple de Ryan Einot Gabriel Welsch.

De la prueba de significancia f, podemos concluir:

Para el grupo 1

- La vegetación no incide fuertemente en la determinación de la altura por los modelos.
- Las variables Algori tmo, Información e Instrumento inciden radicalmente en la determinación de las alturas por los modelos.

- La variable instrumento produce una variación fuerte con un comportamiento no identificado hasta el momento.
- Las interacciones de Vegetación con las demás variables no son significantes.
- La interacción entre las variables Instrumento y Vegetación tiene un efecto grande en el modelo.
- La interacción entre algoritmo e Información no es significativa.

Para el grupo 2

- El tipo de algoritmo no es significativo.
- Las variables Información, Vegetación e Instrumento son muy significativas.
- Las interacciones con Vegetación no son significativas
- Las interacciones con Instrumento son muy incidentes en el modelo.

Para resumir lo expuesto en la última parte del grupo 2, En la explicación del modelo planteado en el análisis, todos los modelos (como variable explicativa) no son significativos entre sí, es decir no existen interacciones entre ellos.

Como conclusión de los argumentos anteriores, se puede decir que:

- La variable Instrumento es fuertemente incidente en el comportamiento de los modelos, pero observando las imágenes residuales, estas imágenes son calculadas entre la diferencia del modelo Kriging con mejor información y los demás modelos con información de cartografía, y se aprecia el comportamiento de valores extremadamente grandes a un lado de las imágenes y valores extremadamente pequeños al otro lado de las imágenes, lo que indica que no es que exista una variable incidente debido al instrumento sino que intrínsecamente todas las informaciones (aparte de muestra) tienen esta anomalía que no es identificada en el análisis (tampoco es debido al Instrumento), pero tiene una fuerte representación en la información capturada en la variable que denominamos Instrumento, y que hasta el momento no se ha identificado esta anomalía.

Es identificable que la variable Vegetación tiene un efecto incidente y constante en todos los modelos, en que siempre en la vegetación con relación a bosques ofrece unos valores mayores de errores que con el otro tipo de vegetación.

Según los algoritmos, no se puede generalizar la preferencia de uno con respecto a los demás, debido a que con cada tipo de información se puede obtener respuestas diferentes que no se cumplen en todos los casos; en el caso en que se usa información tipo 1 y 3, los algoritmos tienen un comportamiento muy similar, hasta el punto en que casi es indistinto usar uno u otro. En todo caso, los algoritmos que mejor ajusten dan aunque no siempre con el mejor valor medio son Kriging y Michael Hutchinson, que se pueden colocar en una primera categoría, seguidos por Spline, Tin y Quintic en una segunda categoría y finalmente en una tercera categoría a los polígonos Voronoi.

Con la información del grupo 1 se presentan diferenciaciones casi con la misma jerarquía pero más marcadas sus diferencias; el modelo de Michael Hutchinson presenta un mejor ajuste

seguido por Kriging, los dos en la misma categoría, posteriormente entrarían los otros tres al igual que el caso anterior Spline, Tin y Quintic y como en el peor de los casos Voronoi en la categoría 3, siempre teniendo en cuenta la menor variación en la muestra y en el error estandar de la media.

2. Análisis estadístico con respecto a pendiente y aspecto.

Debido a la naturaleza de los datos de pendiente y aspecto, el tamaño de la muestra con que se cuenta es de 27 observaciones. La forma como algunos modelos presentan la información obligan a categorizar las observaciones de la siguiente forma:

Aspecto		Pendiente	
0 - 45°	1	0 - 1 %	1
45° - 90°	2	1 - 2.15 %	2
90° - 135°	3	2.15 - 4.64 %	3
135° - 180°	4	4.64 - 10 %	4
180° - 225°	5	10 - 21.5 %	5
225° - 270°	6	21.5 - 46.4 %	6
270° - 315°	7	46.4 - 100 %	7
315° - 360°	8	> 100 %	8

Para las medidas de campo se dió esta categorización al igual que para todos los valores extraídos de los modelos.

Para el análisis estadístico se trató de realizar la prueba de Chi-cuadrado, pero los resultados presentaban una inconsistencia en los datos reales con los esperados por los modelos; como por ejemplo, en la información de aspecto se presentaba una concentración de las observaciones de campo en dos o tres categorías y las demás vacías, cosa que hace inconsistente el análisis.

Se realizó una revisión de los datos en todo el proceso, desde la determinación de las coordenadas de los puntos de muestra, hasta la extracción de los valores de los modelos, no encontrándose inconsistencia alguna.

Para analizar el detalle al cual se pretendía obtener resultados consistentes de la comparación de los datos de pendiente y aspecto leídos en campo con los modelos, se realizó una comparación de perfiles de unas primeras lecturas que se realizaron en el trabajo de campo con los perfiles obtenidos de los modelos usando la información tipo 1, lo que mostró grandes diferencias entre los perfiles de los modelos y los valores determinados de alturas de los perfiles de campo.

Lo anterior induce a pensar en algunos aspectos:

- El tipo de metodología del levantamiento de campo para estos datos no fué el adecuado, puesto que no permitió alguna posibilidad que se pudiera comprobar la calidad de la información en oficina.
- El detalle de la información de campo es superior al que los modelos ofrecen, haciendo

imposible su comparación, puesto que los datos de campo proporcionan información muy localizada y los modelos hacen una generalización de la región observada dado a los métodos de interpolación.

- La muestra de campo no fué lo suficientemente grande y densa para poder compararla con los modelos.
- Es muy remota la posibilidad pero posible, que el posicionamiento de los puntos de muestra o más aún de las bases de las coordenadas tengan alguna inconsistencia y pudieran estar desplazados todos los puntos.

INTERVALOS DE CONFIANZA

A manera de ilustración, para uno de los modelos de información tipo 1 de alturas, se presentan los intervalos de confianza, esto es sin tener en cuenta las variables de Vegetación e Instrumento.

La notación probabilística de la determinación del intervalo de confianza esta dada por:

$$p(|\theta - \mu| \leq \epsilon) = 1 - \alpha$$

$$p(\bar{x} - \epsilon < \mu < \bar{x} + \epsilon) = 1 - \alpha$$

donde

$$\epsilon = \frac{Z_{1-\alpha/2}\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$\bar{x} - \frac{Z_{1-\alpha/2}\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{Z_{1-\alpha/2}\sigma}{\sqrt{n}}$$

Z	0.386	0.524	0.675	0.842	1.037	1.282	1.645	1.960	2.326	2.575
P	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%

Cuadro 5. Valores de Z para las probabilidades.

Para la información tipo 1, los intervalos de confianza son:

MODELO	80 %	90 %	95 %	98 %	99%
MOD11	-2.625 -2.151	-2.691 -2.083	-2.750 -2.025	-2.817 -1.958	-2.863 -1.912
MOD12	-2.589 -2.120	-2.655 -2.054	-2.712 -1.996	-2.779 -1.929	-2.824 -1.884
MOD13	-2.474 -1.910	-2.554 -1.830	-2.624 -1.760	-2.704 -1.680	-2.759 -1.625
MOD14	-2.745 -2.267	-2.813 -2.199	-2.872 -2.140	-2.940 -2.072	-2.987 -2.025
MOD15	-2.473 -1.953	-2.547 -1.879	-2.610 -1.815	-2.685 -1.741	-2.735 -1.690
MOD16	-1.959 -1.434	-2.033 -1.360	-2.097 -1.295	-2.172 -1.220	-2.2230-1.169

MODELO	30 %	40 %	50 %	60 %	70%
MOD11	-2.459 -2.316	-2.484 -2.291	-2.512 -2.263	-2.543 -2.232	-2.579 -2.196
MOD12	-2.425 -2.284	-2.450 -2.258	-2.478 -2.231	-2.508 -2.201	-2.544 -2.165
MOD13	-2.277 -2.107	-2.308 -2.077	-2.341 -2.043	-2.377 -2.007	-2.420 -1.964
MOD14	-2.578 -2.434	-2.604 -2.408	-2.632 -2.380	-2.663 -2.349	-2.700 -2.312
MOD15	-2.291 -2.135	-2.319 -2.107	-2.350 -2.076	-2.384 -2.042	-2.423 -2.003
MOD16	-1.775 -1.617	-1.803 -1.589	-1.834 -1.558	-1.868 -1.524	-1.908 -1.484

Cuadro 6. Intervalos de confianza para modelos información tipo 1

A pesar de que los intervalos de confianza son dados para el conjunto de información muy buena, también es de importancia conocer los intervalos de confianza para la información de la cual tenemos normal acceso como lo es la tipo 2 (cartografía de contornos y ríos) no como el caso excepcional como lo es la tipo 1, que para obtenerla es a unos costos muy elevados. A continuación los intervalos de confianza de la información tipo 2.

MODELO	80 %	90 %	95 %	98 %	99%
MOD21	4.972 7.166	4.662 7.476	4.392 7.746	4.079 8.059	3.866 8.272
MOD22	6.585 8.762	6.277 9.070	6.010 9.337	5.699 9.648	5.487 9.859
MOD23	6.675 8.999	6.346 9.328	6.031 9.613	5.729 9.945	5.504 10.171
MOD24	5.779 7.974	5.468 8.285	5.199 8.555	4.886 8.867	4.672 9.081
MOD25	7.260 9.446	6.951 9.756	6.682 10.024	6.370 10.337	6.158 10.549
MOD26	10.834 12.864	10.546 13.152	10.297 13.401	10.007 13.691	9.810 13.888

MODELO	30 %	40 %	50 %	60 %	70%
MOD21	5.739 6.399	5.621 6.517	5.491 6.646	5.349 6.7897	5.182 6.956
MOD22	7.346 8.001	7.229 8.118	7.100 8.246	6.959 8.388	6.793 8.554
MOD23	7.487 8.187	7.362 8.312	7.225 8.449	7.074 8.600	6.897 8.777
MOD24	6.546 7.207	6.428 7.325	6.299 7.454	6.156 7.597	5.989 7.764
MOD25	8.024 8.682	7.906 8.800	7.778 8.929	7.635 9.071	7.469 9.238
MOD26	11.543 12.155	11.434 12.264	11.314 12.383	11.182 12.516	11.028 12.670

Cuadro 7. Intervalos de confianza para modelos información tipo 2

vi. Conclusiones y recomendaciones

Según el análisis de la información estadística, reforzando las interpretaciones con ayudas del Sistema de Información Geográfica, se puede extraer las siguientes ideas:

En cuanto al tipo de información:

- Se destaca claramente que los modelos desarrollados con información de puntos de retícula regular sub-estiman las alturas, es decir, la lectura del operador del restituidor son menores; posiblemente sea debido a la calibración del instrumento de restitución.
- Si a la información de puntos de retícula regular le adicionamos la información restituida de contornos para el cálculo de los modelos, la sub-estimación de las alturas incrementan el error en los modelos.
- En forma contraria a los conceptos anteriores, cuando se usa la información proveniente de cartografía, sea completa o degradada, los modelos sobre-estiman las alturas en una proporción dos o tres veces mayor que lo que se sub-estima con la información tipo 1.
- Curiosamente, cuando se usa información de cartografía degradada (tipo 4) en la mayoría de los modelos el error medio disminuye a excepción del Spline en el cual se incrementa casi al doble, pero en el caso de las varianzas, se mantienen casi constantes a excepción del modelo Voronoi, en el que se incrementa en un 25%; la desviación estandar de los errores se comporta de la misma forma que la varianza.
- Los modelos en forma general ofrecen una buena idea de la morfología del terreno, y el tipo de información es la que determina la calidad de él, pero existen unos límites en que si se tiene demasiada información la calidad del modelo no mejora sustancialmente, al igual que si la información es pobre como en el caso en el que se cuenta solo con información digitalizada (en el estudio, tipo 2) no es muy superior en calidad con respecto a la información degradada (tipo 4), lo que demuestra que para estos casos no es tan indispensable el alto detalle en la digitalización de la información altimétrica, porque no mejora mucho en calidad del modelo, y sí incrementa los costos en 4 o 5 veces.
- Existen una serie de errores en los diferentes procesos en la determinación de las informaciones para este estudio que son imposibles de determinar y que de una u otra forma para el caso de la zona de estudio pueden ser muy grandes e indefinidos que no se pueden cuantificar y que son muy variables en cualquier parte de la zona de estudio, haciendo referencia a la información de cartografía y de restitución que son base en los modelos.
- Los modelos los podemos categorizar por su ajuste a la realidad (en este caso la muestra) como:

Categoría 1	Kriging Michael Hutchinson
Categoría 2	Spline Tin Quintic
Categoría 3	Voronoi

Según el tipo de información se incrementa o disminuye el error.

- Existe una variable no identificada que en el caso de nuestro ejercicio se representó como error de Instrumento pero que no solo se refleja en las observaciones de la muestra sino en el modelo general (según imágenes residuales), que parece ser producto de la captura de la información a partir del instrumento restituidor (sea en puntos de retícula regular o líneas de contorno), pudiendo ser efecto de reflexión de la luz en las fotografías bases de la información.
- Como sugerencia, si el objetivo es crear un DEM de muy buenas características, entonces se debe obtener una información muy buena, como los puntos de retícula regular a partir de fotografías aéreas, o si por el contrario, la necesidad es modelar el relieve que de una información satisfactoria, entonces la información cartográfica es suficiente, sin un alto detalle de digitalización, claro esta que la fuente debe ser de una escala muy significativa para el estudio.

En cuanto a los modelos se refiere:

- La mejor representación con información de cartografía se logra con los modelos categoría 1, sin influenciar mucho en los resultados la calidad de ésta.
- El peor modelo que se logra usando únicamente información cartográfica y es el modelo Voronoi, apreciándose que le sigue muy de cerca el modelo Quintic .
- Con las mismas características que el algoritmo de Michael Hutchinson, Spline tiene el mismo comportamiento con los diferentes tipos de información siempre destacándose con una exageración en los rasgos del relieve.
- Con relación a la evaluación de pendiente y aspecto, debe realizarse una evaluación a diferente nivel de detalle, pues la muestra que se utilizó no se ajustaba a los resultados esperados y hacía imposible cualquier interpretación para dar conclusiones.

BIBLIOGRAFIA

BURROUGH, P. A.. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. London: Clarendonpress Oxford 1987.

DANGERMOND, Jack. A Classification of Software Components Commonly Used in Geographic Information Systems, separata de Section 1 The Nature of a Geographic Information Systems, titulado Basic Readings in Geographic Information Systems : Williamsville. Duane F. Mable, Hugh W. Calkins, Donna J. Peuquet; Spad Systems Ltd. New York U.S.A. 1984.

DEAGOSTINI ROUTIN, Daniel. Cartografía. Bogotá: Ministerio de Obras Públicas, Centro Interamericano de Fotointerpretación. Colombia 1970.

DEAGOSTINI ROUTIN, Daniel. Fotogrametría. Bogotá: Ministerio de Obras Públicas, Centro Interamericano de Fotointerpretación. Colombia 1983.

DRIEL, J. Nicholas Van. Three dimensional display of geologic data. Capítulo 1 de Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems. London: Editado por Jonathan Raper, Taylor & Francis. London New York Philadelphia. 1990.

ESRI (1) Environment Systems Research Institute Inc. Surface Modeling with TIN, Surface analysis and display, ESRI. Segunda edición. Redlands, CA USA, 1992.

ESRI (2) Environment Systems Research Institute Inc. Cell-based modeling with GRID. Analysis, display and Management, ESRI. Segunda edición. Redlands, CA USA, 1992.

GOLD, Christopher M.. Surface interpolation, spatial adjacency and GIS. Capítulo 3 de Three Dimensional Applications un Geographic Information Systems. London: Editado por Jonathan Raper, Taylor & Francis. London New York Philadelphia. 1990.

GOLD, Chistopher M., EDWARDS, Geoffrey. The Voronoi spatial model: two- and three-dimensional applications in image analysis. ITC Journal, Bulletin de L'ITC. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enshede, Netherlands. 1992.

HUTCHINSON, Michael F.. Calculation of Hidrologically Sound Digital Elevation Model. Centre for Resource and Environmental Studies The Australian National University. Proceedings, Third International Symposium on Spatial data Handling, p. 117 - 133. Camberra Australia, 1988.

LEE, Jay. Comparison of existing methods for building triangular irregular network models of terrain from grid digital elevation models, London. International Journal of Geographical Information Systems, Volume 5, Number 3, 267-285. Taylor & Francis, 1991.

MAYA G., Jaime A.. Modelos Digitales del Terreno. Notas de Seminario en Teoría y Aplicaciones Regionales de los Sistemas de Información Geográfica, Manizales, Colombia: Convenio de Cooperación Interinstitucional para el Uso de los SIG. 1992.

OLIVER M.A., WEBSTER R.. Kriging: a method of interpolation for Geographical Information Systems, London. International Journal of Geographical Information Systems. Volume 4, Number 3 July-September, 1990.

RAPER, Jonathan. Three Dimensional Applications un Geographic Information Systems. London: Taylor & Francis. London New York Philadelphia. 1990.

RAPER, J. F. and WAINWRIGHT, D. E., 1987. The use of the Geotechnical database GEOSHADE in site investigation data management. Quarterly Journal of Engineering Geology 20, 221- 230.

RIPPLE, William J. Geographic Information Systems for, Resource Management: A Compendium. Oregon: American Society for Photogrammetry an Remote Sensing and American Congress on Surveying and Mapping. Oregon State University Corvallis, Oregon. 1986.

SAS INSTITUTE INC. ,SAS/STAT USER'S GUIDE. Version 6. Sas Institute Inc. Cuarta edición, U.S.A. 1990.

SKIDMORE, Andrew K.. A comparison of techniques calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model, London. International Journal of Geographical Information Systems . Volume 3, Number 4, 323-334. Taylor & Francis. UK, 1991.

SPIEGEL, Murray R. Estadística. MCGRAW-HILL. Traducido por Rafael Hernández Heredero, Segunda edición. España 1990.

STEEL, Robert G. D., TORRIE James H. Bioestadística: Principios y Procedimientos. Traducción Ricardo Martínez B. MCGRAW-HILL, primera edición en español, Colombia 1985.

TSAI, Victor J. D.. Delaunay triangulations in TIN Creation: an overview and a linear-time algorithm, London. Internaltional Journal of Geographical Information Systems. Volume 7, Number 6 November-December, 1993.

VALENZUELA, Carlos. Introducción a los Sistemas de Información Geográfica. Manizales. Seminario Teoría y aplicaciones regionales de los Sistemas de Información Geográfica. Convenio de Cooperación interinstitucional para el uso de los Sistemas de Información Geográfica. Colombia. 1992.