



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

TERRA, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS, PARA LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS DE DISTRIBUCIÓN REGULAR O VARIABLE

FRANCISCO GARCÍA HERRERA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2021

La presente tesis titulada: "**TERRA, Sistema auxiliar en el desarrollo de proyectos de nivelación de tierras, para levantamientos topográficos de distribución regular o variable**" realizada por el alumno: **Francisco García Herrera** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. JESÚS CHAVEZ MORALES

ASESOR



DR. JUAN ENRIQUE RUBIÑOS PANTA

ASESOR



DRA. MARÍA LIJANA TERRAZAS ONOFRE

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2021

TERRA, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS, PARA LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS DE DISTRIBUCIÓN REGULAR O VARIABLE

Francisco García Herrera, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

RESUMEN

La nivelación de tierras es indispensable para reducir el volumen de agua aplicado y aumentar la uniformidad del riego por gravedad. Se presenta el sistema de cómputo electrónico TERRA, para el cálculo de proyectos de nivelación de terrenos agrícolas, útil para examinar innumerables alternativas de diseño en un lapso muy corto de tiempo. Los datos de campo con que se alimenta, pueden ser puntos obtenidos con un levantamiento topográfico de una cuadrícula rectangular o de un levantamiento de distribución variable (radiaciones). El cálculo de volúmenes de corte y relleno se realiza usando “el método de los cuatro puntos” apoyado con el método de Kriging en el caso de la topografía de distribución variable. El algoritmo desarrollado es capaz de dividir el terreno en tablas para su nivelación independiente, con el objetivo de reducir volúmenes de corte y relleno impactando directamente en el costo de nivelación. Se generan planos de la topografía del terreno antes y después de la nivelación; además de planos de cortes y rellenos; y un diagrama de bloques como guía para el tractorista en el proceso de nivelación.

Palabras Clave: *Kriging, DEM, Isolineas.*

**TERRA, AUXILIARY SYSTEM IN DEVELOPMENT OF LAND LEVELING PROJECTS,
FOR TOPOGRAPHIC SURVEYS OF REGULAR OR VARIABLE DISTRIBUTION**

Francisco García Herrera, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2021

ABSTRACT

Land leveling is essential to reduce the volume of water applied and increase the uniformity of gravity irrigation. TERRA program was developed to calculate agricultural land leveling projects, it examines innumerable design alternatives in a very short period. The field data can be coordinates (x, y, and z) obtained with a topographic survey of a rectangular grid or by points coordinates with variable distribution (radiations). The cut and fill volumes calculations, in case of the variable distribution topography, are carried out using "the four-point method" aided by the Kriging method. If necessary, the developed algorithm is capable of divide the surface into terraces with independent leveling, reducing cut and fill volumes directly, and the leveling cost also. Land topography maps are generated before and after leveling; the cuts and fillings map, and a tractor-driver guide for the field leveling process.

Keywords: *Kriging, DEM, contour lines.*

DEDICATORIA

A esos Ángeles que
Comparten mi camino ... gracias
Señor, te agradezco por estar siempre a mi lado

A mi mejor amigo:
Mi hijo Eduardo Alejandro
Que mi camino te inspire a seguir adelante...

A Jose:
Mi compañera de vida
Gracias por impulsarme siempre a mejorar...

*Todo nace por el agua,
y todo por ella puede perecer...*

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al CONACYT y al Colegio de Postgraduados por brindarme todo el apoyo para concluir esta etapa tan importante para mi vida profesional.

Al Posgrado de Hidrociencias, por su inmensidad las ciencias del agua... un verdadero océano de conocimientos del cual solo que visto las olas superficiales.

Al Dr. Jesús Chávez Morales, por su infinita paciencia, por su apoyo y por no rendirse en ésta tarea que parecía imposible. Sus aportaciones han hecho de éste un trabajo algo valioso en el área de la Irrigación Mexicana. Por ser la inspiración en los programas aplicados a la nivelación de tierras.

Al Dr. Enrique Rubiños Panta, por sus observaciones acertadas y por todo el apoyo para poder realizar este salto final; hacía falta esa mano dura para concluir este trabajo.

A la Dra. María Liliana Terrazas Onofre, gracias por su apoyo en la presente investigación, en las recomendaciones y observaciones en el presente trabajo, no solo como profesional, como compañera y amiga que siempre ha sido.

Al M.C. Francisco Raúl Hernández Saucedo, mi gran maestro y amigo, gracias por enseñarme a disfrutar la enseñanza y por su puesto la ciencia de la nivelación de terrenos agrícolas.

Al Dr. Samuel Trueba Coronel (†), a quien tuve el gusto de conocer como compañero y amigo... Incansable investigador en el área de nivelación de tierras. *“Gracias maestro por sus aportaciones a la agricultura de México. Un tributo a su memoria”*.

A todos mis profesores que me han aportado lo más valioso que tengo... el conocimiento.

Y por supuesto a mi segundo hogar... Al Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo... gracias por permitirme ser parte de la planta docente para aportar algo a esos Agrónomos que México necesita.

A todos Gracias

Francisco García Herrera

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE CUADROS	xv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS	4
3. OBJETIVOS	5
3.1. OBJETIVO GENERAL	5
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1. NIVELACIÓN DE TIERRAS	6
4.1.1. GRADOS DE NIVELACIÓN	6
4.1.2. PASOS GENERALES PARA LLEVAR A CABO LA NIVELACIÓN	8
4.1.2.1. Planeación de los trabajos.	8
4.1.2.2. Topografía del terreno	13
4.1.2.3. Obtención del plano proyecto	17
4.1.2.4. Cálculo del movimiento de tierras	18
4.1.2.5. Análisis Económico	19
4.1.2.6. Integración del proyecto de nivelación de tierras	19
4.1.3. NIVELACIÓN TRADICIONAL VS NIVELACIÓN CON RAYO LÁSER	20
4.1.3.1. Nivelación Tradicional.	20
4.1.3.2. Nivelación con equipo láser	20
4.1.4. ESTIMACIÓN DEL PLANO PROYECTO, MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS	22
4.1.4.1. Uso de los determinantes para obtener los coeficientes C_A , C_B y C_C	25
4.1.4.2. Método matricial para obtener los coeficientes C_A , C_B y C_C	26
4.1.5. AJUSTES A LA ELEVACIÓN DEL PLANO PROYECTO	28
4.1.5.1. Espesores de Cortes y Rellenos	29
4.1.5.2. Volúmenes	29

4.1.6. DIFICULTADES EN LOS PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS ...	33
4.1.6.1. Nivelación con pendientes obligadas.....	33
4.1.6.2. Proyecto con restricciones en la profundidad de corte	33
4.1.6.3. Conservación de la Nivelación	34
4.2. INTERPOLACIÓN ESPACIAL	35
4.2.1. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN O PREDICCIÓN	35
4.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN	36
4.2.3. EL MÉTODO DEL INVERSO DE LA DISTANCIA	37
4.2.4. EL MÉTODO DE KRIGING.....	38
4.2.4.1. La teoría de las variables regionalizadas	39
4.2.5. SEMIVARIOGRAMA.....	40
4.2.5.1. Propiedades más importantes del variograma	42
4.2.5.2. Comportamiento en el Infinito.....	42
4.2.5.3. Comportamiento cerca del origen.....	43
4.2.5.4. Ajuste del semivariograma	46
4.2.5.5. El método de Kriging.	51
5. MATERIALES Y MÉTODOS	55
5.1. MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE TERRA 1.0	55
5.2. METODOLOGÍA	56
5.2.1. ALGORITMO DEL PROGRAMA TERRA V1.0.....	58
5.2.1.1. Definición de los datos de entrada	58
5.2.1.2. Datos del proyecto y del diseño.....	59
5.2.1.3. Definición de los datos del levantamiento topográfico.....	59
5.2.1.4. Definición de los datos de la poligonal y del terreno.....	61
5.2.2. LÍMITES DE TRABAJO, ÁREA Y CENTROIDE	61
5.2.2.1. Cálculo del Área	62
5.2.2.2. Cálculo del Centroide (C_x , C_y)	62
5.2.3. CÁLCULO DE LA ECUACIÓN INICIAL DEL PLANO PROYECTO	63
5.2.3.1. Organización de los Datos de Campo	63
5.2.3.2. Cálculo de la ecuación inicial del plano $Z=C_A+C_{BX}+C_{Cy}$	64
5.2.4. CÁLCULO DE LA CUADRÍCULA HOMOGÉNEA.....	66

5.2.5. DETERMINACIÓN DE LAS COORDENADAS z_{ij}	67
5.2.5.1. Cálculo de los pesos o factor de ponderación (W_q).....	68
5.2.5.2. Estimación de los nodos de la cuadrícula.	73
5.2.6. AJUSTE DE LA ORDENADA AL ORIGEN (C_A).	74
5.2.6.1. Cálculo de Z centroidal.....	75
5.2.6.2. Cortes y rellenos.....	75
5.2.6.3. Ajuste del Coeficiente C_A , según la relación cortes/rellenos (R)	76
5.2.7. GENERACIÓN Y DIBUJO DE ISOLÍNEAS.	78
5.2.7.1. Elaboración de Isolíneas.	78
5.2.8. DIVISIÓN DEL TERRENO EN CUADROS O TERRAZAS.....	84
5.2.8.1. Separación de la información topográfica	84
6. RESULTADOS y DISCUSIÓN	88
6.1. RESULTADOS GENERADOS	90
6.2. EJEMPLO 1, LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR RADIACIONES	91
6.2.2. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN POR RADIACIONES.....	91
6.2.3. TOPOGRAFÍA DEL TERRENO NATURAL	93
6.2.4. DIVISIÓN DEL TERRENO EN CUADROS.....	95
6.2.5. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN	96
6.2.6. ESTIMACIÓN DE COSTOS	98
6.2.7. PLANOS DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN.....	98
6.2.8. MEMORIA DE CÁLCULO GENERADA POR TERRA.....	99
6.3. EJEMPLO 2, LEVANTAMIENTO POR CUADRÍCULA REGULAR 9 X 9.....	111
6.3.2. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN DE UNA CUADRÍCULA RECTANGULAR	112
6.3.3. PARÁMETROS DE DISEÑO Y POLIGONAL DEL TERRENO.....	113
6.3.4. RESULTADOS DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DEL EJEMPLO 2.	113
6.4. EJEMPLO 3, LEVANTAMIENTO POR CUADRÍCULA REGULAR 5 X 6.....	122
6.4.2. DATOS DE ENTRADA DEL EJEMPLO 3.....	122
6.4.3. RESULTADOS DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DEL EJEMPLO 3.	123
6.5. DISCUSIÓN.....	131
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	141

7.1. CONCLUSIONES	141
7.2. RECOMENDACIONES	142
8. LITERATURA CITADA.....	144
ANEXOS	148
B. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES (C0, C1 Y C2) DEL VARIOGRAMA TEÓRICO	158
A. MÉTODO MATRICIAL DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS (MCO).....	149
B. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES (C0, C1 Y C2) DEL VARIOGRAMA TEÓRICO.	158
C. ANTECEDENTES DE SOFTWARE ESPECIALIZADO EN LA NIVELACIÓN DE TIERRAS.	175
D. CÓDIGO EN DELPHI DE PROCEDIMIENTOS DE CALCULO DE TERRA.....	197
E. MANUAL DE USUARIO	217
F. PLANOS DEL EJEMPLO 1	240

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1. Tipo de nivelación según la topografía (Madero y Torres, 1971). 8

Figura 4.2. Problema que muestra las consecuencias de la excesiva longitud del terreno (Cano y Vázquez, 1997)..... 11

Figura 4.3. Caso de un cambio de pendiente (Cano y Vázquez, 1997)..... 11

Figura 4.4. Método simplificado para el levantamiento topográfico con rayo láser..... 14

Figura 4.5. Establecimiento de la cuadrícula en el terreno..... 15

Figura 4.6. Definición de secciones que deben nivelarse por separado (Marr,1957) ... 16

Figura 4.7. Levantamiento de un predio agrícola por radiaciones con estación total (Hernández, 2008)..... 17

Figura 4.8. Plano en el espacio referido a ejes ortogonales..... 23

Figura 4.9. Subiendo o bajando el plano proyecto. 28

Figura 4.10. Valores recomendados de la relación corte/relleno en los trabajos de nivelación de tierras (Trueba Coronel, 1971)..... 31

Figura 4.11. Esquema típico de un variograma teórico. 42

Figura 4.12. Tipos de variogramas teóricos para el ajuste (saliendo del origen)..... 48

Figura 5.1. Algoritmo de nivelación, implementado en Terra para calcular el plano proyecto, sin divisiones..... 57

Figura 5.2. Diagrama de bloques general del Sistema TERRA 1.0..... 58

Figura 5.3. Generación de la homogénea, a partir cuadrícula de un levantamiento topográfico por radiaciones. 66

Figura 5.4. Ajuste del Variograma teórico. 68

Figura 5.5. Isolíneas con 0.1m de equidistancia vertical, generadas con las cotas(Z'_{ij}) de los vértices de la nueva cuadrícula..... 79

Figura 5.6. Esquema Básico del Algoritmo para Isolíneas. 80

Figura 5.7. Análisis por celdas para la determinación de las isolíneas. 82

Figura 5.8. Posibilidades en la secuencia de la curva en la celda..... 83

Figura 5.9. Esquema básico para definir si un punto esta fuera o dentro de un polígono..... 85

Figura 5.10. Esquema para crear el polígono ampliado con dos cuadros (caso horizontal)..... 86

Figura 5.11. Esquema para crear el polígono ampliado con dos cuadros (caso vertical).....	87
Figura 6.1. Créditos del programa TERRA.....	88
Figura 6.2. El Ambiente de TERRA 1.0 y menú Nivelación.....	89
Figura 6.3. Levantamiento topográfico por radiaciones y poligonal del terreno.....	92
Figura 6.4. Menús para la captura de la información.....	91
Figura 6.5. Topografía del terreno natural, aplicando el método de Kriging, en un Levantamiento de distribución variable o por radiaciones. Variograma lineal. ...	93
Figura 6.6. Menú para la interpolación personalizada y definición manual del Variograma	94
Figura 6.7. Variogramas Exponencial, Gausiano, Cuadrático y Esférico para la topografía del ejemplo por radiaciones, calculado por TERRA.	95
Figura 6.8. Resultados al dividir el terreno en 2 tablas independientes.....	96
Figura 6.9. Resultados de la nivelación para el predio del ejemplo, sin divisiones.	97
Figura 6.10. Planos de curvas de nivel del terreno nivelado, de valores de corte y relleno en nodos de la cuadrícula, y diagrama de bloques de movimiento de tierras.....	99
Figura 6.11. Ejemplo 2, levantamiento topográfico por cuadrícula.....	111
Figura 6.12. Captura de la información de un levantamiento por cuadrícula, ejemplo de 9 x 9.....	112
Figura 6.13. Información general del proyecto y poligonal del terreno, ejemplo 2.....	113
Figura 6.14. Topografía del predio de ejemplo 2, antes de la nivelación.....	114
Figura 6.15. Plano del terreno nivelado (plano proyecto) para el ejemplo 2.....	119
Figura 6.16. Diagrama de Bloques para el ejemplo 2.....	120
Figura 6.17. Plano de cortes y rellenos para el ejemplo 2.....	121
Figura 6.18. Ejemplo 3, levantamiento topográfico por cuadrícula.....	122
Figura 6.19. Parámetros de diseño y poligonal del terreno, del ejemplo 3.	123
Figura 6.20. Captura de datos de la cuadrícula del ejemplo 3.	122
Figura 6.21. Topografía del terreno natural del ejemplo 3.....	123
Figura 6.22. Topografía del terreno nivelado del ejemplo 3.	128
Figura 6.23. Plano de cortes y rellenos del ejemplo 3.	129
Figura 6.24. Topografía del terreno nivelado del ejemplo 3.	129
Figura 6.25. Portada del programa TERRA 1.0.....	130

Figura 6.26. Cuadrícula generada por TERRA, con el Método de Kriging para ejemplo_1.	135
Figura 6.27. Modelos Digitales de Elevación generados por SURFER y por TERRA, para el ejemplo 1.	136
Figura c.1. El ambiente de SURFER.....	177
Figura c.2. Módulo GRID. Interpolación de datos, variogramas y cálculo de volúmenes	178
Figura c.3. Modelos de Variograma disponibles en SURFER.....	179
Figura c.4. Menú para el cálculo de volúmenes y superficies en AutoCAD Civil 3D ..	180
Figura c.5. Planos posibles de elaborar con las herramientas de AutoCAD Civil 3D .	182
Figura c.6. El programa GeoSection AutoCAD. Empresa TopoUrban.	183
Figura c.7. Programa N4, LEICA, México. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula).....	184
Figura c.8. Programa SISTEMAT, LEICA Argentina. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula)	186
Figura c.9. Programa NIVTERRA 2.0. Chavez M.J., Ibañez C.L.A, Sanchez B.J.R, Hernandez S.H.R. 1988. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula).	188
Figura c.10. SINIVET 3.1 para Windows y para AutoCAD, Barrero M.A., García H.F., Sánchez B.J.R y Hernández S.F.R, 2005. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula).	189
Figura c.11. SINIVET 3.2. García H.F, Barrero M.A., Sánchez B.J.R. y Hernández S.F.R, 2008 (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula)	191
Figura c.12. SINIVET 4. García H.F, Barrero M.A., Sánchez B.J.R. y Hernández S.F.R, 2010 (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula).	192
Figura c.13. SINIVET plus 5.0/5.2, 2013/2019. García H.F., Barreto M.A., Hernández S.F.R., Sánchez B.J.R. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula y radiaciones, sin división en cuadros).....	193
Figura c.14. Trimble WM-Form. Programa integrado a las niveladoras laser. Determinación de cortes y rellenos en tiempo real.	194
Figura e.1. Ejecución del programa Wizard para la instalación de TERRA.....	220
Figura e.2. Ventana principal de TERRA.....	221
Figura e.3. Opciones del menú Archivo.....	222

Figura e.4. Cuadro de diálogo Abrir archivo	223
Figura e.5. Confirmación para abandonar TERRA	224
Figura e.6. Opciones del menú Nivelación	225
Figura e.7. Poligonal y centroide del terreno	230
Figura e.8. Captura de la información. Levantamiento topográfico por radiaciones... 231	
Figura e.9. Plano del terreno natural, antes de la nivelación.....	232
Figura e.10. División del predio en cuadros o terrazas.....	234
Figura e.11. Reporte de cálculo de la nivelación.....	235
Figura e.12. Resultados de la nivelación (Resumen)	235
Figura e.13. Resultados de cortes y rellenos.	236
Figura e.14. Reporte por cuadros independientes.	236
Figura e.15. Planos del terreno nivelado, cortes y rellenos y diagrama de bloques... 237	
Figura e.16. Cuadro de diálogo para la interpolación manual.	239

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1. Pendientes(*) mínimas, máximas e ideales para diferentes variantes de riego por gravedad.....	12
Cuadro 4.2. Abscisa (a') donde se interseca la recta tangente del origen con el Sill (Clark, 1979 y Delhome, 1978).....	49
Cuadro 5.1. Modelos utilizados para la el ajuste del variograma teórico (Delhome, 1978)	70
Cuadro 5.2. Cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico.....	71
Cuadro 5.3. Cálculo de los coeficientes C_1 y C_2 del variograma teórico.....	71
Cuadro 5.4. Cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico.....	72
Cuadro 6.1. Comparación de volúmenes y costos para el ejemplo, aplicando la nivelación al terreno completo vs el predio dividido en dos cuadros según topografía del terreno natural.	98
Cuadro 6.2. Reporte de cortes, rellenos y puntos nulos para el ejemplo 1.	102
El informe de cortes, rellenos y puntos nulos del ejemplo 2 se puede ver en el cuadro 6.3.....	116
Cuadro 6.3. Reporte de cortes, rellenos y puntos nulos para el ejemplo 2.	116
Cuadro 6.4. Reporte de cortes, rellenos y puntos nulos para el ejemplo 3.	125
Cuadro 6.5. Prueba de hipótesis dos medias con varianzas diferentes.	137
Cuadro c.1. Comparación cualitativa de programas existentes en el área de nivelación de tierras.....	196

1. INTRODUCCIÓN

El riego por gravedad ocupa la mayor parte de la superficie de riego del país. Dada la naturaleza del mismo, es susceptible a provocar desperdicios de agua; y es aquí donde los sistemas de riego presurizado pueden tener un alto impacto sobre la agricultura de riego, sin embargo, existen usuarios que no están en condiciones de poder adquirir sistemas presurizados, por lo que se deben buscar alternativas que permitan aumentar la eficiencia del riego por gravedad y perfeccionar los diseños, mejorar las parcelas mediante una nivelación de tierras para aplicar en forma más homogénea el agua y reducir el gasto excesivo al momento de riego, entre otras.

De acuerdo a CONAGUA (2014) de la superficie de riego en México el 90% tiene problemas de eficiencias aplicación bajas que podrían mejorarse con la nivelación de tierras, aumentar la uniformidad del riego y reducir el volumen de agua aplicado si las pendientes topográficas son adecuadas (Saucedo et. al., 2006; Fuentes y Rendón, 2012). La nivelación de tierras se justifica en cualquier proyecto de irrigación, ya que generalmente se invierten sumas considerables en obras de captación y distribución, comparativamente, se hacen bajas inversiones en la parcela, que es donde se refleja la bondad de todo un complejo sistema de irrigación (Walker, 1987).

La nivelación de tierras implica un levantamiento topográfico del predio, definición de pendientes longitudinales (en el sentido del riego) y transversales para conformar un plano de nivelación, cuantificación de volúmenes de corte y relleno, y por supuesto el costo de la nivelación. Un buen diseño aportará las pendientes óptimas para un volumen de cortes y rellenos equilibrado, pero sobre todo mínimo que impacte directamente sobre el costo. El trabajo del diseñador implicará por tanto revisar y calcular varias propuestas hasta encontrar la adecuada; el uso de programas de computadora como apoyo al proyectista será fundamental para eficientar su trabajo.

Un buen proyecto de ingeniería parte siempre de un plano topográfico, y la nivelación no es la excepción, los levantamientos tradicionales para la nivelación de tierras implican el

trazo de una cuadrícula regular en campo y la captura de información altimétrica cada nodo o vértice para el diseño; esto ha cambiado a partir de la integración de equipos Laser y escrepas con sensores, lo que ha permitido extraer del terreno más información topográfica en menos tiempo sin usar una cuadrícula regular.

El uso de aparatos topográficos modernos como estaciones totales y GPS diferenciales con altas precisiones en la medición han ocasionado que el trazo de cuadrículas para el levantamiento de puntos en la nivelación de tierras sea un proceso impráctico. Los aparatos modernos permiten capturar una mayor cantidad de información de campo si el levantamiento es por radiaciones y es posible describir con mayor exactitud la forma del terreno mediante un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), simular la topografía y generar un plano de nivelación con mayor precisión, lo cual permite integrar un proyecto completo de nivelación de tierras agrícolas; sin embargo, el uso de la cuadrícula es indispensable para la cuantificación de volúmenes (Marr, 1957). Las instituciones Mexicanas que aportan recursos económicos a los usuarios como apoyo a la nivelación de tierras y a la mejora de las eficiencias de riego, solicitan un expediente de la nivelación que incluye la cuantificación de volúmenes (especificando volúmenes de corte y relleno a realizar), en cuyo caso prefieren en uso del “Método de los cuatro puntos” propuesto por el USDA (1970). Es así, como el uso de las cuadrículas sigue siendo un proceso necesario para validar la cuantificación de volúmenes ocupados en el movimiento de tierras.

Se han desarrollado muchos programas de computadora relativos al tema de la nivelación de terrenos agrícolas, buscando siempre ahorrar tiempo en el diseño y realizar los cálculos óptimos con el menor costo posible (Covarrubias, 1968). Buscando la facilidad de interactuar de forma amigable con el usuario como el caso de NIVTERRA v1.0 desarrollado para computadoras personales en Fortran 77, con mejoras posteriores en Pascal (Chávez et.al., 1990); sistemas que se usan en la práctica como el SINIVET en sus distintas versiones se ha probado con resultados para levantamientos por cuadrícula y para la nivelación sin divisiones (Hernández y Sánchez, 2008).

Como resultado de varios años de trabajo en el área de desarrollo de software aplicado a la nivelación de tierras se desarrolló el programa TERRA 1.0, para procesar datos de campo con levantamientos topográficos por el método tradicional en una cuadrícula regular, con la contribución de poder procesar datos levantados con una distribución variable (radiaciones) y dividir el terreno en cuadros independientes; siendo útil para los trabajos de nivelación con rayo láser.

La elaboración del software permitió desarrollar una metodología para utilizar la masa de puntos tomados en campo por radiaciones y generar un plano proyecto óptimo, un Modelo Digital de Elevaciones para describir la topografía del terreno apoyándose en el método de Kriging; y generar una cuadrícula regular para la cuantificación de volúmenes por el método de los cuatro puntos.

TERRA 1.0, pretende iniciar con un nuevo enfoque en el cálculo de los proyectos de nivelación de tierras. Incluye nuevas rutinas para el cálculo del plano proyecto, la solución del método de mínimos cuadrados se hace en forma matricial, se incluye además un algoritmo optimizado para que el ajuste del plano de nivelación. La entrada de datos considera un sistema de referencia cartesiano común y corriente haciendo el uso más fácil al usuario. Se calcula el centroide sin necesidad de dividir el terreno en triángulos. El cálculo de las curvas de nivel (isolíneas) se realiza a partir de un Modelo Digital de Elevaciones del predio, generado con interpolación espacial usando el método de Kriging para la determinación de los pesos o factores de ponderación. Se realiza la estimación y cuantificación de volúmenes de corte y relleno aplicando el método de los cuatro puntos, se hace el trazo de curvas de nivel del terreno antes y después de la nivelación cubriendo áreas que el topógrafo no lo hace en una cuadrícula regular en un levantamiento tradicional.

En caso de ser necesario TERRA 1.0 incluye la división del terreno en cuadros independientes como los propuestos por Marr (1957).

2. HIPÓTESIS

Se puede desarrollar una metodología para elaborar proyectos de nivelación de tierras agrícolas y un software de aplicación para cuantificar el volumen de cortes y rellenos usando el método de los cuatro puntos a partir de un Modelo de Elevación Digital elaborado con el Método de Kriging.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para la elaboración de proyectos de nivelación de tierras agrícolas, a partir de un levantamiento topográfico con equipos modernos utilizando una distribución en cuadrícula o radiaciones; así como un sistema de cómputo electrónico que auxilie en el cálculo preciso y expedito del proyecto con la metodología propuesta.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Elaborar un programa de computadora usando la programación visual con las herramientas suficientes, para auxiliar al proyectista a obtener de una alternativa técnicamente factible.
2. Desarrollar un algoritmo y para crear un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a partir de una masa de puntos obtenidos mediante un levantamiento por radiaciones, usando el método de Kriging.
3. Diseñar un algoritmo para resolver en forma automática el modelo de variograma teórico para el cálculo de los pesos del método de Kriging.
4. Realizar un algoritmo para aplicar método de los “Cuatro Puntos” en el cálculo de volúmenes de corte y relleno del proyecto de nivelación de tierras con un levantamiento topográfico de distribución variable (radiaciones).
5. Elaborar un algoritmo para dividir el terreno en cuadros y realizar la nivelación por secciones independientes cuando la topografía lo requiera.
6. Diseñar un algoritmo para la elaboración de planos topográficos de altimetría antes y después de la nivelación utilizando métodos de análisis geoestadístico.
7. Diseñar un algoritmo para elaborar los planos de cortes y rellenos, así como el diagrama de bloques del proyecto de nivelación.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

En este apartado se describe los siguientes temas: la nivelación de tierras y sus principales características describiendo los métodos topográficos usados, la estimación del plano proyecto usando los mínimos cuadrados, los ajustes que se deben realizar al plano proyecto para el cálculo final de volúmenes de corte y relleno, las dificultades en los proyectos de nivelación; los métodos de estimación y predicción usando la interpolación espacial, el método del inverso de la distancia, el método de Kriging con sus principales características, el semivariograma y los modelos utilizados y su integración a Kriging para el cálculo de los pesos.

4.1. NIVELACIÓN DE TIERRAS

La nivelación de terrenos agrícolas se define como la modificación de la superficie del terreno ajustándolo a un plano con pendientes, para mejorar la eficiencia de aplicación del agua de riego y evacuación del agua de drenaje (Cano y Vázquez, 1997).

Los principales beneficios de la nivelación son:

- a). Aumento de la eficiencia de aplicación y uniformidad del riego.
- b). Ahorro de agua, mano de obra y energía.
- c). Mejoramiento del drenaje superficial.
- d). Control de la erosión.
- e). Mayor eficiencia en el uso de fertilizantes.
- f). Operación eficiente de la maquinaria.
- g). Mayor eficiencia en casi todas las prácticas de manejo del cultivo.

4.1.1. GRADOS DE NIVELACIÓN

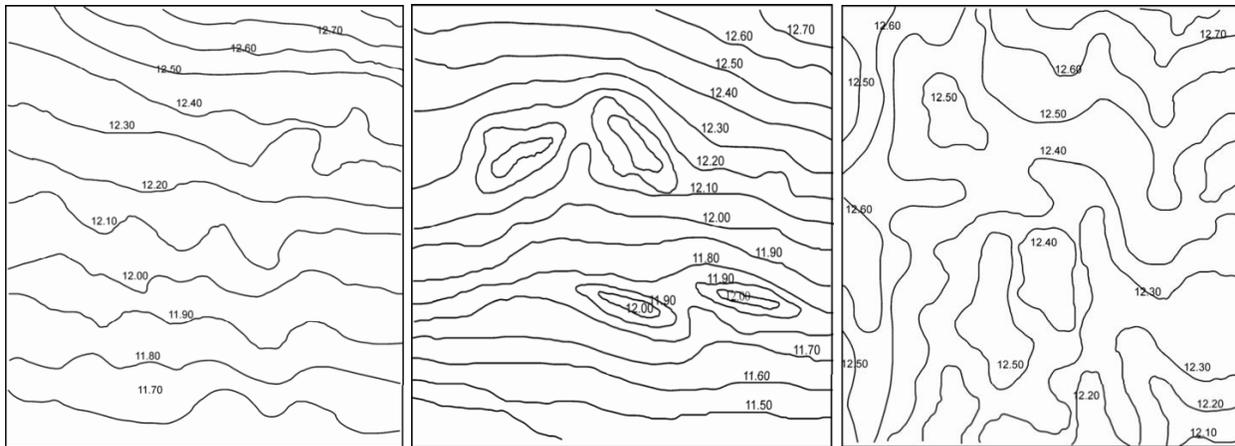
Madero y Torres (1971), mencionan que las necesidades de nivelación están determinadas por la variante de riego que ya se utilice o se pretenda adoptar y por la

condición topográfica original del terreno a nivelar. Para lo cual clasifican la nivelación en tres grados con base en la topografía del terreno (figura 4.1).

a. Nivelación de primer grado. Corresponde a los terrenos en los que la disposición de las curvas de nivel, muestran una topografía semejante y bastante uniforme, y en donde con dos o tres pasos de la niveladora se logra proyectar un buen trazo de riego. En este tipo de nivelación no se efectúan cálculos previos de plano y cotas proyecto, y no se modifican las pendientes naturales del terreno.

b. Nivelación de segundo grado. Se refiere a topografías en su mayor parte similares al caso anterior, pero con irregularidades aisladas, como pequeñas elevaciones o depresiones. En este caso, debe utilizarse equipo de movimiento de tierras, lo que implica operaciones de corte, acarreo y depósito y, posterior a ello, realizar una operación de afine con niveladora. En este tipo de nivelación es obligatorio efectuar un proyecto cuidadoso de los cortes a realizar y de los volúmenes a mover, pero para conservar su carácter de nivelación de segundo grado, no deben hacerse modificaciones a las pendientes naturales del terreno.

c. Nivelación de tercer grado. Es la que se requiere efectuar en aquellos terrenos cuya topografía es bastante irregular, en donde es necesario mover tierra en todo el lote mediante equipos diseñados para cortar, acarrear y depositar la tierra a distancias apreciables. También en este caso se requiere una operación de alisado o afine para dejar la superficie adecuada para el riego por gravedad. En este caso, con frecuencia se tiene que modificar, al menos en la dirección del riego, la pendiente natural del terreno.



a). Nivelación de primer grado; b). Nivelación de segundo grado; c). Nivelación de tercer grado
Figura 4.1. Tipo de nivelación según la topografía (Madero y Torres, 1971).

4.1.2. PASOS GENERALES PARA LLEVAR A CABO LA NIVELACIÓN

Los pasos generales para llevar a cabo la nivelación de un predio agrícola son los siguientes:

- a). Planeación de los trabajos.
- b). Conocimiento de la topografía del terreno.
- c). Obtención del plano proyecto.
- d). Cálculo del movimiento de tierras.
- e). Análisis económico.
- f). Integración del proyecto de nivelación de tierras

4.1.2.1. Planeación de los trabajos.

Factores como profundidad o espesor del suelo, topografía, naturaleza y clase del suelo, método de riego, pluviometría, mecanización, tipos de cultivo, longitud del surco, pendientes; condicionan el diseño. La combinación de estos factores generará una solución técnica, que a veces puede ser prohibitiva debido a los altos costos de inversión, por lo que será indispensable estudiar si el proyecto está económicamente justificado (Cano y Vázquez, 1997).

a. Medidas preparatorias.

Antes de proyectar la nivelación, han de diseñarse las redes de riego, drenaje y caminos; así como el área parcelada. La nivelación deberá proyectarse en áreas definidas por las redes antes mencionadas.

La nivelación se acompaña usualmente, de un estudio básico de campo desde el punto de vista edafológico, que figura siempre como anexo en el proyecto. El no realizarlo puede ser causa de graves fracasos en la futura explotación agrícola ya que puede aparecer subsuelo improductivo.

Según Marr (1957), existen siete condiciones que pueden hacer imposible o antieconómico el riego por gravedad y por consiguiente los trabajos de nivelación de tierras: suelos excesivamente permeables (infiltración básica >7.5 cm/h), suelos someros (profundidad menor que profundidad de corte requerida), topografía muy ondulada (donde se requiera mover más de 600 m³/ha), pendientes fuertes (provocan severa erosión, cuadro 4.1), problemas de drenaje subsuperficial (terrenos planos y porosos con nivel freático muy alto), suelos inestables (con problemas de asentamientos y/o compactación), caudal disponible pequeño (menores que los requeridos para el riego por gravedad).

b. Criterios de diseño.

Existen dos criterios principales en el diseño de la nivelación:

1. Seleccionar la pendiente que maximice la efectividad de un sistema de riego existente o que se esté planeando adoptar.
2. Seleccionar la pendiente que minimice el movimiento de tierras.

Una solución combinada entre ambos criterios es lo más razonable y congruente con el concepto clásico: “la nivelación de terrenos agrícolas es una práctica de acondicionamiento físico, que consiste en la remoción de tierras de las partes altas y su

acarreo y depósito en las bajas, a fin de dejar una superficie plana que se ajuste, hasta donde sea posible, a las pendientes naturales del terreno y que facilite las labores agrícolas, especialmente la aplicación del agua de riego” (Hernández y Sánchez, 2007).

b.1. Longitud del terreno a nivelar. Esta se encuentra condicionada tanto por el riego como por el drenaje; así como por el peligro de erosión. La longitud óptima del terreno es, normalmente, la mayor que permita regar satisfactoria y eficientemente. Como regla general, en la mayoría de los suelos que se nivelan para riego, la longitud del surco varía de 150m a 300m dependiendo de la pendiente y de la textura del suelo.

Si el recorrido es demasiado largo, el agua percola o se infiltra a demasiada profundidad al inicio del lote durante el tiempo que tarda en llegar a su final. Esto significa que el principio del lote es subirrigado y el final puede tener déficit de agua, lo que es el principal problema del riego por gravedad. Si es demasiado corto, es necesario construir zanjas extras de desagües o drenes incrementando con esto el costo por las labores y con ello el costo de producción. La figura 4.2. Muestra un caso de problemas por el exceso de longitud del lote y con ello del surco de riego.

Para una misma pendiente, la longitud del lote debe ser más corta en un suelo arenoso que en uno fuertemente arcilloso. Si el lote es demasiado largo, en suelos que tienen pobre drenaje interno, la corriente de agua puede acumular el agua en el final y causar daños a la producción. En los suelos arcillosos de las zonas húmedas, la longitud del lote está generalmente fijada por las necesidades de drenaje.

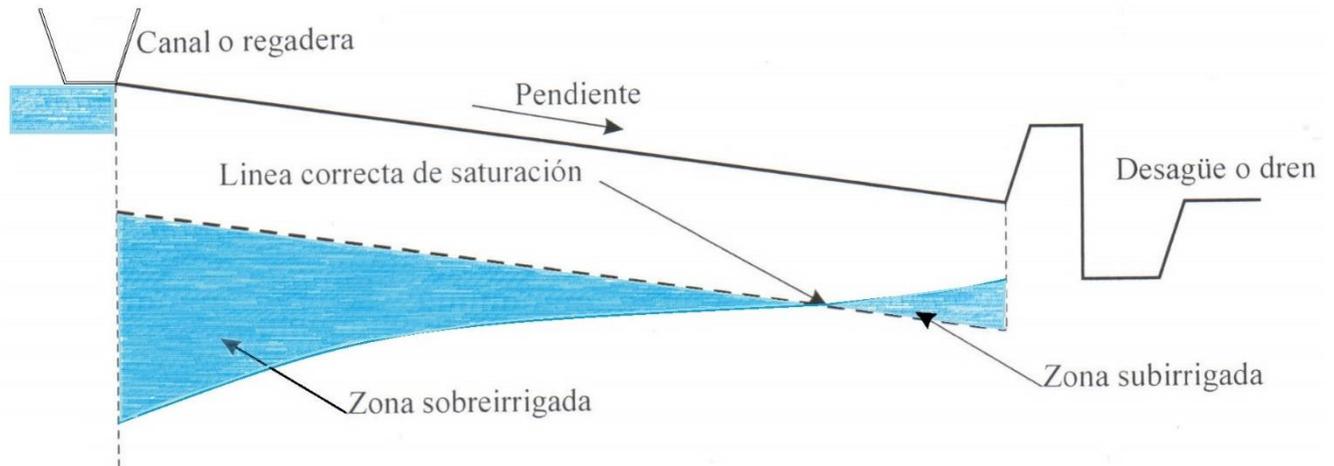


Figura 4.2. Problema que muestra las consecuencias de la excesiva longitud del terreno (Cano y Vázquez, 1997).

b.2. Pendiente del terreno. Esta puede variar de 0.05 a 0.5%. Los requerimientos de drenaje precisan que la pendiente mínima sea de 0.05%. El límite superior del 0.5% lo fija la necesidad de evitar erosión. La pendiente del terreno a nivelar puede ser uniforme o aumentar o disminuir en la dirección del riego. Cuando los proyectos de nivelación incluyan aumentar o disminuir pendientes, la máxima no debe ser más de dos veces la mínima, como se ilustra en la figura 4.3.

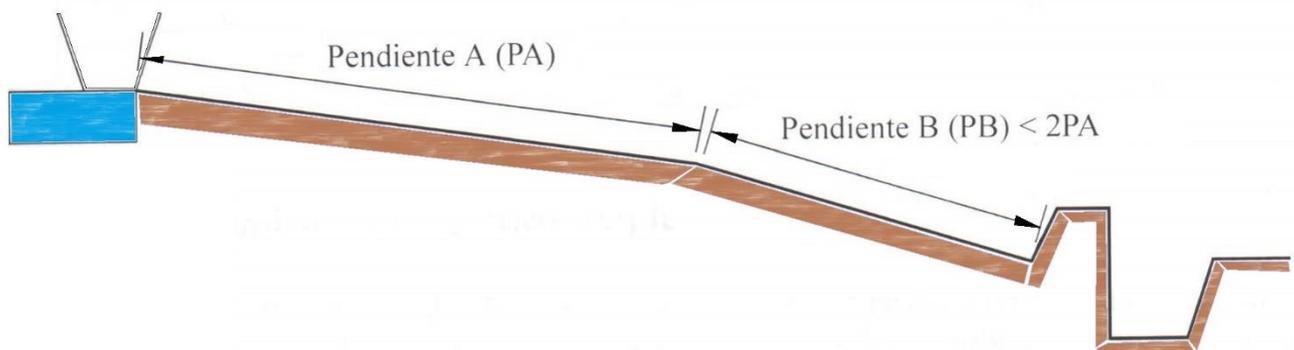


Figura 4.3. Caso de un cambio de pendiente (Cano y Vázquez, 1997).

En general las pendientes dependen del método de riego por gravedad a usar, el cuadro 4.1 indica valores mínimos, máximos e ideales para las variantes más importantes de estos.

Cuadro 4.1. Pendientes(*) mínimas, máximas e ideales para diferentes variantes de riego por gravedad.

MÉTODO DE RIEGO	PENDIENTE MÍNIMA (%)	PENDIENTE MÁXIMA (%)				PENDIENTE IDEAL (%)
		ZONAS ÁRIDAS	SEMIÁRIDAS	SUBHÚMEDAS	HÚMEDAS	
Melgas	0.05	4	3	2	1.0	0.5
Surcos	0.05	3	2	1	0.5	0.4
Corrugaciones	1.00	6	4	2	No recomen.	2.0

(*) Se refiere a las pendientes en la dirección del riego. La pendiente transversal en melgas se recomienda que sea nula o menor de 0.5%. En surcos pueden tolerarse pendientes transversales de hasta 10% en zonas áridas y de 6% en zonas lluviosas (Sánchez y Hernández 1994).

b.3. Definición del tipo de levantamiento topográfico a realizar. La nivelación de tierras siempre se tiene como requisito hacer un levantamiento topográfico para conocer la configuración topográfica del terreno, Hernández y Sánchez (2003), indican que existen tres métodos para la obtención de los datos: levantamiento simple, en cuadrícula y por radiaciones. La definición del tipo de levantamiento a utilizar dependerá de las características del predio a levantar y por su puesto del tipo de aparato que será utilizado para la realización del levantamiento topográfico.

c. Época adecuada.

Previo a los trabajos de nivelación de tierras se debe seleccionar la época adecuada para realizar los trabajos, con el fin de hacer económico el movimiento de tierras y evitar dañar físicamente al suelo, la nivelación debe efectuarse en el período libre de lluvias.

Cuando los terrenos estén bajo explotación debe, en principio hacerse la nivelación entre ciclos agrícolas o, en todo caso, durante el ciclo en que se obtengan menos beneficios. Considerar que un operador experimentado podrá nivelar de 2 a 5 ha/día de acuerdo al volumen de tierra a mover, a las distancias de acarreo y al tipo de equipo que se utilice. En caso de que haya más terreno del que se puede nivelar en el período seco o entre ciclos agrícolas, entonces deberá pensarse en usar equipos adicionales o dejar parte del área para nivelarse en otra ocasión.

Debe considerarse también en la programación de los trabajos, que toda cubierta vegetal y esquilmos de cosecha tienen que ser cortados e incorporados uniformemente en el área bajo proyecto o bien ser sacados fuera del área que se nivelará. Así mismo, debe tomarse en cuenta que los trabajos de nivelación requieren de la obtención de las condiciones topográficas actuales del terreno y de un proyecto, lo cual disminuirá el tiempo disponible para ejecutar los trabajos. Esto último puede ser de gran relevancia cuando la nivelación se haga en forma tradicional.

4.1.2.2. Topografía del terreno

La nivelación precisa planos muy detallados para su proyecto. Los planos topográficos pueden obtenerse por cualquiera de los métodos convencionales, pero el sistema de cuadrícula es el mejor para la nivelación.

Hernández y Sánchez (2008), mencionan que en forma tradicional existen tres métodos que pueden utilizarse para el levantamiento topográfico: el levantamiento topográfico simple o perimetral usado en caso de usar nivelación con rayo láser, recomendado para terrenos con pocas irregularidades topográficas; el levantamiento topográfico en cuadrícula rectangular, recomendado cuando el terreno presenta irregularidades topográficas importantes; y un levantamiento por radiaciones, capturando puntos topográficos que representen los cambios topográficos del lugar. Éste último tipo se ha generalizado debido al uso de aparatos modernos como las estaciones totales y GPS diferencial cuya precisión es muy alta; lo que ha hecho común obtener la topografía mediante “radiaciones”; en el cual, se toman puntos del terreno de forma heterogénea de tal forma que representen los cambios en la topografía del lugar y de esta forma se podrá reproducir la forma del terreno de forma precisa.

a. Levantamiento topográfico simple

Se realiza este tipo de levantamiento, pensando en que el propio operador de la maquinaria sea quien tome decisiones en el proyecto de la nivelación (obtención de las

“pendientes proyecto”), a menudo los distribuidores de los sistemas láser recomiendan un método simple (aunque aproximado) de levantamiento topográfico a través de los linderos del terreno como se muestra de manera esquemática en la figura 4.4.

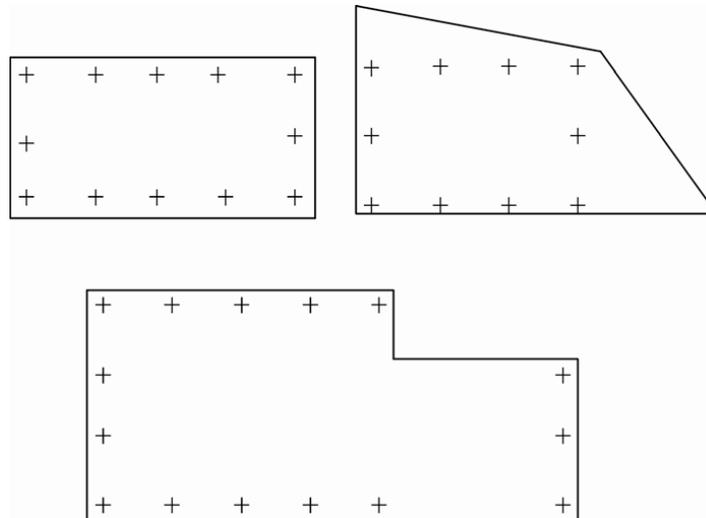


Figura 4.4. Método simplificado para el levantamiento topográfico con rayo láser.

Debe enfatizarse que en el terreno con topografía muy irregular el procedimiento anterior puede conducir a proyectos más caros, aunque las bondades del control automático durante el movimiento de tierras conducen a un acabado igual de preciso, en cualquier caso.

b. Levantamiento topográfico en cuadrícula

Si se pretende hacer cambio a las pendientes naturales, para minimizar los costos del movimiento de tierras y afectar lo menos posible al terreno, debe realizarse un levantamiento topográfico en cuadrícula, colocando las estacas o trompos correspondientes en cada nodo.

El tamaño o longitud de los lados de los cuadros, conocido como módulo de cuadrícula (L), debe fijarse de acuerdo con la topografía del terreno por nivelar. Así, cuando existen pocos accidentes topográficos, se recomienda utilizar módulos de 30 m y para topografías muy accidentadas se recomienda usar 20 m. En la práctica, la distancia más

común es de 30 m. Para lograr un proyecto más adecuado, se debe tratar hasta donde sea posible, garantizar igual representatividad de todos los puntos de la cuadrícula, aunque esto último no siempre puede lograrse, aún en lotes rectangulares, ya que el módulo se elige de acuerdo a la topografía.

Se recomienda iniciar colocando la primera hilera o columna paralela a uno de los linderos, empezando por la esquina del terreno cuyos linderos se aproximen más a un ángulo recto, y a una distancia desde el lindero del terreno igual a la mitad del módulo de cuadrícula elegido. La figura 4.5 muestra un lote cuya forma y dimensiones han permitido establecer una cuadrícula ideal.

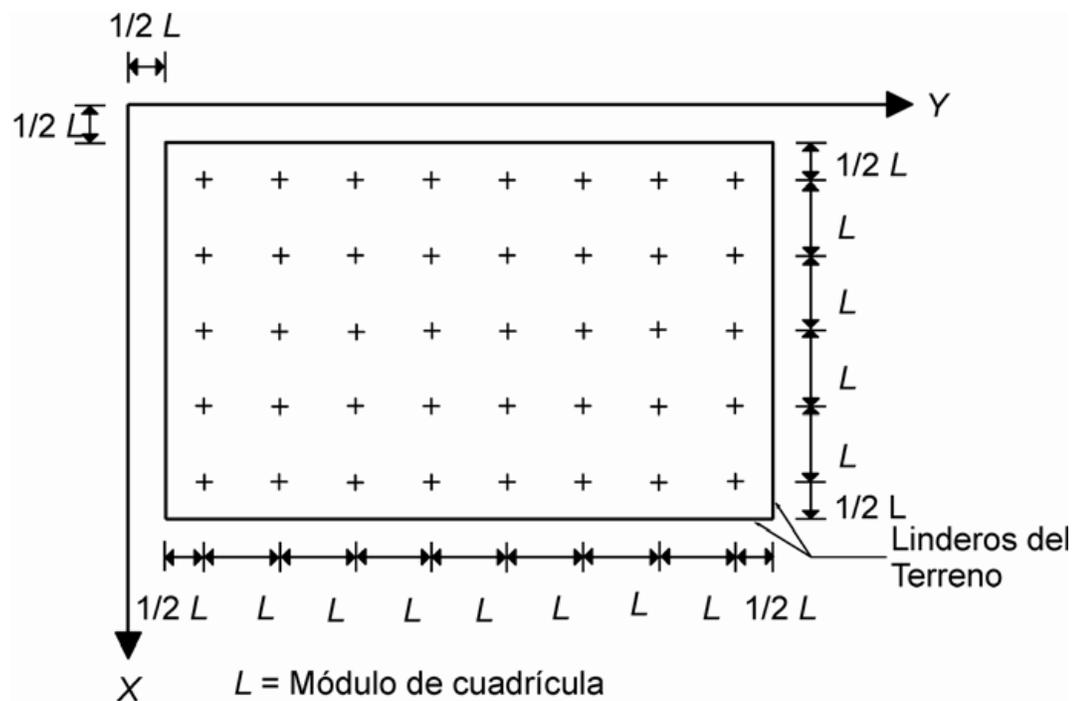


Figura 4.5. Establecimiento de la cuadrícula en el terreno.

El origen del sistema de referencia (ejes x, y), se considera que está a una distancia L de la primera hilera y de la primera columna de estacas. Con los datos de campo se elabora un plano en un rango de escalas de 1:1000 a 1:2000 dependiendo de la superficie por nivelar y se interpola para obtener curvas de nivel con equidistancia de 0.05 a 0.50 m en función de las pendientes naturales del terreno. El plano obtenido permite dividir el área por nivelar, de acuerdo con su topografía, en cuadros que pueden

nivelarse por separado y así reducir los costos de nivelación tal como se ilustra en la figura 4.6, en la que el terreno esquematizado se ha dividido en 8 secciones (Marr, 1957).

En esta etapa es necesario tomar en cuenta que las secciones de nivelación tengan pendientes generales acordes con los distintos métodos de riego que puedan implantarse y tratar de obtener secciones de forma rectangular; asimismo, se debe prever el abastecimiento de agua y el drenaje superficial.

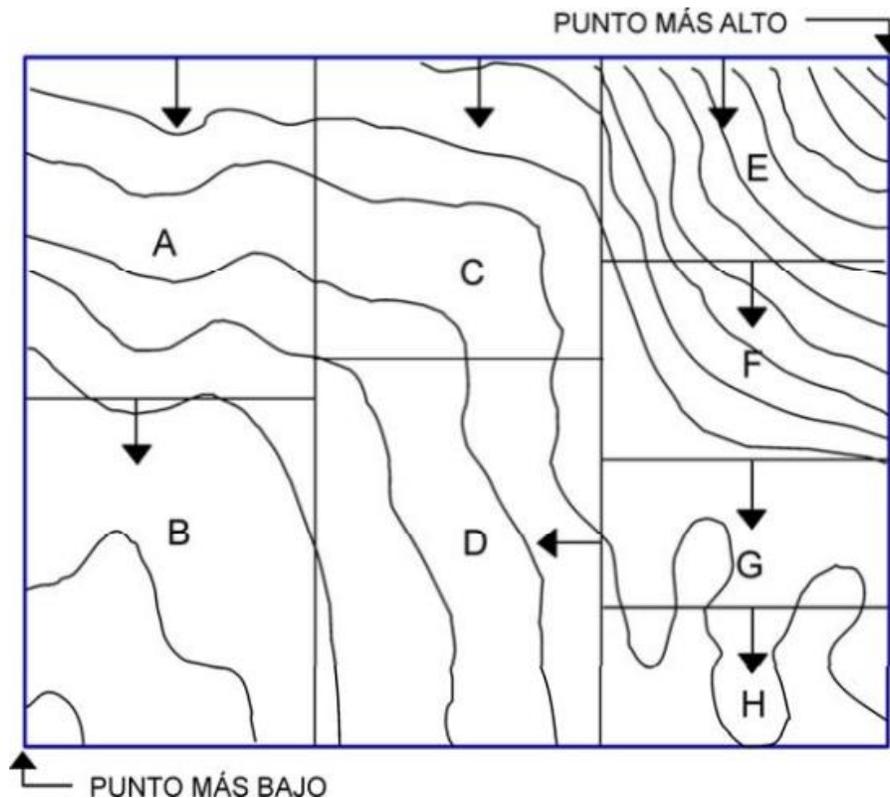


Figura 4.6. Definición de secciones que deben nivelarse por separado (Marr,1957)

c. Levantamiento topográfico por radiaciones.

Las radiaciones son un método topográfico que permite determinar coordenadas (x,y,z) desde un punto fijo llamado polo de radiación (O). Para situar una serie de puntos A, B, C, ... se estaciona el instrumento en un punto O y desde él se visan direcciones OA, OB,

OC, OD... , tomando nota de las lecturas acimutales y cenitales, así como de las distancias a los puntos y de la altura de instrumento y de la señal utilizada para materializar el punto visado. Los datos previos que requiere el método son las coordenadas del punto de estación y el azimut de al menos una referencia (o las coordenadas, que permitirán deducirlo). En la figura 4.7 se muestra un levantamiento por radiaciones, donde el topógrafo busco tener una pseudo-cuadrícula para poder reproducir la topografía del terreno.

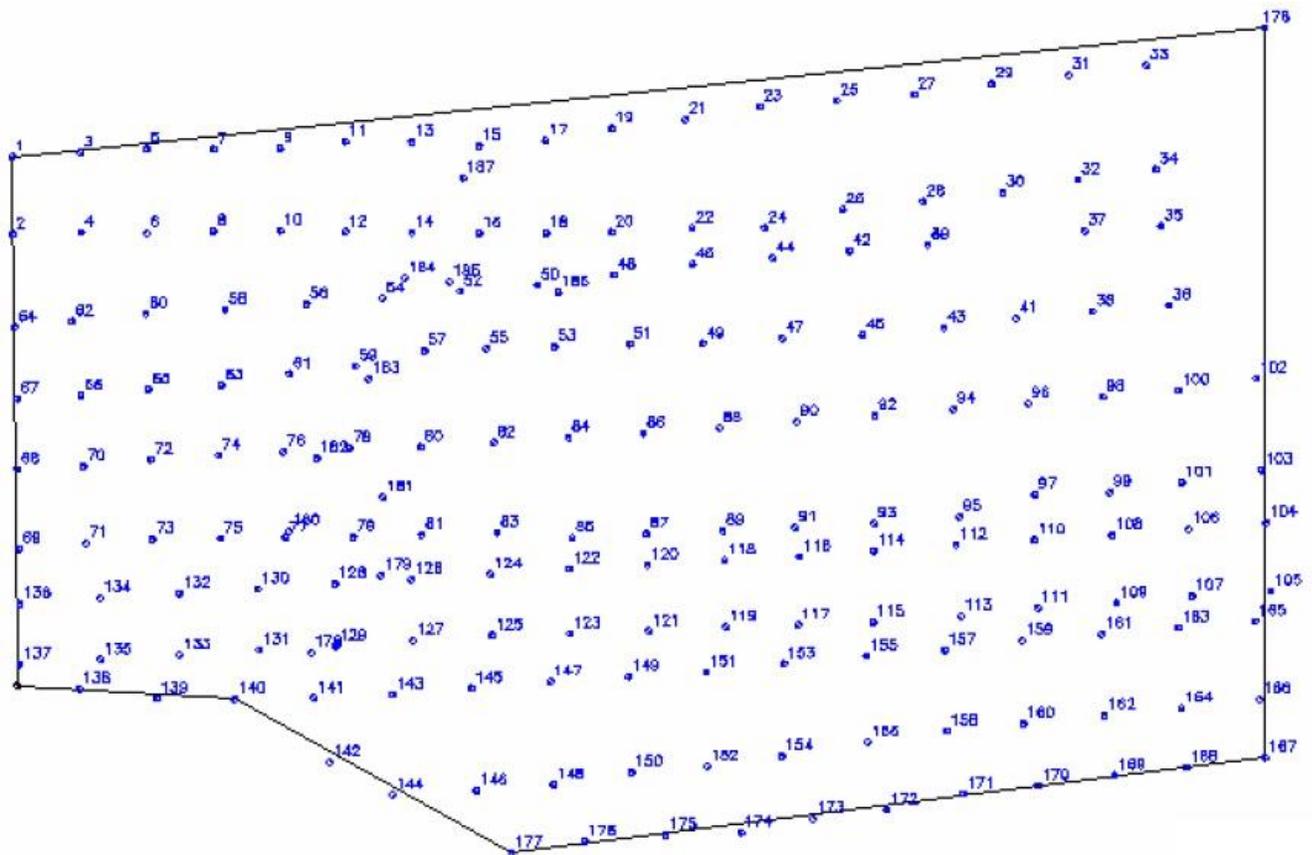


Figura 4.7. Levantamiento de un predio agrícola por radiaciones con estación total (Hernández, 2008).

4.1.2.3. Obtención del plano proyecto

Dentro del plano proyecto, el elemento clave para obtener proyectos económicos en la nivelación de tierras es la determinación de las “pendientes proyecto”, ya que a partir de éstas se calculan las “cotas proyecto” y los datos de construcción, es decir, los espesores

de corte y relleno. Existen dos clases de métodos para determinar las “pendientes proyecto”: empíricos y directos.

a. Métodos empíricos

Los métodos empíricos consisten en ajustar por tanteos o aproximaciones sucesivas, pendientes que sean adecuadas para riego y que proporcionen un equilibrio adecuado entre cortes y rellenos a distancias de acarreo razonablemente cortas. Estos métodos requieren que el proyectista tenga una amplia experiencia y criterio para obtener soluciones rápidas y económicas.

Como ejemplo de estos métodos se puede citar el de Perfil Simple, Doble Perfil y Rectificación de Curvas de Nivel; sin embargo, el uso de cualquiera de ellos es injustificable cuando se conoce alguno de los métodos directos.

b. Métodos directos

Los métodos directos utilizan algún principio matemático (centro de volumen fijo, residuos simétricos o mínimos cuadrados), para obtener las “pendientes proyecto” que minimicen el volumen de tierra que debe moverse. El método más conocido y recomendado es el método general de mínimos cuadrados.

4.1.2.4. Cálculo del movimiento de tierras.

El procedimiento empleado para el cálculo del movimiento de tierras ésta basado en las alturas de corte y relleno calculadas en los puntos de la cuadrícula que se supone cubre el terreno a nivelar, quedando este en un cierto número de partes iguales (Cano y Vázquez, 1997). Las alturas de corte o relleno se obtienen por diferencia, en cada punto, de las cotas de la superficie actual del terreno y de la elevación futura del terreno nivelado, teniendo signos positivo o negativo, según quede por encima o por debajo del plano del lote a nivelar. Existen varios tipos de métodos de cálculo para cuantificar el

volumen de corte o relleno que generan estas diferencias de alturas; y conforman el volumen de acarreo de las áreas de corte a las áreas de relleno. Los métodos más utilizados para la cuantificación del volumen de acarreo son el método: estereométrico, de las áreas medidas, de los cuatro vértices o cuatro puntos, de la adición.

4.1.2.5. Análisis Económico

El principal inconveniente de la nivelación es su alto costo, por lo que la decisión de recomendar su ejecución siempre debe ir precedida de una valoración o revaloración de la adaptabilidad del terreno y otras condiciones para el riego superficial, complementándolo con un análisis económico que justifique la rentabilidad del proyecto. A esto se le conoce como aceptación técnico-económica del proyecto.

4.1.2.6. Integración del proyecto de nivelación de tierras.

Para dar formalidad al proyecto de nivelación de tierras habrá que formar un expediente escrito con la documentación necesaria para poder solicitar un financiamiento externo en caso de que sea necesario. Los documentos que dan formalidad a las obras de nivelación son: memoria de cálculo, planos topográficos altimétricos del predio antes y después de la nivelación, plano de cortes y rellenos, plano de áreas de corte y relleno, resumen técnico y análisis económico del proyecto.

Licano (1988), propone que los planos del proyecto deberán contener los siguientes datos:

- a). Anotación de cada vértice de la cuadrícula, de la cota proyecto, utilizando para el corte color **Rojo** y para rellenos color **Azul**, o bien signos (+) o (-) respectivamente.
- b). Volumen total a mover y volumen promedio por hectárea (m^3/ha).
- c). Plano marcando con flechas negras, las pendientes que dieron para el cálculo en las dos direcciones perpendiculares.
- d). Propuesta de trazo de riego.

4.1.3. NIVELACIÓN TRADICIONAL VS NIVELACIÓN CON RAYO LÁSER.

Existen dos tecnologías de nivelación de tierras: la nivelación tradicional y la nivelación con equipo láser.

4.1.3.1. Nivelación Tradicional.

La nivelación tradicional consiste en:

- ❖ Determinar las condiciones topográficas actuales del terreno, estableciendo una cuadrícula en el campo empleando tránsito, cinta y nivel fijo, dejando estacas permanentes en el campo para ayudar a la ejecución de los trabajos. A un lado de cada estaca, se establecerá un trompo a ras del suelo, al cual se le determinará la cota con nivel fijo y servirá como nivel de referencia, durante el control del movimiento de tierras.
- ❖ Efectuar el cálculo del plano proyecto por alguna variante del principio de mínimos cuadrados.
- ❖ Calcular datos de construcción (espesores de cortes y rellenos) y utilizar un sistema de señalamiento de éstos en el campo, auxiliándose de las estacas colocadas.
- ❖ Realizar el movimiento de tierras con equipos e implementos de tracción mecánica, llevando un control de los datos de construcción (cortes y rellenos), auxiliándose con personal de apoyo, para garantizar que los cortes y rellenos resultantes correspondan a los datos de proyecto (con alguna tolerancia preestablecida).
- ❖ Quitar las estacas y dar un alisado final con niveladora (“land plane”), cuando el trabajo de movimiento de tierras grueso ha sido aceptado.

4.1.3.2. Nivelación con equipo láser

La palabra **láser** proviene del idioma inglés y corresponde a las iniciales de las palabras que describen este fenómeno: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations*, lo que significa “Amplificación de la Luz mediante Emisión Estimulada de Radiaciones”

(Hernández y Sánchez, 2008).

La luz láser que se emplea en las aplicaciones de la industria de construcción y en la agricultura, se genera por el paso de una corriente eléctrica de alta tensión, a través de una atmósfera de una mezcla de helio y neón, confinada en un tubo cilíndrico de cristal, dotado de espejos en sus extremos. La luz obtenida por la estimulación, es reflejada por una serie de espejos, para finalmente salir por una ventana giratoria que le permite generar un plano de luz, bien sea horizontal o con pendiente, en una o dos direcciones, según el diseño del equipo y la aplicación que se le pretende dar.

La luz láser así generada es monocromática y tiene tres características que la hacen ideal para los propósitos de nivelación de tierras:

- 1). El haz conserva su diámetro original, sin mostrar tendencia a abrirse, a pesar de viajar grandes distancias.
- 2). Pierde poca intensidad al viajar por la atmósfera, por lo que puede alcanzar grandes distancias.
- 3). No se mezcla con otras clases de luz y puede ser detectada por receptores adecuados.

La **nivelación con equipo láser** consiste en:

- ❖ Obtener las condiciones topográficas actuales del terreno, utilizando un equipo emisor y otro receptor de rayo láser, que puede ser el mismo sistema láser, previamente configurado para esta función.
- ❖ Efectuar el cálculo de las pendientes proyecto, ya sea en forma simplificada o por alguna variante del principio de mínimos cuadrados.
- ❖ Realizar el movimiento de tierras, guiado por el sistema láser previamente configurado para efectuar esta función.

Las ventajas comparativas de la nivelación con equipo láser con respecto a la nivelación tradicional son:

- a). El levantamiento topográfico con equipo láser se realiza en menor tiempo, con menos personal y con menos posibilidades de cometer equivocaciones.

- b). La nivelación con equipo láser no requiere de un estacado en cuadrícula, como lo requiere la nivelación tradicional.

- c). La nivelación con equipo láser no requiere el establecimiento de un sistema laborioso y tardado de control de los datos de construcción en el campo.

- d). La nivelación con equipo láser permite realizar, tanto el movimiento grueso de tierras como el afine, con una gran eficiencia y precisión, característico de un sistema automático y electrónico, lo cual se traduce en un acabado perfecto.

4.1.4. ESTIMACIÓN DEL PLANO PROYECTO, MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS.

El objetivo del método de mínimos cuadrados es el de encontrar el plano que equilibre el corte y relleno del terreno en tal forma que el corte se acercará al mínimo.

El método de mínimos cuadrados, se aplica a lotes de forma irregular y es susceptible de sistematizarse con fines de procesamiento electrónico, el cual consiste en obtener los parámetros de regresión múltiple del modelo, dado por la expresión 4.1, que representa una superficie plana en el espacio tridimensional, como el que se ilustra en la figura 4.8.

$$\hat{Z}_{ij} = C_A + C_B X_i + C_C Y_j \quad (4.1)$$

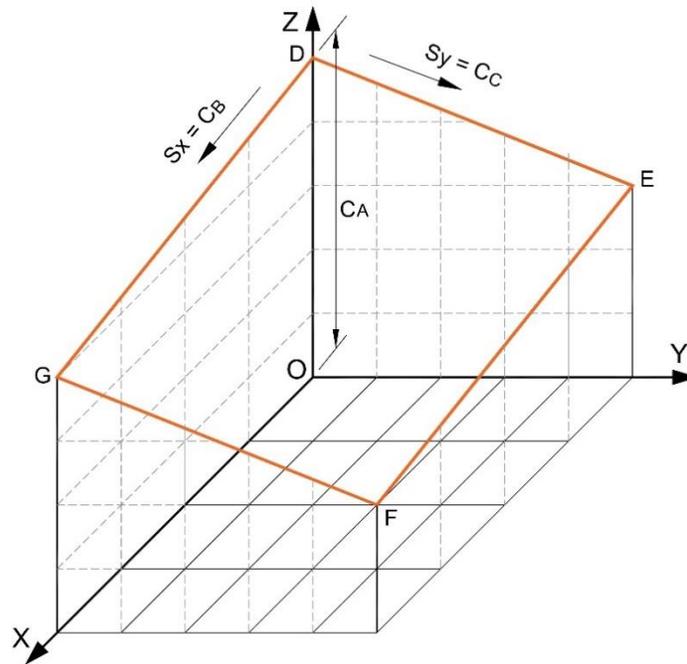


Figura 4.8. Plano en el espacio referido a ejes ortogonales.

Donde:

\hat{Z}_{ij} = Cota estimada del plano proyectado en un punto de coordenadas (X_i, Y_j)

C_B, C_C = Pendientes en los sentidos de los ejes X y Y respectivamente.

C_A = Constante que geoméricamente representa la cota sobre el plano proyectado,

en el origen del sistema de coordenadas.

i = Número de hileras (1, 2, 3, ..., n)

j = Número de columnas (1, 2, 3, ..., m)

De la etapa previa de captura de información se conocen las cotas del terreno natural Z_{ij} en cada punto de la cuadrícula.

El principio de mínimos cuadrados, dice que los mejores estimadores de los parámetros: C_A, C_B y C_C se obtienen cuando la suma de cuadrados de las desviaciones sea mínima según la expresión (4.2).

$$\sum (Z_{ij} - \hat{Z}_{ij})^2 = S = \text{mínimo} \quad (4.2)$$

Sustituyendo en (4.2) la ecuación (4.1), la condición de mínimos cuadrados es:

$$S = \sum [Z_{ij} - (C_A + C_B X_i + C_C Y_j)]^2 = \text{mínimo} \quad (4.3)$$

Igualando a cero la primera derivada de la función respecto a cada uno de los coeficientes, como se indica en la expresión (4.4).

$$\frac{\partial S}{\partial (C_A, C_B, C_C)} = 2 \sum [C_A + C_B X_i + C_C Y_j - Z_{ij}] = 0 \quad (4.4)$$

Como las variables a encontrar son C_A , C_B y C_C , se debe derivar la función S respecto a ellas, (ecuaciones 4.5, 4.6 y 4.7) con lo que se obtendrá un sistema de ecuaciones para el cálculo de los coeficientes:

$$\frac{\partial S}{\partial C_A} = 2 \sum (C_A + C_B X_i + C_C Y_j - Z_{ij}) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial C_B} = 2 \sum (C_A + C_B X_i + C_C Y_j - Z_{ij}) X_i = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial S}{\partial C_C} = 2 \sum (C_A + C_B X_i + C_C Y_j - Z_{ij}) Y_j = 0 \quad (4.7)$$

Las ecuaciones normales serán, las mostradas en las expresiones (4.8, 4.9 y 4.10):

$$N C_A + C_B \sum X + C_C \sum Y = \sum Z \quad (4.8)$$

$$C_A \sum X + C_B \sum X^2 + C_C \sum XY = \sum XZ \quad (4.9)$$

$$C_A \sum Y + C_B \sum XY + C_C \sum Y^2 = \sum YZ \quad (4.10)$$

Expresando en forma matricial, estas ecuaciones normales tenemos:

$$\begin{bmatrix} n & \sum X & \sum Y \\ \sum X & \sum X^2 & \sum XY \\ \sum Y & \sum XY & \sum Y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_A \\ C_B \\ C_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Z \\ \sum XZ \\ \sum YZ \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Despejando de la expresión (4.11) el vector de coeficientes se tendrá la solución:

$$\begin{bmatrix} C_A \\ C_B \\ C_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X & \sum Y \\ \sum X & \sum X^2 & \sum XY \\ \sum Y & \sum XY & \sum Y^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum Z \\ \sum XZ \\ \sum YZ \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

El cálculo de los coeficientes C_A , C_B y C_C (expresión 4.12) se podrá obtener usando determinantes o bien calculando la **inversa de la matriz**; para lo cual habrá primero que determinar la sumatorias especificadas y construir en forma numérica la expresión anterior. Sin embargo, se puede hacer un análisis más profundo y desarrollar el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) en forma matricial y llegar a una solución que no involucre realizar todas esas sumatorias.

4.1.4.1. Uso de los determinantes para obtener los coeficientes C_A , C_B y C_C

Los parámetros del plano proyecto se pueden calcular mediante **derminantes** con las ecuaciones 4.13, 4.14 y 4.15, mismas que involucran a las cotas del terreno natural (Z_{ij}) y a las coordenadas de cada punto de la cuadrícula.

$$C_A = \frac{D_A}{D} \quad (4.13)$$

$$C_B = \frac{D_B}{D} \quad (4.14)$$

$$C_C = \frac{D_C}{D} \quad (4.15)$$

Donde :

$$D = N \sum X^2 \sum Y^2 + \sum X \sum Y \sum XY - (\sum Y)^2 \sum X^2 - N (\sum XY)^2 - (\sum X)^2 \sum Y^2 \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} D_A = & \sum Z \sum X^2 \sum Y^2 + \sum X \sum XY \sum YZ + \sum Y \sum XY \sum XZ - \sum Y \sum YZ \sum X^2 \\ & - \sum Z (\sum XY)^2 - \sum X \sum XZ \sum Y^2 \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$D_B = N \sum XZ \sum Y^2 + \sum Y \sum Z \sum XY + \sum X \sum Y \sum YZ - \left(\sum Y \right)^2 \sum XZ - N \sum XY \sum YZ - \sum X \sum Z \sum Y^2 \quad (4.18)$$

$$D_C = N \sum YZ \sum X^2 + \sum X \sum Y \sum XZ + \sum X \sum Z \sum XY - \sum Y \sum Z \sum X^2 - N \sum XY \sum XZ - \left(\sum X \right)^2 \sum YZ \quad (4.19)$$

Para lo cual:

$$\sum = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ij$$

$N = nxm =$ Número total de vértices de la cuadrícula.

4.1.4.2. Método matricial para obtener los coeficientes C_A , C_B y C_C

Guajarati y Porter (2009), desarrollan un enfoque matricial de la regresión lineal múltiple. En el Anexo A, se desarrolla un resumen de la teoría para la aplicación del método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO).

La solución se podrá obtener si se cumple la condición descrita en la ecuación (4.20), cuya deducción se puede ver en el anexo A.1.

$$(\mathbf{X}' \mathbf{X}) \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}' \mathbf{y} \quad (4.20)$$

Para facilidad en la interpretación de los datos y evitar confusiones con las coordenadas (X,Y,Z) de campo, se realizó un cambio de variable a la expresión (4.20) obteniéndose la expresión (4.21):

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (4.21)$$

Donde:

\mathbf{A} ó \mathbf{X} = Matriz de coordenadas XY.

A^T ó X' = Transpuesta de la Matriz de coordenadas XY.

b ó y = Vector de coordenadas Z.

$\hat{\beta}$ = Vector de incógnitas o Coeficientes (C_A, C_B, C_C).

De las ecuación (4.21) se despeja el vector de incógnitas o vector de coeficientes ($\hat{\beta}$); para ello habrá que multiplicar por la izquierda por la inversa como se muestra en la expresión (4.22) quedando una matriz identidad (I), mostrada en la expresión (4.23), que al multiplicar el vector solución ($\hat{\beta}$) lo dejará igual, lográndose el despeje mostrado en (4.24).

$$(A^T A)^{-1}(A^T A) \hat{\beta} = (A^T A)^{-1} (A^T b) \quad (4.22)$$

$$I \hat{\beta} = (A^T A)^{-1} (A^T b) \quad (4.23)$$

$$\hat{\beta} = (A^T A)^{-1} (A^T b) \quad (4.24)$$

La ecuación (4.24) es un resultado fundamental de la teoría de MCO en notación matricial. Muestra cómo se estima el vector $\hat{\beta}$ a partir de la información dada. De esta forma puede calcularse la ecuación del plano (4.1).

El desglose del cálculo de los parámetros de la ecuación (4.24), para el caso de tres parámetros, se muestra en las expresiones (4.25, 4.26 y 4.27):

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} C_A \\ C_B \\ C_C \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$(A^T A) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & \dots & Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & X_1 & Y_1 \\ 1 & X_2 & Y_2 \\ 1 & X_3 & Y_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_n & Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X & \sum Y \\ \sum X & \sum X^2 & \sum XY \\ \sum Y & \sum XY & \sum Y^2 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$(A^T \mathbf{b}) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & \dots & Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Z \\ \sum XZ \\ \sum YZ \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

El coeficiente de correlación o determinación (R^2), puede calcularse según expresión (a.17), cuya deducción se puede ver en el anexo A. El cambio de variables respectivo se muestra en la ecuación (4.28).

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}^T A^T \mathbf{b} - n \bar{Z}^2}{\mathbf{b}^T \mathbf{b} - n \bar{Z}^2} \quad (4.28)$$

4.1.5. AJUSTES A LA ELEVACIÓN DEL PLANO PROYECTO

En la práctica, donde existieron rellenos habrá compactación y quedarán hoyos, estos se presentarán a través del tiempo por causa de la lluvia y compactación del suelo, por lo que es necesario aumentar los cortes, por lo tanto, disminuirán los rellenos esto se hace hasta tener un coeficiente de abundamiento (R) deseado; el ajuste se realiza bajando o subiendo el plano proyecto (Δ), como se muestra en la figura 4.9.

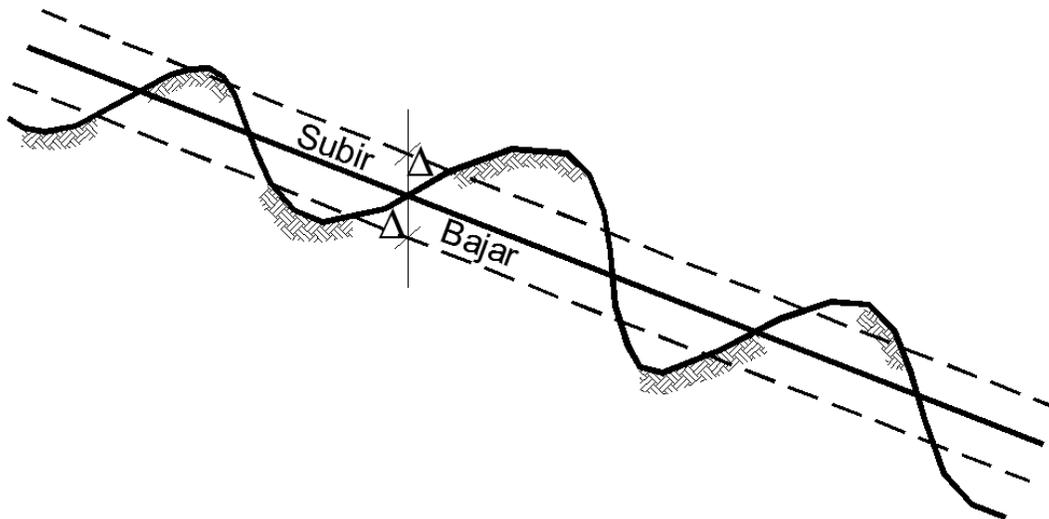


Figura 4.9. Subiendo o bajando el plano proyecto.

4.1.5.1. Espesores de Cortes y Rellenos

Si las pendientes obtenidas son adecuadas para el método de riego que se pretenda utilizar, se procede al ajuste de la elevación del plano proyecto. En caso contrario se deben hacer los ajustes a la(s) pendiente(s).

Los espesores de corte o relleno, en cada punto de la cuadrícula, se calculan mediante la expresión (4.29):

$$C_{ij} = Z_{ij} - \hat{Z}_{ij} \quad (4.29)$$

Donde:

C_{ij} = espesores de corte (valores positivos) o espesores de relleno (valores negativos).

Z_{ij} = cotas del terreno natural.

\hat{Z}_{ij} = “cotas proyecto”, que se obtienen al substituir las coordenadas de cada punto de la cuadrícula en la ecuación del plano proyecto.

Comúnmente los espesores de **corte** son identificados mediante el **color rojo** y los espesores de **relleno** de un **color azul**.

4.1.5.2. Volúmenes

La estimación de volúmenes puede hacerse por varios métodos, sin embargo, se recomienda el método de los Cuatro Vértices, sugerido por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1985) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA), el cual ha sido adoptado en forma oficial por las dependencias Mexicanas relacionadas con el tema.

a. Método de los Cuatro Vértices (USDA).

Conocido también como de los “Cuatro Puntos”. El cálculo mediante este método es más laborioso porque se aplica a las áreas individuales, $A=L^2$, en cuyos vértices se conocen

los datos de construcción. Los volúmenes de corte y relleno se obtienen usando las siguientes ecuaciones (4.30 y 4.31):

$$V_C = \frac{(\sum C_i)^2}{|\sum Re_i| + |\sum C_i|} \left(\frac{A}{4}\right) \quad (4.30)$$

$$V_R = \frac{(\sum Re_i)^2}{|\sum Re_i| + |\sum C_i|} \left(\frac{A}{4}\right) \quad (4.31)$$

Donde:

V_C = Volumen de corte en el cuadro correspondiente.

V_R = Volumen de relleno en el cuadro correspondiente.

$\sum C$ = Suma de espesores de corte en los vértices del cuadro correspondiente.

$\sum Re$ = Suma de espesores de relleno en los vértices del cuadro correspondiente.

A = Área individual de un cuadro de lado L (L = Longitud de cuadrícula).

El plano que resulta del método de mínimos cuadrados, bajo el supuesto de que cada cota topográfica tiene igual representatividad, conduce al equilibrio de espesores de corte, y teóricamente (según el método de cubicación de la adición), también conduce al equilibrio de volúmenes de relleno.

Sin embargo, cuando se aplica el método de cubicación de los cuatro vértices, considerado como más preciso, la relación de volúmenes de corte/volúmenes de relleno (R) puede ser mayor o menor que la unidad. **R** comúnmente se denomina el **Coefficiente de Abundamiento**.

Por otra parte, la experiencia ha demostrado que es necesario contar con un volumen mayor de corte que de relleno para cubrir las necesidades de este último por efecto de la compactación del suelo. Por lo tanto, es necesario modificar el plano proyecto de tal forma que se cumpla la condición (4.32).

$$\frac{V_C}{V_{Re}} = R > 1 \quad (4.32)$$

En la práctica se ha encontrado que esta relación **R** debe estar entre **1.10** y **1.50**, dependiendo fundamentalmente de la textura del suelo y su mayor o menor contenido de materia orgánica (Walker, 1989). Trueba Coronel (1971), investigador en el área de la nivelación de tierras, dentro de las recomendaciones que hizo para determinar la relación corte/relleno, propuso determinar R en función de la textura, es decir, de los porcentajes de arena, limo y arcilla del terreno por nivelar (Figura 4.10).

Es decir, si un suelo es arenoso el coeficiente se encontrará cerca de 1.1, pero si es arcilloso el valor del coeficiente se encontrará cerca de 1.5. Si se considerara un suelo intermedio (franco arcilloso) los valores del coeficiente variarán entre 1.20 y 1.30.

Para cubrir este requisito, se recomienda bajar o subir el plano proyecto paralelamente a sí mismo (sin modificar las pendientes proyecto), una cantidad, cuya magnitud se debe estimar por iteraciones.

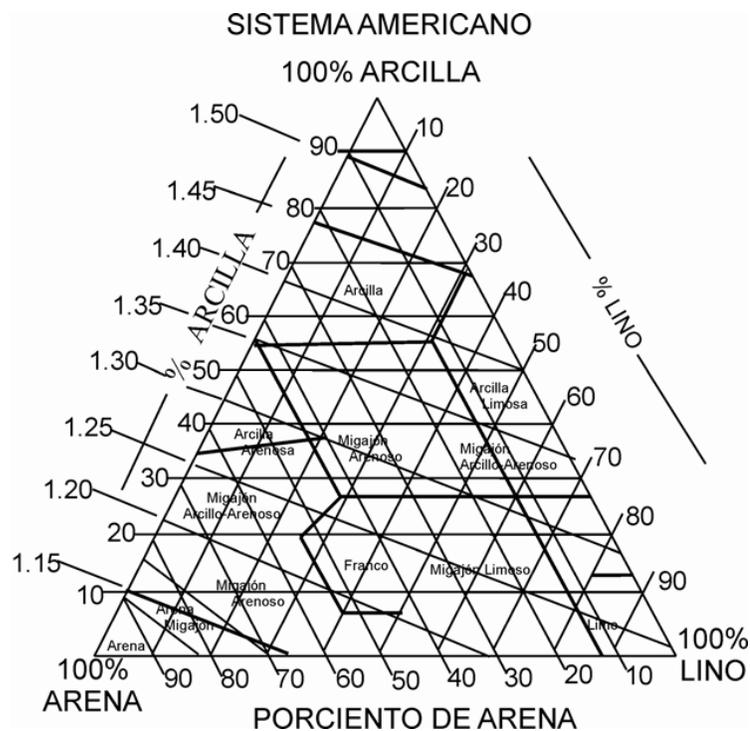


Figura 4.10. Valores recomendados de la relación corte/relleno en los trabajos de nivelación de tierras (Trueba Coronel, 1971).

b. Supuestos para el método de los Cuatro Vértices.

Walker (1989), menciona que es necesario contar con un volumen mayor de corte que de relleno para cubrir las necesidades de éste último. Por lo tanto, es necesario modificar el plano proyecto de tal forma que se mueva el plano de acuerdo a la expresión (4.33).

$$\Delta = \frac{R V_{Re} - V_C}{\sum_{i=1}^{N_c} A_i (1 + R)} \quad (4.33)$$

Hernández y Sánchez (1994), simplifican la expresión anterior en términos de alturas de corte y relleno, quedando de la forma (2.34):

$$\Delta = \frac{R \sum_{j=1}^{N_r} |Re_j| - \sum_{i=1}^{N_c} C_i}{RN_r + N_c} \quad (4.34)$$

Donde:

R = Relación de Corte/Relleno deseada.

En caso de **N_c** deberá incluir el número de estacas que no tienen corte ni relleno (puntos nulos).

C_i = Espesor de corte i-ésimo (m)

N_c = Número de espesores de corte (i =1, 2, 3 ... N_c).

Re_j = Espesor de relleno j-ésimo (m)

N_r = Número de espesores de relleno (j =1, 2, 3 ... N_r).

La ecuación anterior no es exacta pues algunos espesores de relleno pequeños, pueden pasar a ser espesores de corte, una vez que se baja en **Δ** al plano proyecto. Sin embargo, después de varios cálculos proporciona un ajuste muy cercano al coeficiente de compactación requerido.

4.1.6. DIFICULTADES EN LOS PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

Según Hernández y Sánchez (1997), los problemas más comunes que se presentan son:

4.1.6.1. Nivelación con pendientes obligadas

Cuando resulta que las pendientes naturales del terreno no se adaptan a los requerimientos del método de riego elegido, se deben cambiar éstas, por lo que el “plano proyecto” tendrá pendientes obligadas. Este plano se hace pasar por el centroide del terreno, con lo que se logra siempre un equilibrio entre cortes y rellenos; Es claro que ahora los volúmenes a mover y sus distancias de acarreo se incrementan, pero ésta es la mejor solución si se deben respetar las pendientes especificadas para el diseño del riego.

4.1.6.2. Proyecto con restricciones en la profundidad de corte

Para afectar lo menos posible la fertilidad del suelo, como consecuencia de los trabajos de nivelación, debe investigarse la profundidad del suelo agrícola antes de realizar el proyecto, estableciéndose una profundidad permisible de corte. Se recomienda que no más del 10% de la superficie del terreno quede con espesores de corte mayores a los permisibles.

Espesores de corte mayores de 30 cm generalmente conducen a una pérdida de la capa mejor acondicionada para el desarrollo de los cultivos, por lo que es recomendable establecer este límite máximo en suelos profundos (con más de 80 cm de espesor).

Suelos delgados y de topografía irregular podrán nivelarse sólo si se subdivide el área en cuadros pequeños que se proyecten y nivelen por separado, sin olvidar que debe preverse el suministro de agua y el drenaje en cada uno de los cuadros.

En la actualidad no es recomendable en los trabajos de nivelación mover más de 750 m³/ha, para que la inversión sea rentable.

4.1.6.3. Conservación de la Nivelación

La topografía de un campo regado por gravedad, aún después de la nivelación, no es una característica estática; año con año las operaciones normales del cultivo causan disturbios en las capas superficiales. Especialmente después de la nivelación, con los primeros riegos, las áreas de relleno se asientan y las de corte se elevan dejando una superficie irregular. Es recomendable, por lo tanto, establecer un cultivo anual después de una nivelación para estar en posibilidad de hacer el primer ajuste a las irregularidades inducidas.

El uso de arados de doble vía (reversibles) es recomendable para las labores de labranza primaria, ya que estos no producen las depresiones que ocasionan los arados de una sola vía. Se recomienda alternar el sentido del barbecho entre dos labores sucesivas.

4.2. INTERPOLACIÓN ESPACIAL

López (1995) menciona que la interpolación espacial consiste en estimar el valor de una variable aleatoria para un sitio dado, a partir de un conjunto de valores observados en sitios cercanos. La información que se puede procesar de esta forma es la correspondiente a variables meteorológicas como temperatura, precipitación, presión, evaporación, etc., además de información referente a propiedades del suelo como humedad, propiedades físicas y químicas de los mismos. De manera similar es posible procesar cotas topográficas, y es muy recomendable el uso de estos métodos cuando la cantidad de puntos es reducida.

Una característica importante de ésta clase de información es su naturaleza aleatoria con respecto al espacio. Por esto, los métodos de interpolación hacen diferentes suposiciones y tienen grados diferentes de complejidad.

4.2.1. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN O PREDICCIÓN

Los métodos de estimación o predicción son una clase más amplia de técnicas que contienen a los métodos de interpolación. Según Edward (1989) citado por Segundo (2006) los métodos de estimación usan la información muestral obtenida, para predecir valores en áreas que no han sido muestreadas. Las estimaciones se realizan basándose en el principio de los promedios ponderados de los datos de las mediciones. Si x denota un punto en el espacio, y $Z(x)$ una función de x que es conocida en n puntos de observación (x^1, x^2, \dots, x^n) , se trata de encontrar un estimado $Z^*(x)$, para un valor actual $Z(x)$ con la expresión (4.35) bajo la condición (4.36):

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (4.35)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (4.36)$$

Donde:

n = Número de observaciones dentro del área de influencia

$Z(x_i)$ = valor de la variable en función de las coordenadas x_i .

w_i = Coeficiente de ponderación asignada al dato $Z(x_i)$

Burrough y McDonnell (1998) citado por Hartkamp *et.al* (1999), manifiestan que cuando los datos son abundantes la mayor parte de técnicas de interpolación dan resultados similares. Cuando los datos son escasos, las suposiciones subyacentes sobre la variación entre puntos probados pueden diferenciarse y la opción del método de interpolación y los parámetros pueden hacerse críticos.

4.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN

López (1995), comparó los métodos de interpolación para estimar la precipitación en el estado de Veracruz, propone que los métodos de interpolación se pueden agrupar en forma general en dos grandes grupos: simples y sofisticados.

En el primer grupo se engloban los métodos para el cálculo de parámetros climáticos, dentro de estos se encuentran el método de la estación más cercana, donde el valor estimado para cualquier punto dado es el valor observado en la estación más próxima. Esto representa el esquema de interpolación más simple posible y es el principio del método de Thiessen y es ampliamente utilizado para estimar la precipitación promedio. Otro método de este grupo es la media aritmética donde se hace la suposición que la intensidad de la precipitación es teóricamente constante sobre una región dada y se puede estimar utilizando el promedio de los valores observados dentro de esa región. Estas técnicas de interpolación no proporcionan una representación continua del proceso climático o hidrológico involucrado, por lo que también se denominan como métodos discretos de interpolación. Estos métodos requieren menor tiempo de procesamiento de computadora que el siguiente grupo de técnicas de interpolación.

En el segundo grupo de métodos sofisticados o isoyetales están: ajuste de superficies Spline, la denominada interpolación óptima, Kriging, interpolación basada en funciones ortogonales empíricas, etc. Estos métodos requieren mayor tiempo de computadora especialmente para cantidades grandes de datos puntuales y mallas grandes de puntos a interpolar.

Giltrap (1983) citado por Segundo (2006), afirma que el método más simple de predicción usa fronteras prelocalizadas, basadas en observaciones externas para delimitar unidades homogéneas. Las observaciones puntuales que se hacen, se extrapolan a toda el área considerada como homogénea. Este autor divide las técnicas de predicción en universales y locales.

Creutin y Obled (1982) citados por Segundo (2006), consideran que los métodos de interpolación son determinísticos o estadísticos. Dentro de los determinísticos son considerados los “splines” y se basan en la elección arbitraria de tipos de curvas y criterios de optimización del ajuste de los datos existentes. Dentro de los estadísticos, son considerados el “Kriging” y la “Interpolación Óptima de Gandin”, en éstos, las variables son consideradas como realizaciones de un proceso aleatorio bidimensional, y su optimización es concebida en términos de la minimización de las varianzas de estimación.

4.2.3. EL MÉTODO DEL INVERSO DE LA DISTANCIA

Este método proporciona el peso más grande (w_i) al punto más cercano y este disminuye a medida que aumenta la distancia, dependiendo de un Exponente (β). El peso de un punto utilizando este método se expresa en la ecuación (4.37):

$$w_i = \frac{\left(\frac{1}{d_{e,i}}\right)^\beta}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_{e,i}}\right)^\beta} \quad (4.37)$$

Donde:

N = Número total de sitios.

$d_{e,i}$ = Distancia entre el sitio a estimar **e** y el sitio **i**.

β = Exponente (Coeficiente de Potencia). Se recomienda $\beta=2$ y 3

4.2.4. EL MÉTODO DE KRIGING

Kriging es el método de cálculo de una variable regional en un punto, al interior de una superficie o dentro de un volumen usando un criterio de minimización de la estimación de la varianza. Es un método de interpolación exacto en el sentido que su estimación en un punto de control coincide con el valor observado. Kriging encaja una función matemática a un número especificado de puntos, o todos los puntos dentro de un radio especificado, determinando el valor de salida para cada posición. Kriging es un proceso de multipaso; esto incluye el análisis exploratorio estadístico de los datos, variograma del modelamiento, la creación de la superficie, y opcionalmente la exploración de una superficie de discrepancia.

Existen varios métodos de Kriging incluyendo: **ordinario y universal**. El método ordinario es el más usado de los métodos Kriging. De la misma forma, Kriging universal asume que hay una tendencia principal en los datos (por ejemplo, un viento predominante), y puede ser modelado por una función determinista, un polinomio. Este polinomio es restado de los puntos medidos originalmente, y la autocorrelación es una modelación de los errores arbitrarios. Una vez que el modelo es apto a los errores arbitrarios, antes de la fabricación de una predicción, el polinomio es añadido a las predicciones para darle resultados significativos. Kriging universal sólo debería ser usado cuando se sabe que hay una tendencia en los datos y se puede dar una justificación científica para describirlo.

El método geo-estadístico Kriging, describe la correlación tanto espacial como temporal que existe entre los valores de un atributo. Tradicionalmente se le ha utilizado en las llamadas geo-ciencias, sin embargo, sus principios se aplican cada vez más en una amplia variedad de campos científicos como pesqueras, ingeniería civil, procesamiento de imágenes, meteorología, minería, etc. En la estadística clásica, se manejan variables

independientes, donde se asume cero continuidad (correlación) entre los datos. La Geoestadística por su parte, asume lo contrario, señalando que los datos están correlacionados y que esta continuidad se puede medir para puntos, bloques o volúmenes.

4.2.4.1. La teoría de las variables regionalizadas

El término de “regionalizado” fue propuesto por G. Matheron en 1971 para describir un fenómeno que se distribuye en el espacio (y/o tiempo) con una cierta estructura. Una variable que caracteriza a un fenómeno de este tipo de denomina “variable regionalizada” (Delhomme, 1978).

Desde un punto de vista matemático, una variable regionalizada $Z(\mathbf{x})$, donde \mathbf{x} denota un punto en el espacio que puede variar de manera continua sobre un dominio D de dos o tres dimensiones, es el valor aleatorio que toma en el punto \mathbf{x} la característica Z del fenómeno estudiado (Cressie, 1987).

En cada punto \mathbf{x}_i , el valor observado de una cierta propiedad es considerado como el producto $Z(\mathbf{x}_i)$ de una variable aleatoria $Z(\mathbf{x}_i)$. EN los puntos \mathbf{x} donde no se tiene información los valores $Z(\mathbf{x})$ son desconocidos pero bien definidos, ya que pueden ser vistos como productos de la correspondiente variable aleatoria $Z(\mathbf{x})$.

Según Delfiner (1979) matemáticamente, la familia de las variable aleatorias $Z(\mathbf{x})$ se conoce como función aleatoria, y a la función $Z(\mathbf{x})$ se le llama una realización de la función aleatoria. Una función aleatoria tiene la misma relación con una de sus realizaciones, que una variable con un producto numérico (por ejemplo $x=34$).

Una función aleatoria se caracteriza por sus distribuciones dimensionales finitas, un ejemplo de esto pueden ser las distribuciones conjuntas de cualquier conjunto de variables $Z(\mathbf{x}_1), Z(\mathbf{x}_2), \dots, Z(\mathbf{x}_k)$, para todo k y todos los puntos $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_k$.

Para poder realizar inferencias estadísticas bajo estas condiciones se requiere de algunas hipótesis adicionales sobre la función aleatoria que reduzcan el número de parámetros de los cuales depende. Es importante seleccionar estas hipótesis para que con una cantidad mínima de ellas se pueda cubrir un rango de situaciones prácticas.

La hipótesis usual en la teoría de funciones aleatorias es la de estacionalidad: se dice que una función aleatoria presenta estacionalidad, si su función de densidad probabilística conjunta en k puntos arbitrarios, es invariante bajo la translación simultánea de estos puntos. La mayoría de las veces esta hipótesis se restringe a la estacionalidad débil de segundo orden, en la cual sólo los primeros dos momentos permanecen bajo la translación.

No obstante, en algunos casos la suposición de estacionalidad débil puede seguir siendo muy restrictiva, por lo que es conveniente asumir que solo los incrementos de la función son estacionarios en el sentido débil. A esto se le conoce como hipótesis intrínseca. Esta hipótesis supone que para cualquier vector h , el incremento $Z(x+h) - Z(x)$ tiene una esperanza de cero (expresión 2.38) y una varianza independiente del punto x (expresión 4.39).

$$E [Z(x) - Z(x + h)] = 0 \quad (4.38)$$

$$var [Z(x) - Z(x + h)] = 2\gamma(h) \quad (4.39)$$

La función $\gamma(h)$ es llamada semivariograma (Delfiner, 1979).

4.2.5. SEMIVARIOGRAMA

El semivariograma es el centro de la técnica de Kriging. Expresa la varianza como una función de la distancia. La función semivariograma se desarrolla a partir de la varianza de pares de sitios y de la distancia entre ellos. Para el caso isotrópico y sin fluctuación, el semivariograma para los valores se calcula se la siguiente manera:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^N [Z(X_i) - Z(X_{i+h})]^2}{2N} \quad (4.40)$$

Donde:

$Z(X_i)$ = Valor de la cota topografía en el punto i .

$Z(X_{i+h})$ = Valor de la cota topográfica en el sitio ubicado a la distancia h del punto i

N = Número total de puntos.

Esta expresión, es el estimador de la semivarianza más utilizado y fue propuesto por Matheron en 1963, el cual se basa en el método de los momentos y tiene la propiedad de ser insesgado (Cressie y Horton, 1987). El semivariograma se utiliza para describir la correlación espacial que existe entre las observaciones distribuidas sobre un dominio, o sea que en resumen se trata de la descripción numérica de la continuidad de una variable regionalizada (Román 1980).

Para estimar el variograma se define un número arbitrario de clases de distancias entre los puntos con el que se obtiene el promedio de ellos y las semivarianzas, con las que se traza un diagrama de dispersión de puntos en el eje X, se utilizan las distancias promedio y en el eje Y las semivarianzas. Este diagrama es el variograma. Cuando la semivarianza es infinita, el variograma tiende asintóticamente hacia un valor máximo igual a esta semivarianza, el cual cuando se alcanza se denomina sill (C_0+C_1 =varianza máxima) del variograma y la distancia a la cual el variograma alcanza su valor asintótico se denomina rango (C_2), figura 4.11. Estos dos valores sirven para definir teóricamente la forma del variograma.

4.2.5.1. Propiedades más importantes del variograma

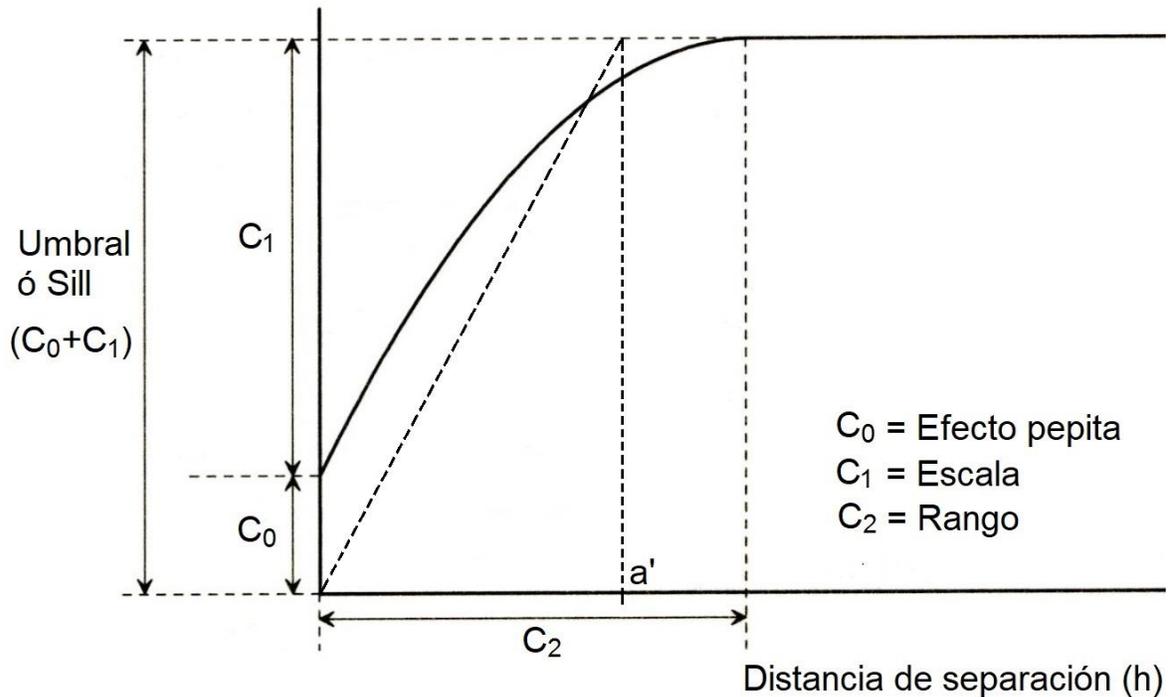


Figura 4.11. Esquema típico de un variograma teórico.

4.2.5.2. Comportamiento en el Infinito

a). Meseta, Umbral ó Sill (C_0+C_1).

Es el valor $\gamma(h)$ para el cual, con el aumento de (h) su valor permanece constante (Sill= C_0+C_1). Puede observarse trazando una línea paralela a la abscisa (h) y que se ajuste a los puntos de mayor valor del semivariograma y su valor se lee en la intersección de ésta línea con la ordenada $\gamma(h)$. Es un dato que indica que las diferencias de los valores observados son estacionales (hipótesis intrínseca).

El variograma puede incrementarse indefinidamente, pero también puede suceder que se estabilice alrededor de un valor límite llamado umbral, el cual es entonces igual a la **varianza de los datos** en el área de estudio (Delhomme, 1978). Una de las propiedades interesantes de los modelos con Sill, es que el valor de la Meseta es igual a la varianza ordinaria simple de los datos (Clark, 1979). De esta forma, si se tiene un conjunto de

observaciones o datos independientes, la varianza simple podrá calcularse con las ecuaciones (4.41 y 4.42):

$$S^2 = \frac{1}{NP - 1} \sum_{i=1}^{NP} [Z(X_i) - \bar{Z}(X_i)]^2 \quad (4.41)$$

$$\bar{Z}(X_i) = \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} Z(X_i) \quad (4.42)$$

Donde:

NP = Número de puntos levantados en campo.

S² = Varianza simple de los datos (Sill = S²).

b). Área de influencia de correlación, Alcance ó Rango (C₂).

La distancia (h) a la cual se alcanza el umbral se conoce como el rango, y se puede interpretar como la distancia más allá de la cual las observaciones no presentan ninguna correlación, por lo que podemos decir que es una medida del radio de influencia de las observaciones (Delfiner, 1979).

A ésta distancia (h), las variables Z(x) y Z(x+h) son independientes, es decir la distancia para la cual los valores de las variables dejan de estar correlacionadas, o lo que es lo mismo, la distancia para la cual el variograma alcanza su meseta.

Los modelos de variograma teórico utilizado en el proceso de estimación o simulación deben satisfacer ciertas condiciones, es decir tienen que ser "definido positivo" o de "tipo positivo". En general el ajuste de modelos teóricos al variograma empírico se realiza de forma visual.

4.2.5.3. Comportamiento cerca del origen

a). Forma Parabólica

Una tendencia parabólica cerca del origen caracteriza a una variable extremadamente regular diferenciable por convergencia del cuadrado medio (Delhomme, 1978).

c). Forma Lineal

Corresponde a una variable menos regular que el caso anterior, continua en convergencia de cuadrado medio, pero no diferenciable (Delhomme, 1978).

d). Discontinuidad en el origen (efecto de pepita, C_0)

Cuando un semivariograma presenta una cierta ordenada en el origen, se conoce como efecto de pepita (C_0) y se puede deber a la existencia de una microestructura, o sea que existe variabilidad espacial a distancias menores que el intervalo (h) mínimo utilizado en el análisis, o bien a errores en las observaciones (expresión 4.43 y 4.44). Corresponde a un fenómeno puramente aleatorio (ruido blanco), sin correlación entre las muestras, cualquiera sea la distancia que las separe. Existirán semivariogramas donde la tendencia que prevalezca sea sólo el efecto pepita:

$$\text{Para } h=0: \quad \gamma(h) = 0 \quad (4.43)$$

$$\text{Para } h>0: \quad \gamma(h) = C_1 \quad (4.44)$$

e). Anisotropía

Como el argumento h del semivariograma es un vector, éste puede ser calculado en distintas direcciones. Cuando el semivariograma no varía con la dirección se dice que es isotrópico, y por lo tanto la interpolación de valores se puede hacer directamente mediante un semivariograma general, obtenido a partir de las diferencias de todos los pares de puntos independientemente del ángulo entre los mismos. El Hecho de que cada dirección tenga su propio semivariograma significa que el radio de influencia cambia en las distintas direcciones, y se dice entonces que existe anisotropía (Mc Bratney y Webster, 1986).

Existen distintos tipos de anisotropía, pero debido a su grado de complejidad, la más fácil de estudiar es la, ***anisotropía elíptica o geométrica***, la cual es por definición aquella que puede corregirse mediante una simple transformación de coordenadas. En el caso de la anisotropía elíptica la zona e influencia de una muestra no es un círculo sino una

elipse, pero mediante una transformación de coordenadas es posible transformar dicha elipse en un círculo restaurando así la isotropía (Delfiner, 1979).

Lo anterior es posible si los ejes principales de la elipse coinciden con los ejes coordenados, ya que en éste caso se tiene que si γ_1 de la ecuación anterior del semivariograma, la semivarianza corregida se calculará mediante la expresión (4.45 y 4.46):

$$\gamma_c = \gamma_1[(x_1 - x_2)^2 + k^2(y_1 - y_2)^2] \quad (4.45)$$

Donde:

k = Radio de anisotropía

$$k = \frac{\text{Radio Mayor de la elipse}}{\text{radio menor de la elipse}} \quad (4.46)$$

En el caso de que los ejes de la elipse no coincidan con los ejes coordenados la fórmula se vuelve un poco más complicada (expresiones 4.47 y 4.48), ya que se debe de considerar en ella el ángulo φ entre el eje de las x's y el eje principal de la elipse.

$$\gamma_c(h) = \gamma_1(fc)^{1/2} \quad (4.47)$$

Donde:

$$fc = [(x_1 - x_2) \cos(\varphi) + (y_1 - y_2) \sin(\varphi)]^2 + k^2[((y_1 - y_2) \cos(\varphi) - (x_1 - x_2) \sin(\varphi))]^2 \quad (4.48)$$

Existen **otras características** que muestran alguno semivariogramas y deben considerarse a la hora de la interpretación de los mismos, entre las cuales destacan las señaladas por Delfiner (1979):

f). Estructuras anidadas

La presencia de estructuras anidadas en un semivariograma indica superposición de diferentes escalas de variación.

g). Periodicidad

Aunque los fenómenos tienden a presentar cierta periodicidad en el tiempo, la periodicidad espacial es muy rara, pero en caso de que esta sea evidente, lo más recomendable es utilizar métodos basados en las series de Fourier.

h). Efecto de agujero

La presencia de caídas bruscas en el semivariograma denota una tendencia a tener áreas con valores muy altos junto a otras con valores bajos o agujeros.

4.2.5.4. Ajuste del semivariograma

Una vez obtenido el semivariograma experimental, la etapa siguiente es ajustarlo a un modelo teórico (variograma teórico) que reúna ciertas condiciones de consistencia matemática (Ramírez, 1980). La condición principal que debe de satisfacer una función para que pueda utilizarse en el ajuste de semivariograma teórico es la de ser positiva-definida con el fin de que no genera varianzas negativas (Brathey y Webster, 1986).

De esta manera, el siguiente paso consiste en seleccionar una función teórica adecuada a la distribución de los puntos y ajustar los parámetros de esa función a los puntos observados.

Hay más puntos a distancias cortas que a distancias grandes. El variograma se vuelve más incierto a medida que la distancia (h) se incrementa a distancias grandes ciertos puntos pueden tener un papel privilegiado e introducir errores en la estimación.

En la generación del modelo del variograma, habrá que tomar en cuentas los siguientes dos aspectos: su comportamiento en el origen, el cual puede ser lineal, parabólico y con efecto de pepita; y la presencia o ausencia de meseta. Los modelos más comunes son:

A. Modelo Esférico: Este modelo es una expresión polinomial simple; se puede observar un crecimiento casi lineal y después a cierta distancia finita del origen se alcanza una estabilización, la Meseta o Sill. La tangente en el origen encuentra a la Meseta en el punto de abscisa $a' = (2/3) C_2$, donde a representa el valor del rango o alcance. El modelo esférico es uno de los más utilizados debido a que sus parámetros son fáciles de interpretar ya que refleja las características más importantes del semivariograma que son el Efecto Pepita (C_0), el Rango (C_2) y el Umbral (C_0+C_1).

B. Modelo Exponencial: Este modelo a diferencia del esférico crece inicialmente más rápido y después se estabiliza de forma asintótica. Como la Meseta no se alcanza a una distancia finita, se usa con fines prácticos el "alcance efectivo" o "alcance práctico" (a'), valor que se obtiene en el punto de abscisa para el cual el modelo obtiene el 95% de la Meseta, con un valor $a' = 3C_2$. La tangente en el origen encuentra a la meseta en el punto $C_2 = (1/3) a'$.

C. Modelo Gaussiano: Este es un modelo extremadamente continuo, inicialmente presenta un comportamiento parabólico en el origen, después al igual que en el modelo Exponencial se alcanza la meseta de forma asintótica. El alcance práctico tiene un valor de $a' = \sqrt{3} C_2$, que es el valor de la abscisa donde se alcanza el 95% de la Meseta.

D. Modelo con función potencia: Este es un modelo sin Meseta, para valores de C_2 mayores de 0 y menores de 2.0. Para el valor de $C_2=1$, se obtiene el modelo Lineal, al cual no tiene ni Meseta ni Alcance. Muchos programas informáticos denotan la pendiente del modelo lineal con la relación C_1/C_2 .

Estos modelos pueden ser ajustados individualmente, aunque es posible encontrar en la práctica aplicaciones donde a los semivariogramas experimentales se les debe ajustar más de un modelo teórico, es decir, a través de superposición nombrándose estructuras

imbricadas (Krajewski y Gibbs, 1993), (Journel y Huijbregts, 1978) o modelos anidados (Clark, 1979).

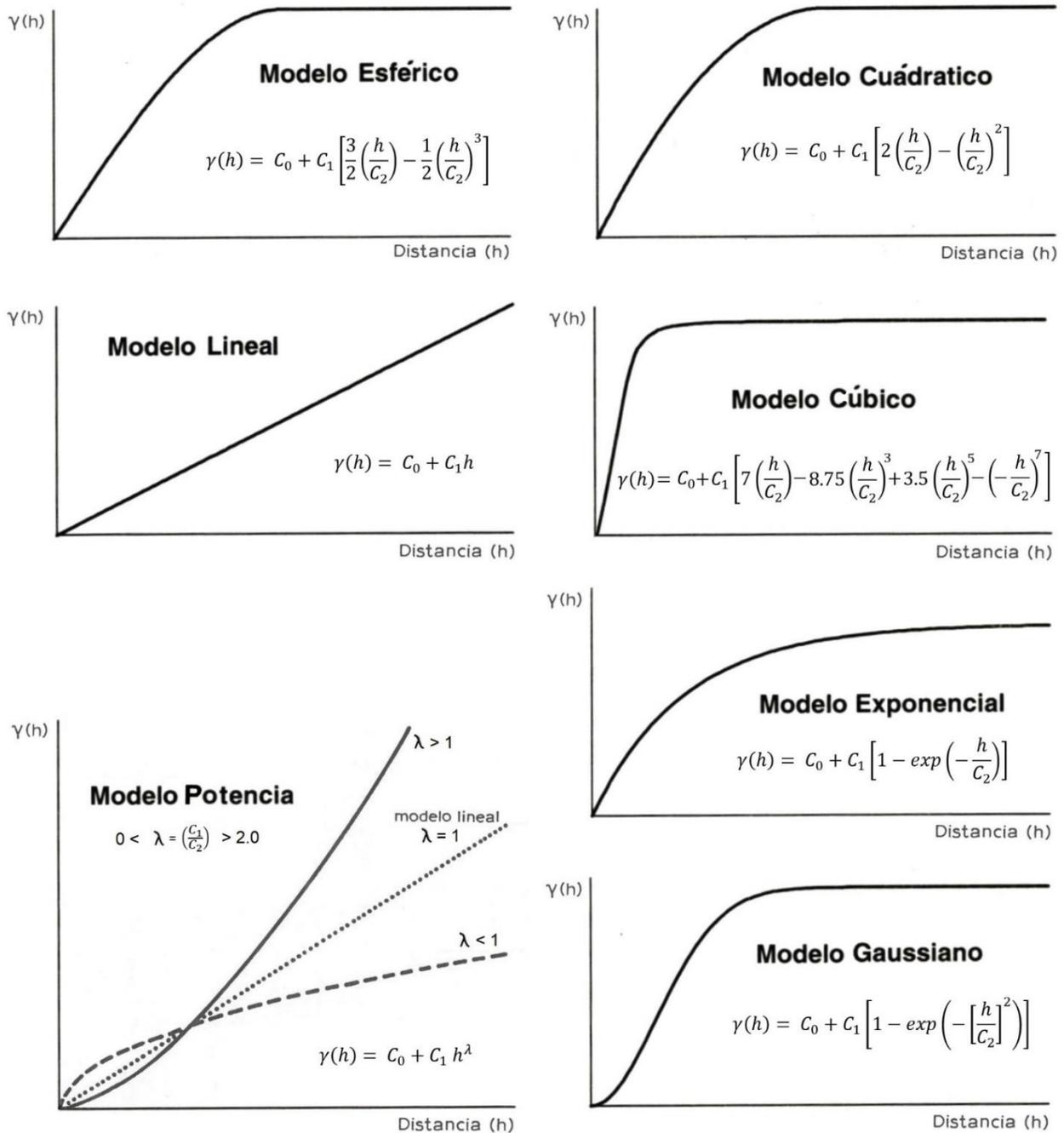


Figura 4.12. Tipos de variogramas teóricos para el ajuste (saliendo del origen).

Cuadro 4.2. Abscisa (a') donde se interseca la recta tangente del origen con el Sill (Clark, 1979 y Delhome, 1978).

Modelo	Abscisa (a') donde se interseca la tangente en el origen con el Sill (C₀+C₁)
Cuadrático	$(2/3) C_2$
Esférico	$(2/3) C_2$
Exponencial	$3 C_2$
Gaussiano	$\sqrt{3} C_2$

Las funciones matemáticas de los modelos para ajustar al variograma se muestran en las expresiones (4.49) al (4.55):

Lineal:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 h \quad (4.49)$$

Potencia:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 h^\lambda \quad (4.50)$$

Para un rango: $0 < \lambda = \left(\frac{C_1}{C_2}\right) < 2.0$

Esférico:

Cuando $0 < h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{C_2}\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{C_2}\right)^3 \right] \quad (4.51)$$

Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{C_2}\right) \right] \quad (4.52)$$

Gausiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\left[\frac{h}{C_2}\right]^2\right)\right] \quad (4.53)$$

Cúbico:

Cuando $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[7\left(\frac{h}{C_2}\right) - 8.75\left(\frac{h}{C_2}\right)^3 + 3.5\left(\frac{h}{C_2}\right)^5 - \left(-\frac{h}{C_2}\right)^7 \right] \quad (4.54)$$

Cuadrático:

Cuando $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[2\left(\frac{h}{C_2}\right) - \left(\frac{h}{C_2}\right)^2 \right] \quad (4.55)$$

Los modelos esférico, cúbico y cuadrático tendrán presentan una meseta *cuando $h > C_2$* que puede calcularse con la expresión (4.56).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad (4.56)$$

Donde:

C_1 = Valor Sill, Umbral ó varianza máxima del variograma.

C_2 = Longitud ó Rango del variograma.

C_0 = Efecto Pepita (Término ó función de fluctuación para cuando para $h=0$, y la ordenada al origen no vale cero).

No existe una metodología general para la estimación de los parámetros del modelo, por lo que ésta tarea es subjetiva (Ramírez, 1980). Algunos autores señalan que éste ajuste puede realizarse por prueba y error auxiliándose de un sistema informático de dibujo por computadora. La ordenada al origen o Efecto Pepita, puede estimarse mediante la extrapolación al origen de la tendencia mostrada por los tres primeros puntos del semivariograma experimental, y el rango mediante un simple análisis visual del mismo.

4.2.5.5. El método de Kriging.

Delhomme 1978, comenta que el método de Kriging es uno de los métodos más sofisticados y más completos ya que toma en cuenta la distancia entre el punto a estimar y los puntos a partir de los cuales se hará la estimación (observaciones), la distancia entre las observaciones y la estructura espacial de la variable en estudio (a partir del semivariograma).

La función de fluctuación es una expresión de una tendencia de escala grande si el campo de la variable aleatorio no es estacionario. Esta función sirve para diferenciar distintas versiones del método Kriging, generalmente el método Kriging se subdivide en universal y ordinario. Para el Kriging ordinario, la función de fluctuación es una constante (sin fluctuación), generalmente en el Kriging Universal, la función de fluctuación es un polinomio de un grado inferior a tres.

El método de Kriging se desarrolla a partir de las siguientes consideraciones:

El estimador es insesgado, es decir, satisface la expresión (4.57):

$$E[Z^* - Z] = 0 \quad (4.57)$$

La varianza de la estimación es mínima, o sea que se cumple la condición (4.58):

$$E[Z^* - Z]^2 = \text{mínima} \quad (4.58)$$

Donde:

E = Esperanza matemática

Z^* = Valor Estimado

Z = Valor observado

Habrà que observar según ecuación (4.35), que el estimador Kriging deberá cumplir la condición (4.36):

$$E[Z^* - Z] = 0 = E[Z^*] - E[Z] \quad (4.59)$$

Sustituyendo la expresión (4.35) en el desarrollo anterior (4.59), se tiene que:

$$E \left[\sum_{i=1}^n W_i Z(x_i) \right] - E[Z] = \sum_{i=1}^n W_i E[Z(x_i)] - E[Z] \quad (4.60)$$

y como:

$$E[Z] = E[Z(x_i)] = M \quad (4.61)$$

Donde:

M = Media de la población

Entonces:

$$M \left[\sum_{i=1}^n W_i \right] - M = 0 \quad (4.61b)$$

Para que se dé esta igualdad, será necesario que cumpla la condición (4.36) y la suma de los pesos w_i debe ser igual a 1. Los coeficientes w_i no tienen que ser todos positivos, y por lo tanto pueden ser mayores de 1, lo cual significa que los valores estimados pueden ser mayores que $Z(x_i)$ máximo o bien menores que el $Z(x_i)$ mínimo.

Cuando la variable estudiada presenta incrementos sistemáticos a lo largo de ciertas direcciones, se dice que existe una deriva y por lo tanto no podemos asumir que se cumple la condición (4.62):

$$E[Z(x_i)] = \text{Constante} \quad (4.62)$$

Para los casos como el anterior se desarrolló un método de interpolación denominado Kriging Universal, el cual asume que la deriva puede ser ajustada a un modelo polinomial (Ramírez, 1980).

La principal ventaja que presenta el método de interpolación espacial de Kriging, es que además de obtener estimadores lineales insesgados (Skrivan y Karlinger, 1980) y con varianza mínima, se puede saber también la varianza de la estimación en cada punto interpolado, lo cual permite tener más elementos para la interpretación de datos, así como, detectar zonas con una elevada varianza de estimación, en las cuales sería recomendable tomar un mayor número de muestras.

Una vez **obtenido de semivariograma experimental y ajustado el modelo teórico**, el paso siguiente es la obtención de los Pesos o Coeficientes de Ponderación (w_i). Se debe construir un sistema de ecuaciones simultáneas que se resuelven calculando la inversa de la matriz de pesos, para estimar el valor y la varianza para cada punto de interés. El sistema de ecuaciones se muestra en la expresión (4.63 y 4.64).

$$Pw = b \quad (4.63)$$

$$P \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad w = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.64)$$

Donde:

P = Es una matriz cuadrada de orden $n \times n$.

w y b = Son los vectores de orden $n \times 1$.

Los elementos en P se derivan de un semivariograma ajustado a alguna de las funciones descritas (4.49 a 4.55), en el cual se incluye un valor o función de fluctuación C_0 , específicamente determinado o desarrollado para la configuración dada de los sitios. El vector w consta de los pesos desconocidos para cada sitio i , y para cada monomio en la función de fluctuación C_0 . Si n es el número de sitios involucrados en el Kígring, y m es el número de monomios en la función de fluctuación, entonces la matriz es de orden $n \times m$. Los elementos en el vector b especifican las varianzas esperadas del punto a interpolar usando Kriging con respecto a las estaciones y los valores para cada monomio en el punto hacer interpolado. El vector b cambia para cada punto de la estimación mientras P permanece constante para un conjunto dados de sitios.

El vector de pesos se obtiene resolviendo la expresión (4.65), con lo cual se obtendrán las ponderaciones w_i y el multiplicador de Lagrange (λ).

$$w = P^{-1}b \quad (4.65)$$

Después que el vector \mathbf{w} es resuelto, el valor estimado Z^* para el punto \mathbf{e} se calcula mediante la expresión (4.35), cuidando que se cumpla la condición (4.36).

La desviación estándar (σ) de la estimación se calcula mediante la expresión (4.66):

$$\sigma_k = \left[\sum_{i=1}^n w_i b_i + \lambda \right]^{0.5} \quad (4.66)$$

Y la varianza (γ) de la estimación se podrá calcular con la ecuación (4.67):

$$\gamma_k^2 = \gamma_0^2 - \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) + \lambda \quad (4.67)$$

Donde:

$w_i =$ El ***i-ésimo*** elemento de \mathbf{w} ;

$b_i =$ La semivarianza entre el sitio medidor i y el punto a interpolar \mathbf{e} , derivado del semivariograma ajustado;

$\lambda =$ Multiplicador de la Lagrange, cuyo valor se obtiene al resolver el sistema de ecuaciones $\mathbf{Pw} = \mathbf{b}$;

Cuando el $\sigma_i=0$ el Kriging es un estimador exacto. Más aún para el caso isotrópico, sin fluctuación.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describen los materiales usados para el desarrollo del proyecto TERRA, así como la metodología propuesta y el algoritmo utilizado para elaborar un proyecto de nivelación de tierras.

5.1. MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DE TERRA 1.0

Para el desarrollo de TERRA 1.0 se utilizaron los siguientes materiales:

- Una computadora a 64 bits, marca HP con procesador CORE i7 a 2.8 GHz de velocidad, con memoria RAM DDR3 de 8 GB, 1066 MHz, Disco Duro de 512 GB, unidad de DVR, puerto USB, sistema operativo Windows 7
- Lenguaje de programación Delphi (Version usada: Borland Delphi 7.0 Enterprise).
- Microsoft Office (Word, Excel, Power Point), para la escritura del documento de investigación.
- AutoCAD para la elaboración de dibujos y esquemas
- Paint para la edición de imágenes
- Nitro Pro, para creación de archivos PDF
- Una Impresora HP LaserJet, para las pruebas de impresión y para la impresión final del documento de investigación.
- Papel bond tamaño carta (210mm x 280mm).
- Requerimiento Mínimo:** PC con CORE i3 o superior con velocidad mínimo de 1.0 GHz de velocidad, Disco Duro de espacio libre mínimo de 20 MB, puerto USB, sistema operativo Windows XP o superior.

5.2. METODOLOGÍA

Se desarrolló una metodología para elaborar un proyecto de nivelación de tierras a partir de un levantamiento topográfico por radiaciones (distribución variable) o un levantamiento por cuadrícula (distribución regular), cuyos procesos se pueden ver en la figura 5.1.

Se puede dividir el terreno en cuadros para su nivelación en forma independiente cuando la topografía lo permite. El plano proyecto se construye por Mínimos Cuadrados y se obtiene al resolver un sistema de ecuaciones generado con los datos de campo mediante una solución matricial, siendo indistinta la forma en que se realizó el levantamiento topográfico.

Se construye un Modelo Digital de Elevaciones en cuadrícula con los datos de campo, usando un método de interpolación espacial para la estimación de la cota (z^*) en cada nodo y el método de Kriging para la estimación de los pesos. Se determinan volúmenes de corte y relleno para cuantificar el movimiento de tierras, con el método de los cuatro vértices, construyendo una nueva cuadrícula con una "Longitud" definida por el proyectista (*Lcuadrícula_datos*) a partir del Modelo Digital de Elevaciones. El cálculo del Variograma de Kriging puede usar cualquiera de los siguientes modelos: Lineal, Cuadrático, Cúbico, Esférico, Exponencial o Gaussiano.

Se elabora un plano de isolíneas del terreno natural (configuración antes de la nivelación) usando los datos levantados en campo y con una cuadrícula más fina con longitudes entre nodos más pequeña obtenida a partir del modelo digital de elevaciones. Los límites de la cuadrícula se extienden para cubrir perfectamente la poligonal del terreno y evitar áreas sin curvas. Se elabora un plano de isolíneas del terreno nivelado (configuración después de la nivelación), usando una cuadrícula cuya cota (z) se estima utilizando la ecuación final del plano proyecto.

La metodología desarrollada para la conformación de las rutinas que componen a TERRA 1.0, se describe brevemente en el diagrama de bloques del sistema mostrado en la Figura 5.1 y 5.2.

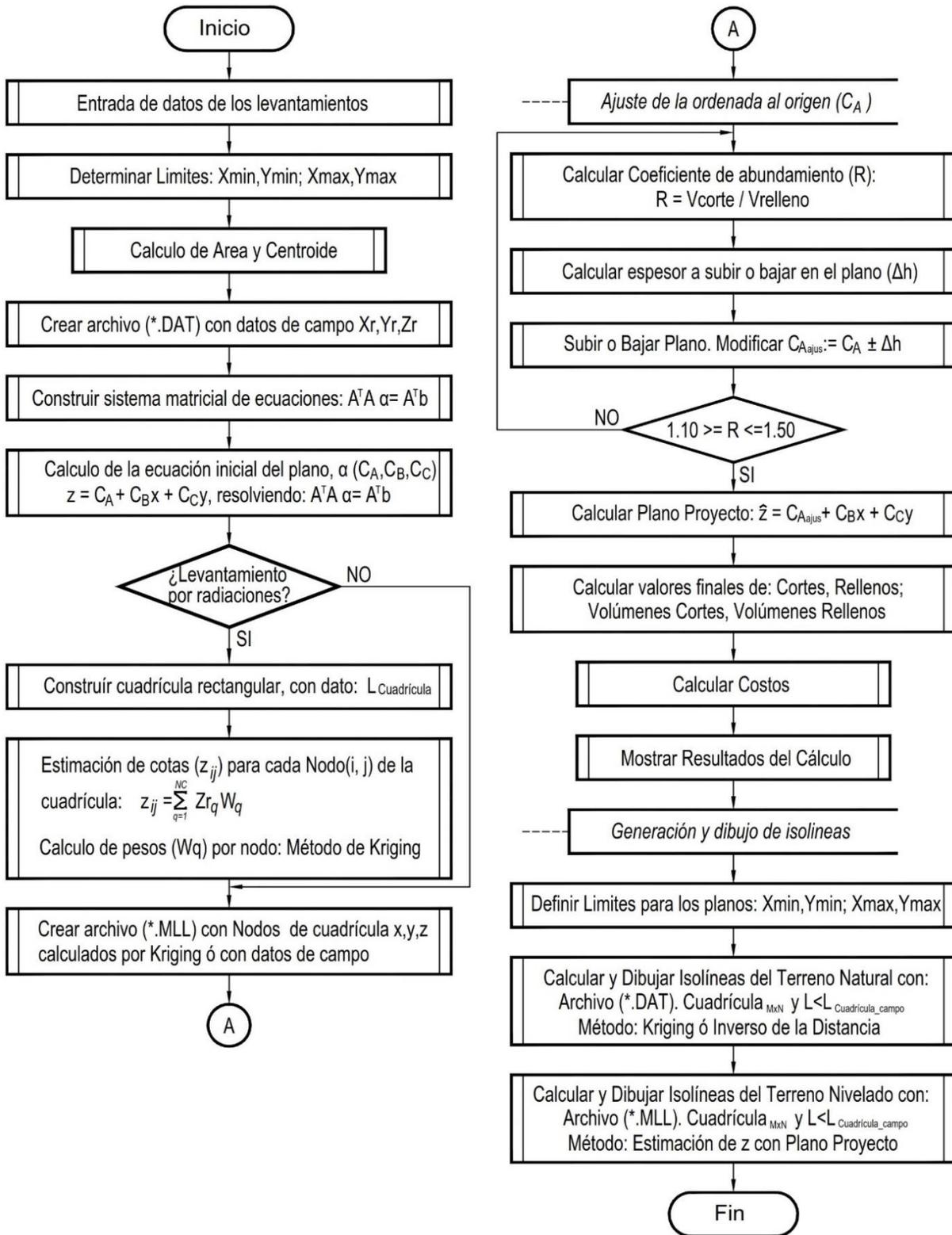


Figura 5.1. Algoritmo de nivelación, implementado en Terra para calcular el plano proyecto, sin divisiones.

5.2.1. ALGORITMO DEL PROGRAMA TERRA V1.0

A continuación se describe el algoritmo usado en el programa TERRA versión 1.0. La figura 5.1 muestra los pasos que se siguieron para llevar a cabo un proyecto de nivelación de tierras considerando un solo cuadro, es decir considerando que para todo el terreno se tendrán dos pendientes: una longitudinal y otra transversal. En la figura 5.2 se observa las opciones más importantes implementadas en el programa para satisfacer el algoritmo de la figura 5.1.



Figura 5.2. Diagrama de bloques general del Sistema TERRA 1.0

5.2.1.1. Definición de los datos de entrada

Los procesos de cálculo del usan tres tipos de datos simples o compuestos para capturar la información y hacer posible el desarrollo del algoritmo: datos de tipo **cadena** usados para almacenar textos de nombres o descripción de algún proceso, datos numéricos **reales** para almacenar valores en punto flotante y realizar las operaciones correspondientes, datos numéricos **enteros** para almacenar valores secuenciales que se

usarán como contadores básicamente. Los datos de entrada para poder realizar el proyecto de nivelación, se muestran en las siguientes secciones.

5.2.1.2. Datos del proyecto y del diseño

a. Datos generales del proyecto:

- ❖ Identificación del lote : *Cadena*
- ❖ Número de lote : *Cadena*
- ❖ Observaciones o notas : *Cadena*

b. Parámetro del Diseño:

- ❖ Coeficiente de Compactacion (Adim) : *ValorReal*
- ❖ Corte Permisible (m) : *ValorReal*
- ❖ Pendiente en X (%) : *ValorReal*
- ❖ Pendiente en Y (%) : *ValorReal*

c. Costo del movimiento de tierras:

- ❖ Costo (\$/m³) : *ValorReal*

5.2.1.3. Definición de los datos del levantamiento topográfico

Dependiendo del tipo de levantamiento topográfico realizado se obtuvieron coordenadas de campo para cada punto medido, ya sea en **cuadrícula rectangular** usando la propuesta de Marr (1957), en cuyo caso ya son coordenadas (x_i, y_j, z_{ij}) , donde $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$; n =número de hileras y m = número de columnas de la cuadrícula; ó **radiaciones**, en cuyo caso son coordenadas (X_{rk}, Y_{rk}, Z_{rk}) , donde $k=1, 2, \dots, P$ y P = número de puntos levantados por radiaciones. Las cuales se introducirán el cuadro de diálogo del programa, activando la opción de captura correspondiente según el levantamiento realizado.

a. Datos para el levantamiento topográfico por cuadrícula:

- ❖ No. de Renglones (y_i) : ValorEntero
- ❖ No. De Columnas (x_i): ValorEntero
- ❖ Longitud de la Cuadrícula ($L_{Cuadrícula}$) : ValorReal

		C O L U M N A S											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	50
R E N G L O N E S	1	Z _{1,1}	Z _{1,2}	Z _{1,3}	Z _{1,4}	Z _{1,5}	Z _{1,6}	Z _{1,7}	Z _{1,8}	Z _{1,9}	Z _{1,10}		Z _{1,50}
	2	Z _{2,1}	Z _{2,2}										
	3	Z _{3,1}		Z _{3,3}									
	4	Z _{4,1}			Z _{4,4}								
	5	Z _{5,1}				Z _{5,5}							
	6	Z _{6,1}					Z _{6,6}						
	7	Z _{7,1}						Z _{7,7}					
	8	Z _{8,1}							Z _{8,8}				
	9	Z _{9,1}								Z _{9,9}			
	10	Z _{10,1}									Z _{10,10}		
	
	50	Z _{50,1}											Z _{50,50}

b. Datos para el levantamiento topográfico por Radiaciones:

- ❖ No. de Renglones (k) : ValorEntero
- ❖ Longitud de la Cuadrícula ($L_{Cuadrícula}$) : ValorReal

		No	1	2	3
R E N G L O N E S	1		X ₁	Y ₁	Z ₁
	2		X ₂	Y ₂	Z ₂
	3		X ₃	Y ₃	Z ₃
	4		X ₄	Y ₄	Z ₄
	5		X ₅	Y ₅	Z ₅
	...				
	1500		X ₁₅₀₀	Y ₁₅₀₀	Z ₁₅₀₀

5.2.1.4. Definición de los datos de la poligonal y del terreno

Se deben proporcionar las coordenadas de cada uno de los vértices de la poligonal del terreno con sus respectivas coordenadas (X_v, Y_v) , donde $v=1, 2, \dots, NV$ y $NV =$ número de vértices de la poligonal del terreno.

Para una poligonal de n vértices cuyas coordenadas (X_v, Y_v) se conocen, las *coordenadas de los vértices del terreno* se introducirán de la siguiente manera.

VERTICE	X	Y
A	X_1	Y_1
B	X_2	Y_2
C	X_3	Y_3
D	X_4	Y_4
E	X_5	Y_5
F	X_6	Y_6
G	X_7	Y_7
...
GF	X_n	Y_n

5.2.2. LÍMITES DE TRABAJO, ÁREA Y CENTROIDE

Con la información de los puntos de campo capturada, se determinan los límites extremos de una zona rectangular para el trabajo del proyecto de nivelación, definida por (X_{min}, Y_{min}) en la esquina inferior izquierda y $(X_{máx}, Y_{máx})$ en la esquina superior derecha. Para el caso de un levantamiento por radiaciones se crean los nodos de una cuadrícula de dimensiones $m \times n$ en la zona rectangular definida, con una distancia entre nodos ($L_{cuadrícula}$), así para cada nodo se tiene información (x_i, y_j) , faltando estimar z_{ij} .

Con las coordenadas de los vértices de la poligonal se calcula el área y el centroide del terreno (x_c, y_c, z_c) .

5.2.2.1. Cálculo del Área

El área se determinó con la expresión (5.1).

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{N-1} \{ [x_{(i)} * y_{(i+1)}] - [x_{(i+1)} * y_{(i)}] \} \right| \quad (5.1)$$

Sin embargo, podría ser calculada también con la expresión (5.2), propuesta por Pérez y Hernández (1996). Las coordenadas $x_{(i)}$, $y_{(i)}$ deberán ser introducidas en el sentido horario.

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{ y_i [x_{(i+1)} - x_{(i-1)}] \} \quad (5.2)$$

$$x_{(0)} = x_{(N)}; \quad y_{(0)} = y_{(N)}$$

$$x_{(N+1)} = x_{(1)}; \quad y_{(N+1)} = y_{(1)}$$

Donde:

A = Área del polígono en m².

N = Número de vértices del polígono.

x, y = Coordenadas de los vértices del polígono.

5.2.2.2. Cálculo del Centroide (C_x, C_y)

Existen varias formas para calcular el centroide, dentro de las cuales se pueden mencionar: la división del polígono en figuras geométricas, donde sea fácil estimar el centroide como es el caso de los triángulos; el uso de momentos de inercia, etc. En el presente trabajo se optó por usar dos ecuaciones que determinan el centroide, la expresión (5.3) para la coordenada **x** y la expresión (5.4) para la coordenada **y**.

$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^{N-1} [X_i + X_{i+1}] [(X_i * Y_{i+1}) - (X_{i+1} * Y_i)] \quad (5.3)$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^{N-1} [Y_i + Y_{i+1}] [(X_i * Y_{i+1}) - (X_{i+1} * Y_i)] \quad (5.4)$$

Donde:

A = Área del polígono en m².

N = Número de vértices del polígono.

La parte de código del programa que realiza el cálculo del área y centroide, se puede ver en el anexo D.1.

5.2.3. CÁLCULO DE LA ECUACIÓN INICIAL DEL PLANO PROYECTO

En esta sección se presentan los pasos realizados para la obtención de la ecuación inicial del plano proyecto, calculando pendientes en el sentido longitudinal, transversal y ordenada al origen del plano.

5.2.3.1. Organización de los Datos de Campo

Los datos de campo se deberán depurar y organizar de tal forma que se tengan las coordenadas en el siguiente formato, para que sea posible el cálculo de la ecuación del plano proyecto:

X	Y	Z
X ₁	Y ₁	Z ₁
X ₂	Y ₂	Z ₂
X ₃	Y ₃	Z ₃
X ₄	Y ₄	Z ₄
X ₅	Y ₅	Z ₅
X ₆	Y ₆	Z ₆
X ₇	Y ₇	Z ₇
X ₈	Y ₈	Z ₈
X ₉	Y ₉	Z ₉
X ₁₀	Y ₁₀	Z ₁₀
X _N	Y _N	Z _N

La lista de coordenadas corresponde a cada uno de los puntos levantados en campo ya sea por el método de la cuadrícula o por el método de radiaciones. Para el primer caso (cuadrícula) se deberán calcular las coordenadas de cada vértice referidas al punto de origen definido por el usuario. Una vez que las coordenadas se tienen en este formato, será posible pasar al siguiente paso: la determinación de la ecuación del plano.

El código que organiza las coordenadas se puede ver en el anexo D.2.

5.2.3.2. Cálculo de la ecuación inicial del plano $Z=C_A+C_Bx+C_Cy$

El cálculo de la ecuación del plano (expresión 4.1) se realiza por Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) mediante una solución matricial como la propuesta por Montgomery y Runger (2008), en la cual es indistinta la forma en que se realizó el levantamiento topográfico, la ecuación del plano proyecto inicial expresada para cada nodo de la cuadrícula se puede expresar por (5.5).

$$\hat{z}_{ij} = C_A + C_B x_i + C_C y_j \quad (5.5)$$

Donde: \hat{z}_{ij} = Cota estimada del plano proyecto en un punto de coordenadas (x_i, y_j) , en m; C_A = Constante que geoméricamente representa la cota del plano proyecto, en el origen del sistema de coordenadas, en m; C_B = Pendiente promedio del terreno en el sentido del eje X, en dec; C_C = Pendiente promedio del terreno en el sentido del Y, en dec; x_i = Coordenada X de la hilera i, en m; y_j = Coordenada Y de la columna j, en m; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $j = 1, 2, 3, \dots, m$; n = Número de hileras; m = Número de columnas.

Utilizando la expresión señalada por Guajarati y Porter (2010), donde proponen calcular los coeficientes de un plano, si se cumple la condición descrita en la ecuación (5.6):

$$(A^T A) \hat{\beta} = A^T b \quad (5.6)$$

Donde: \mathbf{A} = Matriz de coordenadas XY; \mathbf{A}^T = Transpuesta de la Matriz de coordenadas XY;
 \mathbf{b} = Vector de coordenadas Z; $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ = Vector de incógnitas o Coeficientes (\mathbf{C}_A , \mathbf{C}_B , \mathbf{C}_C).

De la ecuación (5.6) se despeja el vector de incógnitas o vector de coeficientes ($\hat{\boldsymbol{\beta}}$) para obtener los valores de las pendientes del plano (\mathbf{C}_B y \mathbf{C}_C) y la ordenada al origen (\mathbf{C}_A). Para lograr esto se multiplica (5.6) por la inversa de la multiplicación ($\mathbf{A}^T \mathbf{A}$) por ambos lados (expresión 5.7 y 5.8).

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{b}) \quad (5.7)$$

$$\mathbf{I} \hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{b}) \quad (5.8)$$

Los detalles de las operaciones realizadas se pueden ver en las expresiones (5.9) a (5.13).

a.1. Matriz(3x3), obtenida de multiplicar ($\mathbf{A}^T \mathbf{A}$), expresión (5.9).

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} \\ X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & \dots & Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & X_1 & Y_1 \\ \mathbf{1} & X_2 & Y_1 \\ \mathbf{1} & X_3 & Y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{1} & X_n & Y_n \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

a.2. Vector(3x1), obtenido de multiplicar: ($\mathbf{A}^T \mathbf{b}$), expresión (5.10)

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{b}) = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} \\ X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_n \\ Y_1 & Y_2 & Y_3 & \dots & Y_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

a.3. Inversa ($\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$, para el cálculo de la Matriz identidad, expresión (5.11)

$$\mathbf{I} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \quad (5.11)$$

a.4. Vector Solución ($\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \times (\mathbf{A}^T \mathbf{b})$, expresión (5.12) y (5.13).

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{b}) \quad (5.12)$$

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_A \\ C_B \\ C_C \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

La parte de código de programa que realiza este proceso se puede ver en el Anexo D.4.

5.2.4. CÁLCULO DE LA CUADRÍCULA HOMOGÉNEA

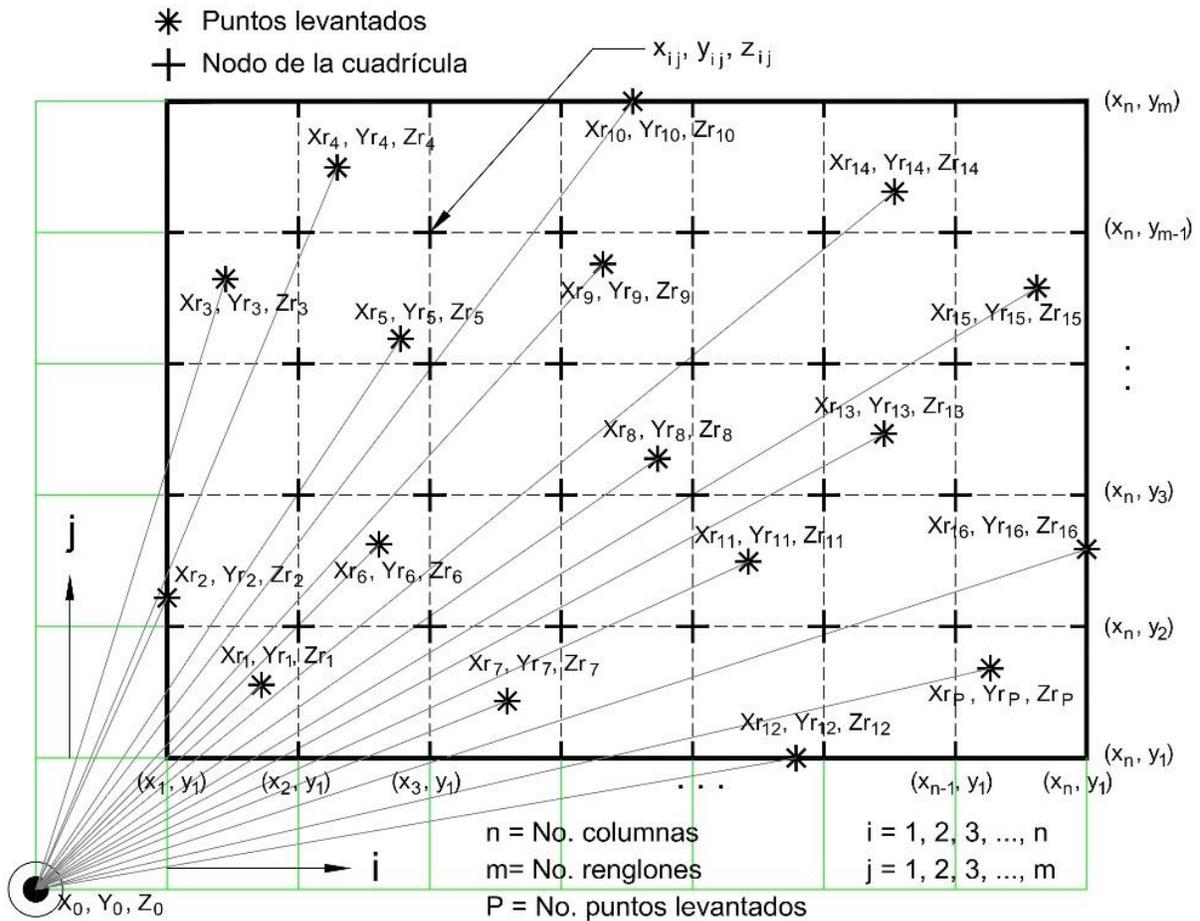


Figura 5.3. Generación de la homogénea, a partir cuadrícula de un levantamiento topográfico por radiaciones.

Si el levantamiento fue mediante cuadrícula, ésta ya fue trazada en campo al hacer el levantamiento topográfico; pero si fue por radiaciones, la cuadrícula se crea a partir de los límites calculados previamente y con una equidistancia regular de la cuadrícula asignada

para el cálculo de tamaño $L_{\text{cuadrícula}}$ (m), que puede ser la misma de la cuadrícula regular u otra según sea el caso. Con esto se definen el número de nodos en X y en Y, (Figura 5.3). Los problemas que se detectaron en este punto se dan por tener terrenos muy cortos donde solo pueda definirse una línea, y por tanto, no se alcance a generar ningún cuadro, la solución más práctica es redefinir un valor más pequeño de la $L_{\text{cuadrícula}}$.

Con la información anterior, es posible determinar la localización (x_i, y_j) de cada nodo dentro de la cuadrícula.

5.2.5. DETERMINACIÓN DE LAS COORDENADAS z_{ij}

En cada nodo (i, j) de la cuadrícula se determinan los valores de z_{ij} a través un proceso geoestadístico de interpolación espacial, partiendo de la información levantada en campo (X_{rk}, Y_{rk}, Z_{rk}) de los datos de campo definidos como puntos vecinos al nodo (i, j) . La definición de puntos vecinos se realiza calculando la distancia de cada nodo (i, j) a todas las coordenadas obtenidas en el levantamiento topográfico (X_{rk}, Y_{rk}, Z_{rk}) ; los **NC** puntos con las distancias más cercanas conformarán el conjunto de puntos vecinos o cercanos para la estimación de z_{ij} , mediante la ecuación (5.14).

$$z_{ij} = \sum_{q=1}^{NC} W_q Z_q \quad (5.14)$$

Donde: z_{ij} = Dato estimado en el nodo (i, j) de la cuadrícula generada de dimensiones $m \times n$; $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $j = 1, 2, 3, \dots, m$; n = Número de hileras; m = Número de columnas. Z_q = Coordenada Z_{rk} del punto de campo ubicado en la posición q del conjunto de puntos vecinos o cercanos. W_q = Peso o factor de ponderación calculado para el sitio q del conjunto de puntos vecinos o cercanos para la estimación de z_{ij} en el nodo (i, j) . **NC** = Número total de puntos vecinos o cercanos al nodo (i, j) , que se utilizarán para estimar el dato z_{ij} .

La suma de los valores de los pesos o factores de ponderación (W_q) del conjunto de puntos vecinos o cercanos al nodo (i, j) deben cumplir la restricción definida en la ecuación (5.15):

$$\sum_{q=1}^{NC} W_q = 1 \quad (5.15)$$

5.2.5.1. Cálculo de los pesos o factor de ponderación (W_q).

El cálculo de los pesos se realiza aplicando el método de Kriging. La esencia de Kriging es la estimación del Semivariograma (Figura 5.4), en éste caso de elevaciones; el cual se construye definiendo 20 clases de distancias con todos los datos de campo (P) y calculando $\gamma(h)$ para cada clase ubicada a una distancia (d_{t+h}) el valor del semivariograma $\gamma(h)$ a través de la ecuación (5.16).

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{t=1}^P [Zr(d_t) - Zr(d_{t+h})]^2}{2P} \quad (5.16)$$

Donde: $Zr(d_t)$ = Valor de la cota topográfica (Z) en el punto t ; $Zr(d_{t+h})$ = Valor de la cota topográfica (Z) en el sitio ubicado a la distancia h del punto t ; P = Número total de puntos del levantamiento por radiaciones.

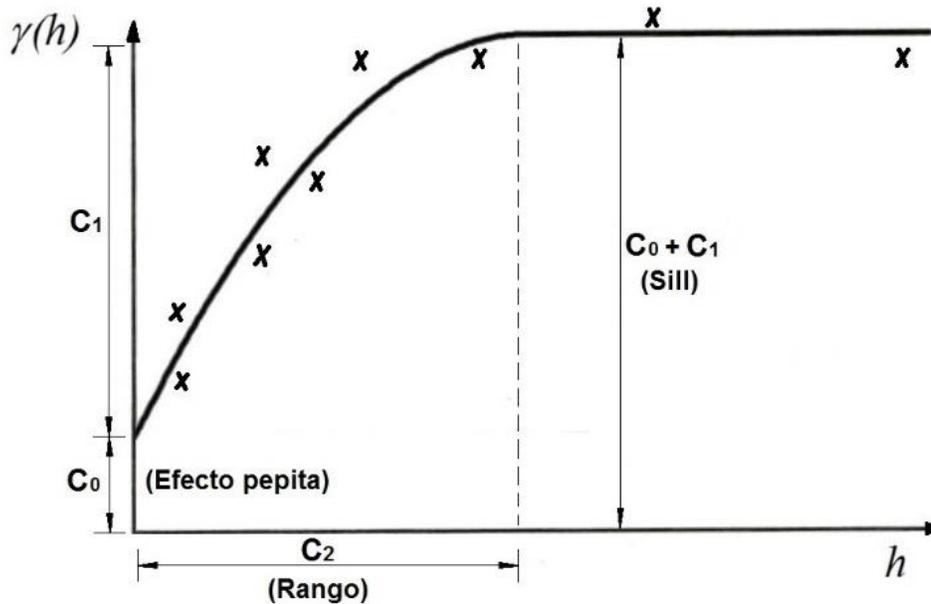


Figura 5.4. Ajuste del Variograma teórico.

Calculado el semivariograma para cada una de las distancias definidas en las clases, se ajusta un modelo teórico, que puede ser: lineal, cuadrático, cúbico, esférico, exponencial o gaussiano (Cuadro 5.1, ecuaciones 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 y 5.22). El comportamiento en el origen de los modelos propuestos pueden considerarse o no el efecto pepita, es decir la ordenada al origen (intersección con el eje Y) o bien considerar que salen del origen, como es el caso de la topografía, Figura 5.4. Inicialmente se probó con modelos de variograma que incluyen el efecto pepita, sin embargo, la mayoría de soluciones implicaba valores negativos para el coeficiente C_0 , razón por la cual, se decidió utilizar el modelo que sale del origen. El cálculo de los coeficientes de los modelos (C_0 , C_1 y C_2) se realizó primero con el método Newton-Raphson para la solución de sistemas de ecuaciones no lineales (Chapra y Canale, 2015), con resultados poco favorables, por lo que, los modelos se linealizaron (Cuadro 5.1, ecuaciones 5.18a, 5.19a, 5.20a, 5.21b y 5.22b). Antes de la linealización, los modelos Exponencial y Gaussiano se aproximaron a una función polinomial (ecuaciones 5.21a y 5.22a), mediante series de Taylor (Purcell y Varberg, 2009).

Una vez linealizados los modelos se aplicó la ecuación (5.12) para determinar los coeficientes β_i y para el cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma; las soluciones se listan en el cuadro 5.2 (ecuaciones 5.23 a 5.28), cuadro 5.3 (5.29 a 5.32) y cuadro 5.4 (5.33 a 5.36).

Cuadro 5.1. Modelos utilizados para el ajuste del variograma teórico (Delhorne, 1978)

Modelo	Función para ($0 < h \leq C_2$) y linealización	
Lineal	$\gamma(h) = C_0 + C_1 h$	(5.17)
Cuadrático	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[2 \left(\frac{h}{C_2} \right) - \left(\frac{h}{C_2} \right)^2 \right]$	(5.18)
	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2$	(5.18a)
Cúbico	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[7 \left(\frac{h}{C_2} \right) - 8.75 \left(\frac{h}{C_2} \right)^3 + 3.5 \left(\frac{h}{C_2} \right)^5 - \left(\frac{h}{C_2} \right)^7 \right]$	(5.19)
	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^3 + \beta_3 h^5 + \beta_4 h^7$	(5.19a)
Esférico	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{C_2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{C_2} \right)^3 \right]$	(5.20)
	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^3$	(5.20a)
Exponencial (^{*)})	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{C_2} \right) \right]$	(5.21)
	$\gamma(h) \cong C_0 + C_1 \left[1 - \frac{5}{2e} \right] + \frac{2}{e} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) h - \frac{1}{2e} \left(\frac{C_1}{C_2^2} \right) h^2$ (*)	(5.21a)
	$\gamma(h) \cong \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2$	(5.21b)
Gaussiano (^{*)})	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{C_2} \right)^2 \right]$	(5.22)
	$\gamma(h) \cong C_0 + C_1 - \left(\frac{4 C_1}{e} \right) + \left(\frac{4 C_1}{e C_2} \right) h - \left(\frac{C_1}{e C_2^2} \right) h^2$ (*)	(5.22a)
	$\gamma(h) \cong \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2$	(5.22b)

Cuando $h > C_2$: $\gamma(h) = C_0 + C_1$ (para los modelos Cuadrático, Cúbico y Esférico)

(^{*)} Función aproximada a polinomio, mediante Series de Taylor y para $h=C_2$.

Cuadro 5.2. Cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico.

Modelo	Partiendo del origen ($C_0=0$) / Con Efecto Pepita ($C_0=\beta_0$)	
	C_2 (Sill)	C_1 (Rango)
Cuadrático	$C_2 = -0.5 \left(\beta_1 / \beta_2 \right)$ (5.23)	$C_1 = -0.25 \left(\beta_1^2 / \beta_2 \right)$ (5.23a)
Cúbico	$C_2 = 1.11803 \sqrt{-\beta_1 / \beta_2}$ (5.24a)	$C_1 = 0.14286 \beta_1 C_2$ (5.24)
	$C_2 = 0.72302 \sqrt[6]{\beta_1 / \beta_4}$ (5.24b)	
	$C_2 = 0.84090 \sqrt[4]{\beta_1 / \beta_3}$ (5.25)	$C_1 = 0.28571 \beta_3 C_2^5$ (5.25a)
	$C_2 = 0.63246 \sqrt{-\beta_2 / \beta_3}$ (5.26)	$C_1 = -0.11429 \beta_2 C_2^3$ (5.26a)
	$C_2 = 0.58143 \sqrt[4]{-\beta_2 / \beta_4}$ (5.27)	$C_1 = \beta_4 C_2^7$ (5.27a)
Esférico	$C_2 = 0.57735 \sqrt{-\beta_1 / \beta_2}$ (5.28)	$C_1 = 0.66667 \beta_1 C_2$ (5.28a)
		$C_1 = -2 C_2^3 \beta_2$ (5.28b)

Cuadro 5.3. Cálculo de los coeficientes C_1 y C_2 del variograma teórico

Modelo	Coeficientes para Variogramas partiendo del origen ($C_0=0$)	
	C_2 (Sill)	C_1 (Rango)
Exponencial	$C_2 = -0.25 \left(\beta_1 / \beta_2 \right)$ (5.29)	$C_1 = -0.33979 \left(\beta_1^2 / \beta_2 \right)$ (5.29a)
	$C_2 = 1.51348 \sqrt{-\beta_0 / \beta_2}$ (5.30)	$C_1 = 12.45308 \beta_0$ (5.30a)
Gaussiano	$C_2 = -0.25 \left(\beta_1 / \beta_2 \right)$ (5.31)	$C_1 = -0.16989 \left(\beta_1^2 / \beta_2 \right)$ (5.31a)
	$C_2 = -3.12081 \left(\beta_0 / \beta_1 \right)$ (5.32)	$C_1 = -2.12081 \beta_0$ (5.32a)

Cuadro 5.4. Cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico

Modelo	Coeficientes para Variogramas con efecto pepita ($C_0 \neq 0$)	
	C_2 (Sill)	C_1 (Rango)
Exponencial	$C_0 = \beta_0 + 0.02729 \left(\beta_1^2 / \beta_2 \right)$ (5.33)	
	$C_2 = -0.25 \left(\beta_1 / \beta_2 \right)$ (5.34)	$C_1 = -0.33979 \left(\beta_1^2 / \beta_2 \right)$ (5.34a)
Gaussiano	$C_0 = \beta_0 - 0.08011 \left(\beta_1^2 / \beta_2 \right)$ (5.35)	
	$C_2 = -0.25 \left(\beta_1 / \beta_2 \right)$ (5.36)	$C_1 = -0.16989 \left(\beta_1^2 / \beta_2 \right)$ (5.36a)

Una vez calculados los coeficientes del variograma teórico, la estimación de los pesos o factores de ponderación (\mathbf{W}_q) para cada uno de los nodos se hace mediante un proceso matricial (ecuaciones 5.37, 5.38 y 5.39).

$$\mathbf{S}\mathbf{w} = \mathbf{b} \tag{5.37}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_n \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.38}$$

Donde: \mathbf{S} = Es una matriz cuadrada de orden $n \times n$; cada elemento de la matriz se calcula evaluando el variograma teórico con la distancia entre puntos; por ejemplo: el elemento γ_{12} es calculado al evaluar la función del variograma con la distancia existente entre el punto 1 y 2 de los \mathbf{NC} puntos cercanos o vecinos que se involucraron para el proceso de interpolación. \mathbf{w} y \mathbf{b} = Son los vectores de orden $n \times 1$. El vector \mathbf{b} se obtiene al evaluar la función del variograma con la distancia que hay entre el nodo (i, j) donde se estimará \mathbf{z}_{ij} y el dato vecino \mathbf{q} . \mathbf{w} contiene las n incógnitas involucradas en el cálculo, es decir, los pesos de cada uno de los \mathbf{NC} datos, más un multiplicador de Lagrange (λ) que almacena el error

residual calculado en el proceso, así al despejar el vector w se obtendrán los pesos o ponderaciones buscadas (W_q).

$$w = S^{-1}b \quad (5.39)$$

Como producto de este paso se obtiene un archivo (*.MLL) con la información z_{ij} de cada uno de los nodos de la cuadrícula homogénea.

5.2.5.2. Estimación de los nodos de la cuadrícula.

Si se hizo el levantamiento por cuadrícula ya se tiene una cuadrícula con distribución homogénea y el cálculo es más fácil. En caso del levantamiento por radiaciones habrá que generarla, para lo cual se hace necesario seguir un proceso de interpolación espacial (el cual ya se ha tratado en los párrafos anteriores).

Los procedimientos a realizar para determinación de la cuadrícula se describen a continuación, se muestra también el nombre del procedimiento desarrollado y la información que se debe proporcionar para realizar los cálculos.

1.- Creación de semivariograma:

```
FormInterpol.Semivariograma (NoCoor, 'SemiC'+IntToStr(k)+'.Var');
```

2.- Ajuste de semivariograma ó elaboración del variograma teórico:

```
AjusteSemivariograma (NoModelo, RutaTerra+'SemiC'+IntToStr(k)+'.Var');
```

3.- Definición de los límites de la nueva cuadrícula y número de mallas en X y Y:

```
Procedure TFormResCuadros.AjusteEcPlanoyResultados;
```

4.- Obtención de la coordenada Z de cada uno de los nodos de la cuadrícula, mediante el proceso de interpolación geoestadístico. Para el cálculo de los pesos se utilizó el método de Kriging.

```
FormInterpol.Kriging (NoMallaX, NoMallaY, Maximo, Minimo, RutaTerra+'Tempo\CuaTerraK.MLL');
```

5.- Blanqueo de la cuadrícula depurando los datos según la poligonal del terreno o del cuadro. En este apartado se eliminan los nodos de la cuadrícula que estén fuera de polígono que define el linderero del terreno o del cuadro.

```
BlanqueoALE (RutaTerra+'Tempo\CuaTerraK.MLL', RutaTerra+'Tempo\CuaTerraK_B.MLL'
',
PolyTerra.Cuadro[k], LonCuadricula, NoValores);
```

6.- Se asignan los nodos de la cuadrícula generada a la variable general de cuadrícula con la que se realizan los cálculos del plano proyecto.

```
AsignaNodos (RutaTerra+'Tempo\CuaTerraK_B.MLL', NoValores);
```

5.2.6. AJUSTE DE LA ORDENADA AL ORIGEN (C_A).

El ajuste de la ordenada al origen (C_A) del plano proyecto calculado en el segundo paso, se realiza de acuerdo a la relación entre los cortes y rellenos definidos por el coeficiente de abundamiento ($R=Corte/Relleno$), la mayoría de autores coinciden que el coeficiente de abundamiento (R) se debe encontrar en el rango: $1.10 \leq R \leq 1.50$ (Walker 1988). En la práctica, donde existieron rellenos habrá compactación y quedarán hoyos, estos se presentarán a través del tiempo por causa de la lluvia y compactación del suelo, por lo que es necesario aumentar los cortes, por lo tanto disminuirán los rellenos esto se hace hasta tener un coeficiente de abundamiento (R) dentro del rango deseado; el ajuste se realiza bajando o subiendo el plano proyecto en $\pm\Delta h$, h es el valor de incremento o decremento en la elevación del plano, dependiendo del suelo y su mayor o menor contenido de materia orgánica. Es decir si un suelo es arenoso el coeficiente R será cerca de 1.1, arcilloso el valor del coeficiente será cerca de 1.5. Si se considerara un suelo intermedio (franco arcilloso) los valores del coeficiente variarán entre 1.20 y 1.30 (Walker, 1988). El cálculo de los volúmenes de corte y relleno se realiza mediante el método de los 4 puntos, para lo cual fue necesario utilizar la cuadrícula con los datos de campo o generada por el método de Kriging. La incorporación del método de Kriging para la estimación de la cota (z_{ij}) en cada nodo (i, j) de la cuadrícula es un procedimiento nuevo en la nivelación de tierras y ha mostrado resultados geoestadísticamente confiables en la determinación del Modelo Digital de Elevaciones y por tanto, en el cálculo de volúmenes de corte y relleno. Como resultado de paso se obtiene un coeficiente C_A ajustado (C_{Aajus}), para la ecuación del plano

proyecto. Con lo anterior se calculan valores finales de espesores de cortes o rellenos para cada nodo (*i, j*) de la cuadrícula y por tanto volúmenes de cortes y rellenos, así como costos de nivelación por hectárea y totales.

El procedimiento específico seguido para el ajuste de la ecuación del plano (Coeficiente A), se explica en los siguientes puntos.

5.2.6.1. Cálculo de Z centroidal

El movimiento de tierras deberá partir del centroide del terreno, cuya posición ya se conoce. Además de la posición C(x,y) habrá que calcular la cota centroidal, la cual se obtuvo de la siguiente manera:

$$Z_c = \sum_{k=1}^N Z_k / N \quad (5.40)$$

Donde:

N =Numero de Datos con valor distinto de cero

Z_k = Dato de la Cota k

El modulo desarrollado, depende donde están almacenadas las coordenadas de campo para el cálculo de la cota centroidal, el código se puede ver en el anexo D.6.

5.2.6.2. Cortes y rellenos.

Los espesores de corte o relleno, se estiman mediante la expresión (5.41).

$$C_{ij} = Z_{ij} - \hat{Z}_{ij} \quad (5.41)$$

Donde:

C_{ij} = espesores de corte (valores positivos) o espesores de relleno (valores negativos).

Z_{ij} = cotas del terreno natural.

Z^{\wedge}_{ij} = “cotas proyecto”, que se obtienen al substituir las coordenadas de cada punto de la cuadrícula en la ecuación del plano proyecto.

La estimación de volúmenes se realizó por el método de los Cuatro Vértices, utilizando las ecuaciones (5.42) y (5.43).

$$V_C = \frac{(\sum C_i)^2}{|\sum Re_i| + |\sum C_i|} \left(\frac{A}{4}\right) \quad (5.42)$$

$$V_R = \frac{(\sum Re_i)^2}{|\sum Re_i| + |\sum C_i|} \left(\frac{A}{4}\right) \quad (5.43)$$

Donde:

V_C = Volumen de corte en el cuadro correspondiente.

V_R = Volumen de relleno en el cuadro correspondiente.

$\sum C$ = Suma de espesores de corte en los vértices del cuadro correspondiente.

$\sum Re$ = Suma de espesores de relleno en los vértices del cuadro correspondiente.

A = Área individual de un cuadro de lado L ($A = L^2$).

5.2.6.3. Ajuste del Coeficiente C_A , según la relación cortes/rellenos (R)

Una vez calculados los volúmenes de corte y relleno, habrá que verificar que la relación de la ecuación (5.44) se cumpla según el criterio planteado por Walker (1989), considerando la textura del suelo.

$$1.10 < \frac{V_C}{V_{Re}} = R > 1.50 \quad (5.44)$$

Si el valor de ($R = V_C/V_R$) no se encuentra dentro del rango anterior, habrá que subir o bajar el plano modificando su coeficiente (C_A), incrementando o decrementando su valor. Las recomendaciones emitidas por Walker (1989), para este proceso es, que el plano se debe mover arriba (+) o abajo (-) un (Δh) de acuerdo a la figura 4.9 y a la expresión 5.45,

consideraciones que han sido retomadas por todos los proyectistas de nivelación de tierras.

$$\Delta h = \frac{R \sum_{j=1}^{N_r} |Re_j| - \sum_{i=1}^{N_c} C_i}{RN_r + N_c} \quad (5.45)$$

Expresión que se ha utilizado en el diseño de Terra 1.0, pero en la práctica para terrenos con poco movimiento, este valor de (Δh) puede generar un plano con cortes o rellenos en su totalidad.

Una vez que se ha determinado el coeficiente C_A , se denominará C_{A_ajus} para diferenciarlo de otro, por lo que la ecuación final del plano será la mostrada en la expresión (5.46).

$$\hat{Z}_{i,j} = C_{A_ajus} + C_B X + C_C Y \quad (5.46)$$

Con lo anterior será posible hacer los procesos definitivos:

- Cálculos finales de espesores de corte, espesores de relleno, volúmenes de corte y volúmenes de relleno
- Cálculo de costos del movimiento de tierras
- Resumen de Resultados

El módulo de cálculo de cortes y rellenos se puede ver en el Anexo D7.

5.2.7. GENERACIÓN Y DIBUJO DE ISOLÍNEAS.

En el proyecto de nivelación se elaboran planos de curvas de nivel para el terreno natural (configuración antes de la nivelación) y para el proyecto de terreno nivelado (configuración después de la nivelación). Éste proceso se realiza de la siguiente manera:

Sin importar como fue realizado el levantamiento topográfico se crean curvas de nivel para todo el terreno; generando una nueva cuadrícula (x'_i, y'_j, z'_{ij}) con longitudes entre nodos más pequeña, de aproximadamente un cuarto de la longitud de cuadrícula para la nivelación. Ésta nueva cuadrícula se calcula a partir de los datos de campo levantados en cuadrícula rectangular (x_i, y_j, z_{ij}) ó por radiaciones (X_{rk}, Y_{rk}, Z_{rk}) aplicando el proceso de interpolación espacial con el método de Kriging explicado en los puntos anteriores o si se prefiere el método del inverso de la distancia. Los límites de la nueva cuadrícula se extienden para cubrir perfectamente la poligonal del terreno y evitar áreas sin curvas. El cálculo y dibujo de isolíneas o curvas de nivel del terreno nivelado, se realiza con los nodos (i, j) de la nueva cuadrícula, cuya cota z_{ij} se obtiene con la ecuación final; expresión (5.46) definida para el plano proyecto.

5.2.7.1. Elaboración de Isolíneas.

Se analiza nodo por nodo la información altimétrica en cada uno de los vértices de la cuadrícula, utilizando una simple “regla de tres” para obtener el valor de la cota del terreno en cualquier lado del cuadrado delimitado por los vértices; al unir los puntos de igual elevación se pueden obtener las curvas de nivel de todo el predio (Figura 5.5 y 5.6).

El proceso detallado para el cálculo de las isolíneas es el siguiente:

a. Definir límites de la cuadrícula para los planos

Los límites de la cuadrícula donde se generarán las curvas de nivel, se obtienen de los datos de la poligonal del terreno y de las coordenadas para la nivelación (datos de campo);

al analizar ambas fuentes de información, se obtienen sus coordenadas extremas (X_{min}, Y_{min}) y (X_{max}, Y_{max}), formando así un rectángulo que contiene toda la información tomada en el levantamiento topográfico (Figura 5.5).

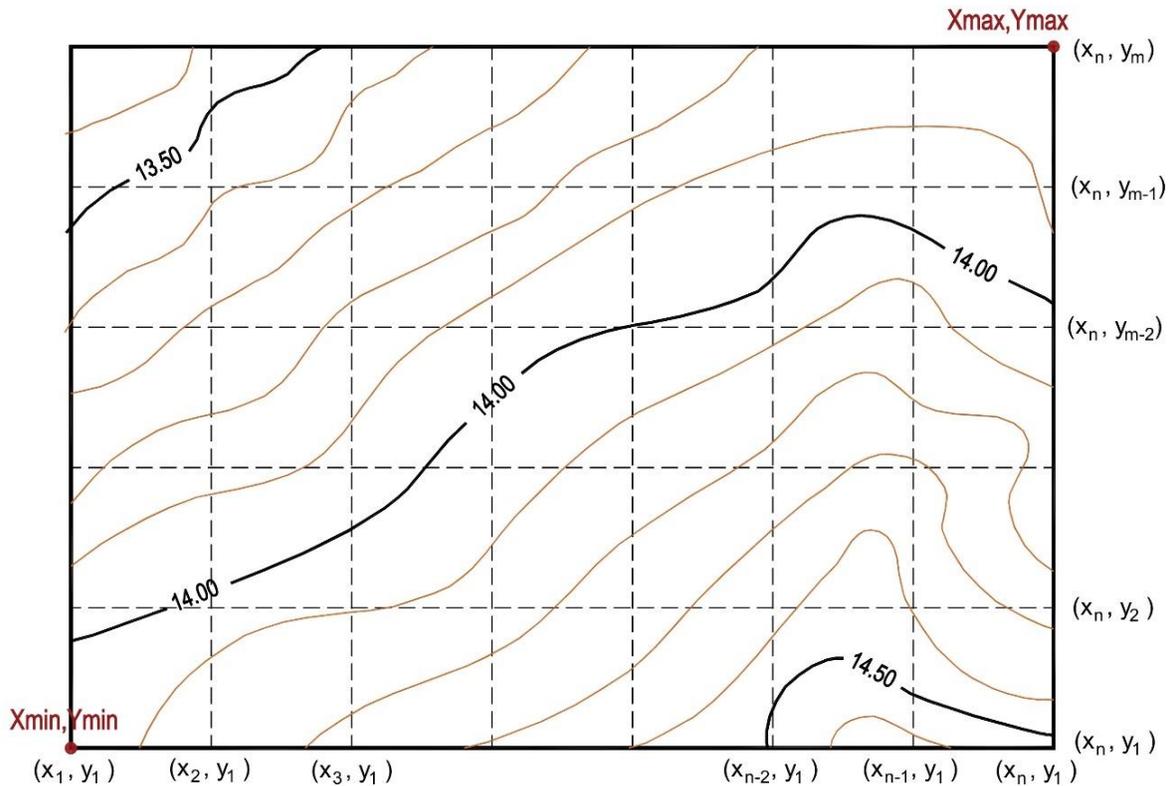


Figura 5.5. Isolíneas con 0.1m de equidistancia vertical, generadas con las cotas (Z'_{ij}) de los vértices de la nueva cuadrícula.

La longitud del módulo de la cuadrícula (separación entre nodos) para las curvas de nivel, es más pequeña que la longitud de cuadrícula establecida por el usuario (como dato de entrada), y se obtiene como múltiplo de la longitud de la cuadrícula para la nivelación.

El proceso de cálculo y dibujo de isótopas se realiza tanto para el terreno natural como para el terreno nivelado y se puede resumir en los siguientes dos puntos:

- ☑ Calcular y Dibujar isólineas del terreno natural con: Archivo.DAT, tamaño de la cuadrícula MxN y módulo entre nodos de $L < L_{\text{cuadrícula_campo}}$. Método usado para el cálculo de la información de cada nodo: Kriging o Inverso de la distancia.
- ☑ Calcular y dibujar isólineas del terreno nivelado con: Archivo.MLL, tamaño de la cuadrícula MxN y módulo entre nodos de $L < L_{\text{cuadrícula_campo}}$. Método usado para el cálculo de la información de cada nodo: Estimación de Z con plano proyecto (ec. 5.46).

El cálculo individual de la posición de la isólinea en cada uno de los cuadrillos (celda) delimitados por los nodos de la cuadrícula se ilustra en la figura 5.46.

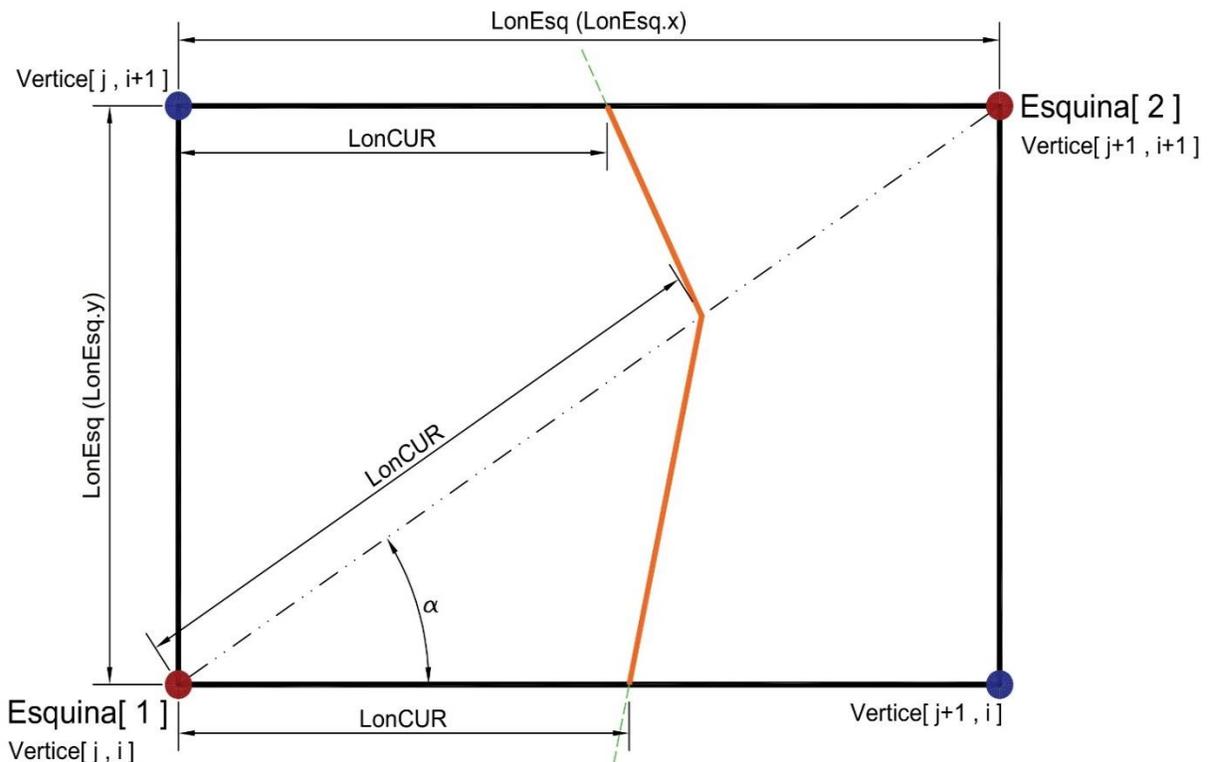


Figura 5.6. Esquema Básico del Algoritmo para Isólineas.

En la figura 5.6 se refiere a cada nodo de la cuadrícula como vértice. Si se define como origen parcial el vértice ubicado en el esquina[1], el cálculo de la longitud y posición de las

isolíneas para el segmento entre el Vertice[j,i] y Vertice[j+1,i+1] se podrá calcular con la expresión (5.48, 5.49 y 5.50).

$$\tan \alpha = \frac{\text{LonEsq.y}}{\text{LonEsq.x}} \quad (5.47)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\text{LonEsq.y}}{\text{LonEsq.x}} \right] \quad (5.48)$$

La proyección horizontal:

$$\text{LonCUR.x} = \cos(\alpha) \cdot \text{LonCUR} \quad (5.49)$$

La proyección vertical:

$$\text{LonCUR.y} = \text{sen}(\alpha) \cdot \text{LonCUR} \quad (5.50)$$

Se denominó celda al cuadrado generado entre cuatro nodos de la cuadrícula. El tamaño de la celda será variable dependiendo de la superficie del terreno. Para un levantamiento de menos de 25 ha, se generan cuadrillos de 5 a 7m de longitud por lo que la cuadrícula total deberá tener entre 5000 y 7000 celdas y el análisis requerirá un poco de tiempo.

El análisis de la información implicó numerar los vértices de las celdas como se muestra en la figura 5.7. El sentido de las isolíneas se puede determinar también con este esquema.

EL cálculo de la longitud de la curva en cada celda para un valor constante definido (NivCTE) se puede obtener con las expresiones (5.51, 5.52 y 5.53).

$$\text{NivCTE} = \text{IntVer} - \text{CooZi} \quad (5.51)$$

$$\text{DesnZ}(+/-) = \text{ExtremoD} - \text{ExtremoI} \quad (5.52)$$

$$\text{LonCUR} = \frac{\text{LonEsq} \times \text{NivCTE}}{\text{DesnZ}} \quad (5.53)$$

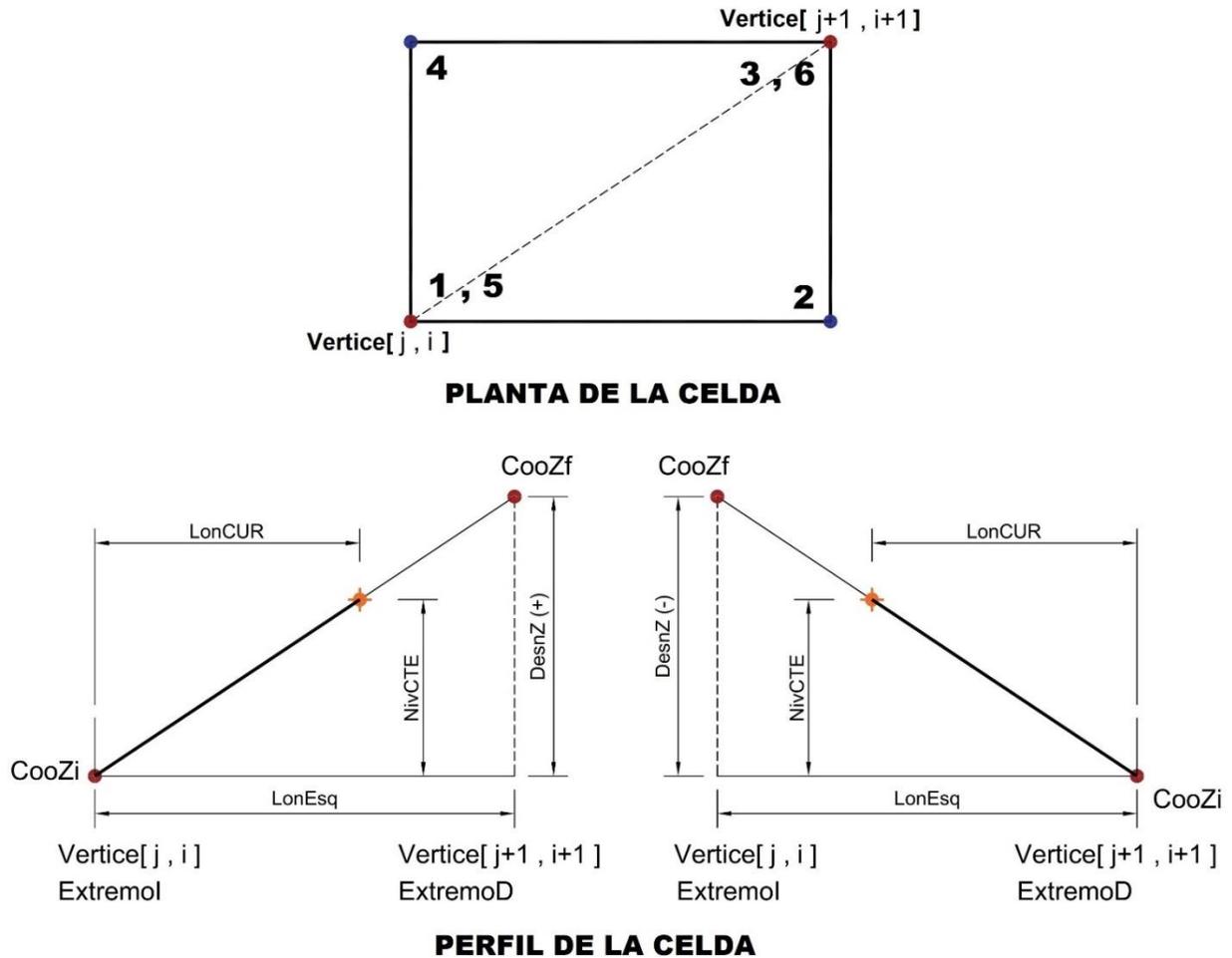


Figura 5.7. Análisis por celdas para la determinación de las isolíneas.

La expresión (5.53) se obtiene aplicando proporciones, comúnmente conocido como “regla de tres”. Considerando que existen un desnivel vertical en la celda ($DesnZ$) para su longitud horizontal ($LonEsq$), por lo que para el desnivel buscado ($NivCTE$) la incógnita a buscar es la Longitud de la curva a partir del Extremol ($Vertice[j,i]$). La relación geométrica se puede ver en la expresión (5.54). Despejando $LonCUR$ se obtiene la expresión (5.53).

$$\begin{aligned}
 LonEsq &\rightarrow DesnZ \\
 \mathbf{LonCUR} &\leftarrow NivCTE
 \end{aligned}
 \tag{5.54}$$

Las diversas posibilidades en que puede presentarse la isolinea en la celda se presentan en la figura 5.8, considerando que la curva sigue el sentido de las flechas.

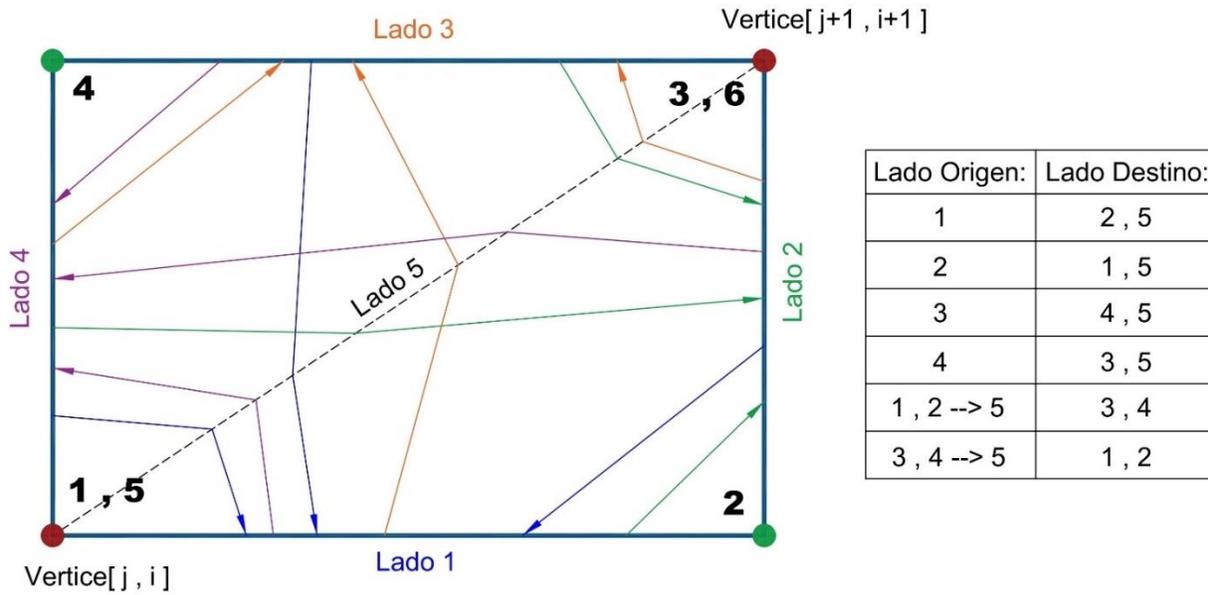


Figura 5.8. Posibilidades en la secuencia de la curva en la celda.

5.2.8. DIVISIÓN DEL TERRENO EN CUADROS O TERRAZAS.

Una vez modelada la topografía del terreno natural, es posible observar si será necesario dividir el terreno en cuadros. Se puede hacer un cálculo preliminar con todo el predio y verificar el volumen de tierras a mover en un solo plano. Si el volumen es muy grande habrá que dividir el terreno en cuadros para bajar costos.

En caso de tener cambios abruptos de pendientes o por tamaño del terreno será necesario dividirlo y hacer su nivelación por cuadros independientes. Se diseñó un algoritmo que permite dividir el predio en dos partes de forma interactiva con el usuario. Se muestra la topografía del terreno natural para que sobre ella se trace una línea divisoria que permita separar los puntos levantados en los nuevos polígonos y planos naturales de proyecto que resultan con la línea divisoria. En caso de necesitar dividir el predio en más de dos partes se tiene una forma de captura para definir los polígonos. Esto último con el fin de que el proyectista identifique manualmente los linderos de los polígonos y con esto queden dentro todos los puntos levantados en campo. Una vez definidos los cuadros se aplicarán los pasos descritos anteriormente para realizar el cálculo del plano natural de proyecto y final, así como el cálculo de volúmenes de corte y relleno en forma independiente de cada una de los cuadros.

5.2.8.1. Separación de la información topográfica

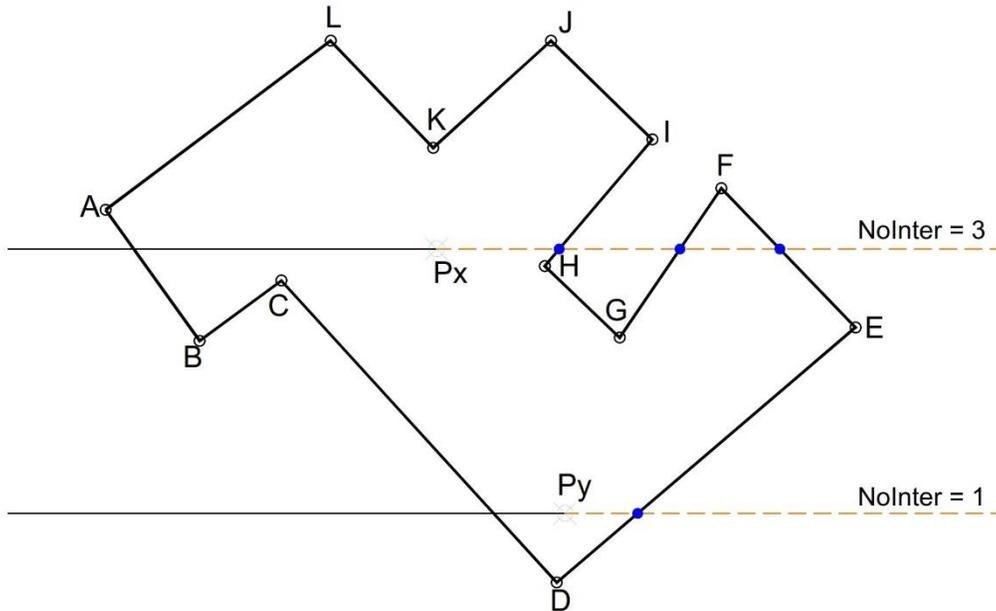
Para un proyecto que incluye **la división del terreno en cuadros distintos**, será necesario organizar de manera independiente la información. Se deberá tener muy presente las coordenadas de cada uno de los polígonos que conforman cada cuadro y habrá que separar la información topográfica en distintos archivos cada uno con la información del cuadro correspondiente. De manera analítica este proceso puede ser laborioso.

El problema anterior se reduce a determinar si un punto de coordenadas (x, y) ésta dentro o fuera de un polígono (algoritmo necesario no solo para este apartado). Hay varias formas

de determinar analíticamente si un punto esta fuera o no de un polígono; para el presente trabajo se definió la siguiente metodología para realizar este proceso (figura 5.9).

¿El Punto esta DENTRO o FUERA del polígono?

1). Caso A: DENTRO - No. de Intersecciones IMPAR



2). Caso B: FUERA - No. de Intersecciones PAR y 0

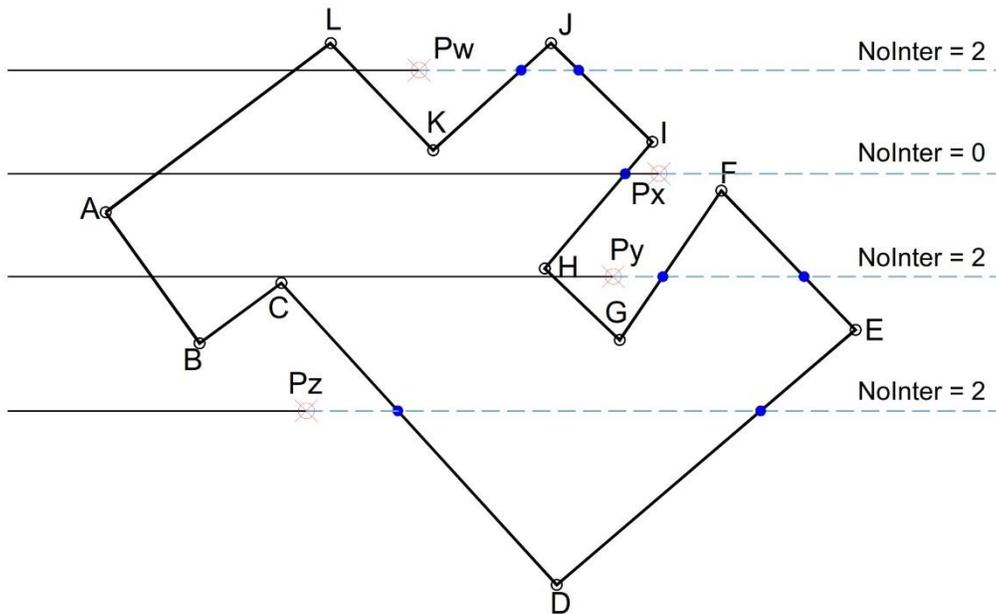


Figura 5.9. Esquema básico para definir si un punto esta fuera o dentro de un polígono.

De esta forma es posible realizar la separación de la información para cada uno de los cuadros definidos. El código que resuelve el problema anterior se puede ver en el anexo D.5 y la separación de las coordenadas de campo en cuadros en el código D.6

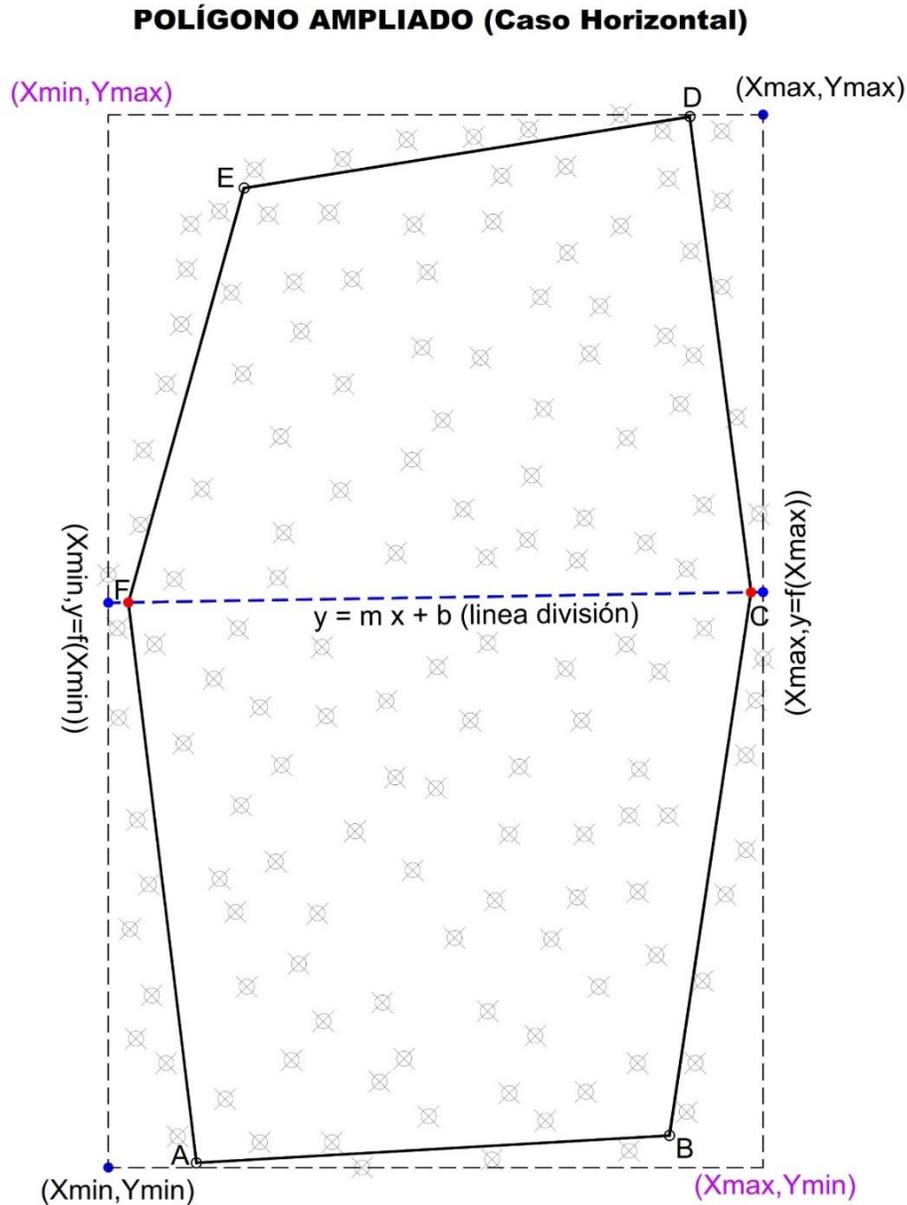


Figura 5.10. Esquema para crear el polígono ampliado con dos cuadros (caso horizontal).

Para facilidad del usuario se analizó el caso cuando se divide el terreno sólo en dos cuadros; para este caso se generó una poligonal extendida, pensando que el topógrafo pueda tomar datos un poco fuera de los linderos del terreno. Valores que no se podrían

considerar con el algoritmo simple desarrollado. La poligonal extendida se ha considerado horizontal o vertical en función de cómo se realiza la división del predio (Figura 5.10 y 5.11).

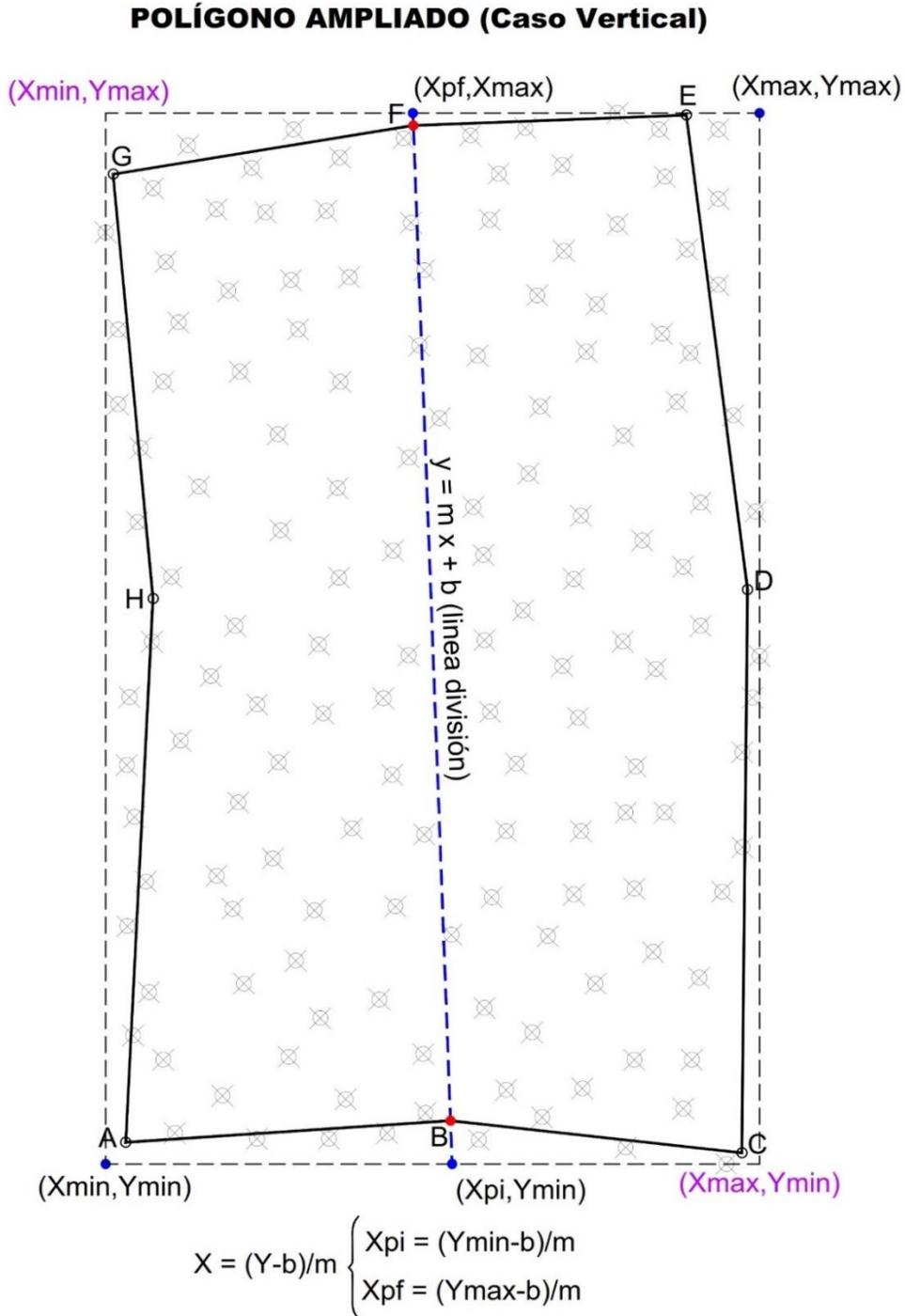


Figura 5.11. Esquema para crear el polígono ampliado con dos cuadros (caso vertical).

6. RESULTADOS y DISCUSIÓN

Como resultado de varios años de trabajo en el área de la programación de proyectos de nivelación de tierras se presenta un nuevo programa: TERRA 1.0 (Figura 6.1). Sistema que procesa datos de campo obtenidos con levantamientos topográficos, mediante puntos de una cuadrícula rectangular o con distribución variable.



Figura 6.1. Créditos del programa TERRA.

TERRA 1.0 se desarrolló con el lenguaje de programación Delphi (Pascal para windows), diseñado para funcionar como herramienta en cualquier proyecto de nivelación de tierras donde la topografía sea levantada en cuadrícula con trazo rectangular o radiaciones. El sistema permite la nivelación general de todo el predio levantado o la división por cuadros. El cálculo de volúmenes de corte y relleno se realiza usando el método de los cuatro vértices, usando una cuadrícula rectangular resultado de aplicar el método de

Kriging. La estimación de los valores de la cuadrícula genera valores congruentes con la topografía y por ende el cálculo de volúmenes se obtiene de acuerdo a los procedimientos técnicos preestablecidos.

El programa generado, pretende iniciar con un nuevo enfoque en el cálculo de los proyectos de nivelación de tierras. Incluye nuevas rutinas para el cálculo del plano proyecto, la solución del método de mínimos cuadrados se hace en forma matricial, se incluye además un algoritmo para que el ajuste del plano se realice según el criterio de Walker 1989. La entrada de datos considera un sistema de referencia cartesiano común y corriente haciendo el uso más fácil al usuario. Se calcula el centroide sin necesidad de dividir el terreno en triángulos. El método para el cálculo de las isolíneas de la topografía natural se realiza usando una cuadrícula rectangular más densa debido a que la información topográfica en un levantamiento por cuadrícula es muy poca, usando el método clásico de la interpolación espacial como es el Método de Kriging, con resultados geoestadísticamente confiables en la determinación del Modelo Digital de Elevaciones; además puede considerar para la elaboración de un proyecto de nivelación que el levantamiento topográfico fue realizado por el método de radiaciones con los aparatos de medición moderna y no se hizo el levantamiento por cuadrícula.

El ambiente de TERRA y el menú Nivelación se muestran en la Figura 6.2. En las siguientes secciones se describe los aspectos principales del sistema.



Figura 6.2. El Ambiente de TERRA 1.0 y menú Nivelación.

6.1. RESULTADOS GENERADOS

El objetivo fundamental del presente trabajo fue generar un software auxiliar para el desarrollo de proyectos de nivelación de tierras (TERRA 1.0). A su vez, a lo largo del proceso de elaboración se han generado un conjunto de resultados paralelos, pero no de menor importancia, que se enlistan a continuación:

- A. Se desarrolló una metodología para la elaboración de un proyecto ejecutivo para la nivelación de tierras, con levantamientos topográficos realizados por radiaciones; la cual se describe ampliamente en el capítulo de metodología.
- B. Se integró la metodología tradicional para el cálculo de un proyecto de nivelación a partir de un levantamiento topográfico mediante una cuadrícula homogénea.
- C. Se integró el método de Kriging para la generación de un Modelo Digital del Terreno (MDT-DEM), usado en la generación de los planos del terreno antes y después de la nivelación, además de modelar una cuadrícula para la aplicación del “método de los cuatro vértices”, usado en la estimación de los volúmenes de corte y relleno.
- D. En la solución del Método de Kriging, se desarrollaron y resolvieron los modelos matemáticos (lineal, cuadrático, cúbico, esférico, exponencial y gaussiano) para el ajuste del variograma experimental y cálculo de los factores de ponderación de la interpolación (pesos). Los detalles se pueden observar en el anexo B.
- E. Se integraron algoritmos para el cálculo del área y centroide en forma automática.
- F. Se implementó una metodología mediante análisis numérico para realizar el ajuste del parámetro A de la ecuación del plano según el criterio de Walker, 1989.
- G. Se integró un plano o diagrama de bloques, como apoyo al tractorista.
- H. Se desarrolló e integró al sistema TERRA un algoritmo para la división del terreno (cuadros). El algoritmo incluye un proceso interactivo para la división del terreno y la separación de datos en distintas áreas.

Para mostrar las bondades del sistema TERRA 1.0, se desarrollarán tres proyectos reales representativos de diversas épocas. El primero, un levantamiento por radiaciones que permitirá ilustrar el uso en los levantamientos modernos del programa elaborado; el

segundo y tercero, dos levantamientos por cuadrícula regular con las características clásicas de la nivelación de tierras. Los ejemplos anteriores permitirán mostrar las características más importantes del software y su aplicación a las zonas de riego del país.

6.2. EJEMPLO 1, LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR RADIACIONES

Predio No 1. Ubicado en el distrito de riego 014, Río Colorado; en el Ejido Tehuantepec, Mexicali, B.C.; propiedad del Sr. Fernando Gaspar (Figura 6.3). Nivelación realizada en el programa RIGRAT de la CONAGUA, 2016.

6.2.2. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN POR RADIACIONES

TERRA, cuenta con tres cuadros de diálogo para la capturar la información de entrada: “*Datos del proyecto y Parámetros del diseño*” para los datos generales; “*Datos de la poligonal del terreno y cálculo del centroide*” para capturar las coordenadas (X_v , Y_v) de los vértices de la poligonal del terreno y “*Datos topográficos para la nivelación*”, para los datos de campo con coordenadas (x_i , y_j , z_{ij}) si el levantamiento fue por cuadrícula o con coordenadas (X_{rk} , Y_{rk} , Z_{rk}) si los datos fueron levantados por radiaciones y la longitud de equidistancia de la cuadrícula.

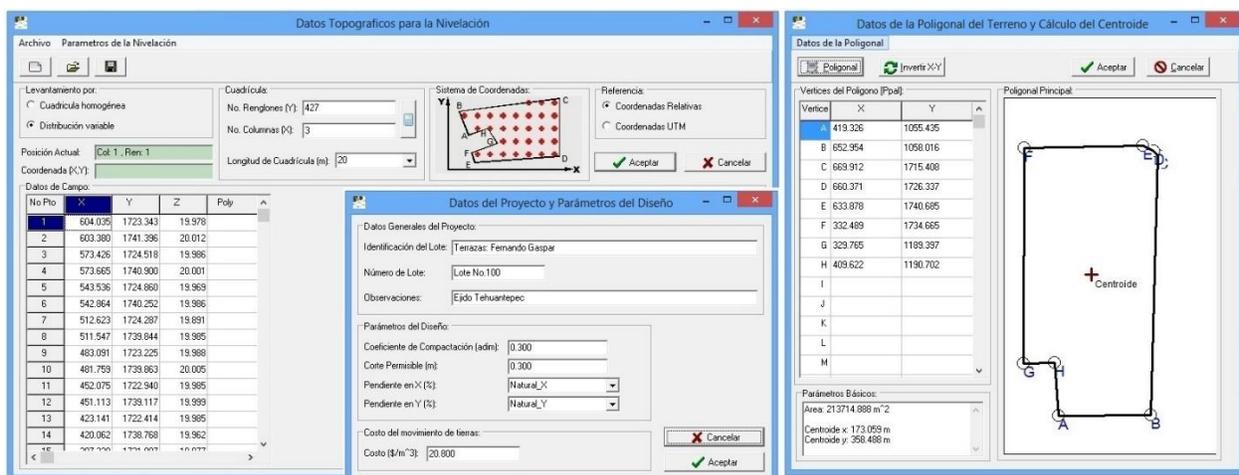


Figura 6.4. Menús para la captura de la información.

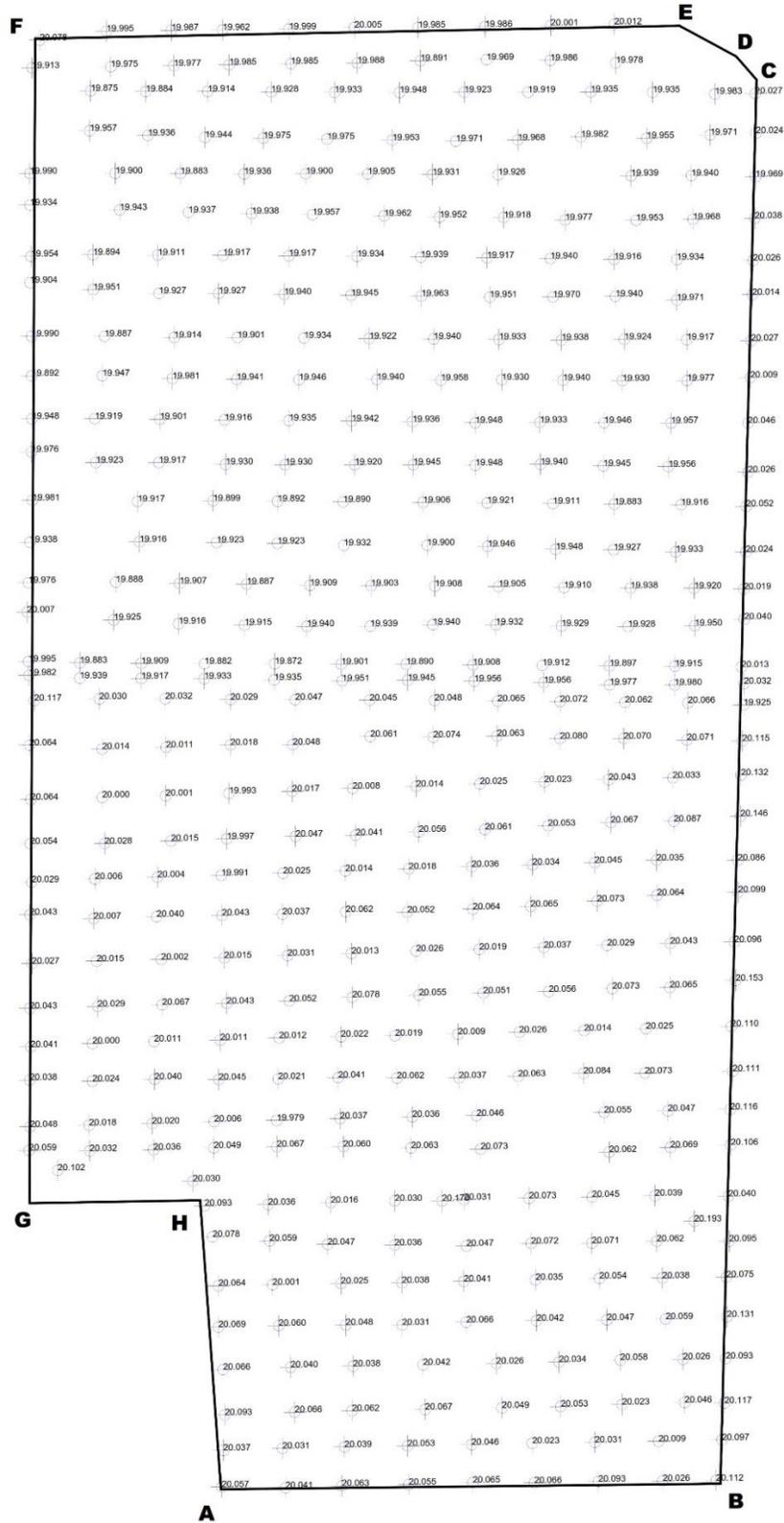


Figura 6.3. Levantamiento topográfico por radiaciones y poligonal del terreno.

Una de las contribuciones más importantes de TERRA, es el poder obtener la información de campo mediante un levantamiento por radiaciones (opción: Distribución variable). Esta opción permite la entrada de puntos capturados de forma aleatoria, con una distribución distinta a la cuadrícula, de ahí el nombre de distribución variable. El sistema tiene definidos como límite máximo de captura 1500 puntos (Figura 6.4).

6.2.3. TOPOGRAFÍA DEL TERRENO NATURAL

El programa permite generar y visualizar la topografía del terreno con curvas de nivel (figura 6.5). Para poder dibujarlas se calcula un modelo digital de elevaciones usando el método de Kriging. Delhorne (1979) recomienda el uso del método de Kriging en las aplicaciones a la hidrociencia, indicando que describe en forma adecuada el comportamiento de la topografía del terreno natural.

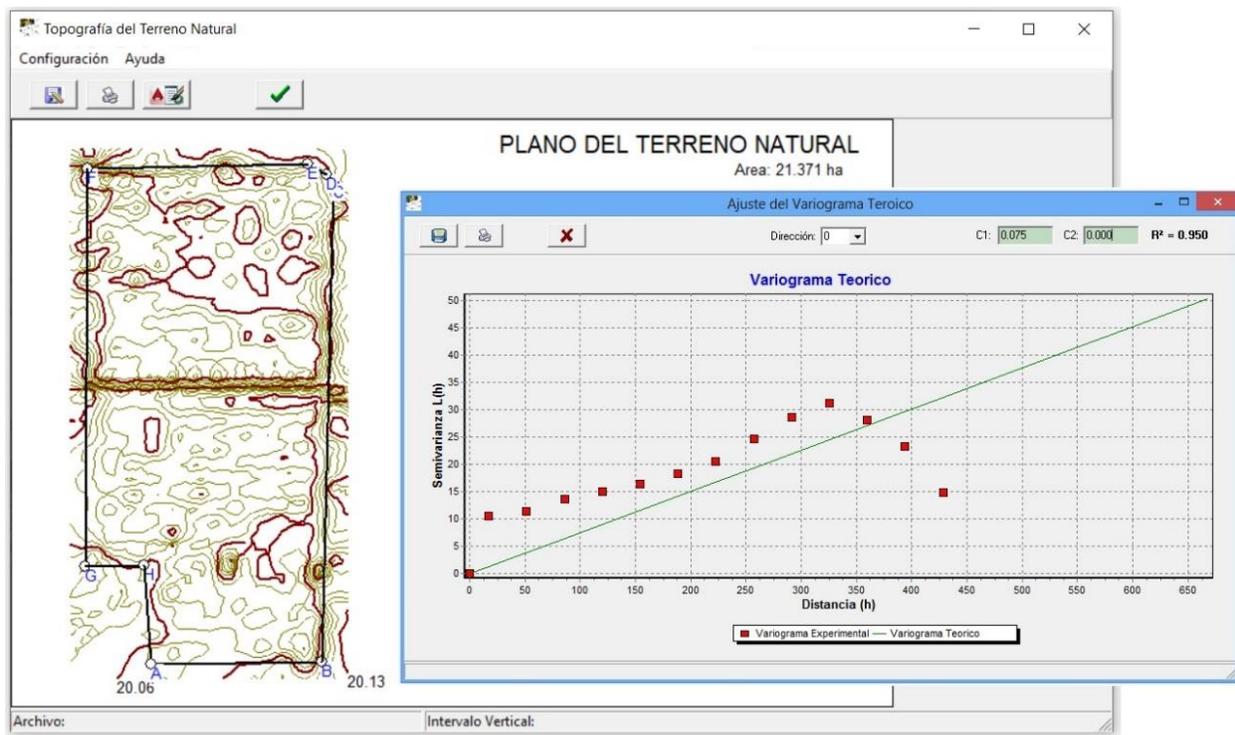


Figura 6.5. Topografía del terreno natural, aplicando el método de Kriging, en un Levantamiento de distribución variable o por radiaciones. Variograma lineal.

Como propuesta inicial para el cálculo de los coeficientes C0 y C1 del modelo del variograma teórico, se ajusta automáticamente al modelo lineal, sin embargo, se puede elegir otro en forma personalizada (figura 6.5, 6.6 y 6.7).

TERRA 1.0, cuenta con el menú “Interpolación”, que permite configurar el terreno manualmente, definiendo el modelo del variograma a utilizar: esférico, cúbico, cuadrático, exponencial o gaussiano. El ajuste manual obtiene los coeficientes C0, C1 y C2 de los modelos antes mencionados. La mayoría de expertos en geoestadística recomiendan que el ajuste del variograma experimental debe ser manual, incluso hay modelos híbridos que en este trabajo no son contemplados; sin embargo, para la elección del modelo teórico el programa generado permite revisar las distintas opciones de variogramas y elegir manualmente el que mejor ajuste a los datos experimentales. El detalle de la solución propuesta para los modelos teóricos del variograma se muestran en el Anexo B y en los cuadros 5.1 al 5.4 de la metodología.

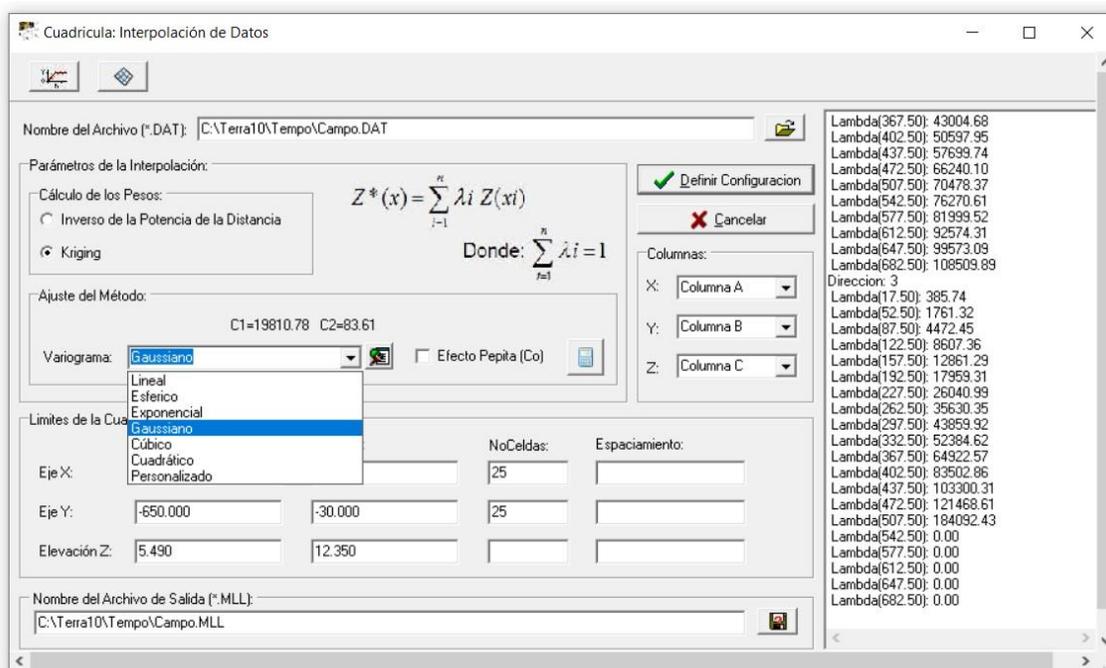


Figura 6.6. Menú para la interpolación personalizada y definición manual del Variograma.

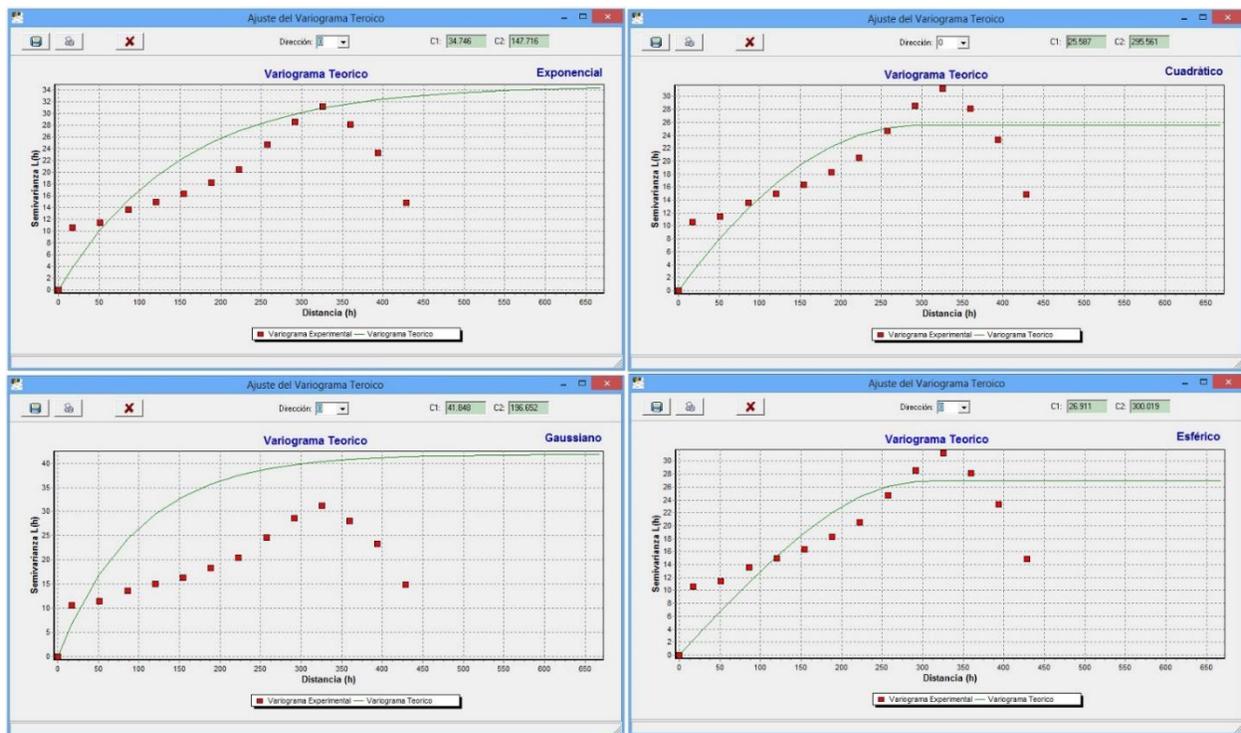


Figura 6.7. Variogramas Exponencial, Gaussiano, Cuadrático y Esférico para la topografía del ejemplo por radiaciones, calculado por TERRA.

6.2.4. DIVISIÓN DEL TERRENO EN CUADROS

El software desarrollado permite dividir el terreno en dos cuadros, trazando una línea divisoria y generando los dos polígonos independientes en forma automática (figura 6.8). Cuando se realiza un levantamiento por radiaciones, algunos puntos son tomados cerca de los linderos y con una alta probabilidad pueden caer fuera del terreno; el sistema asigna todos los puntos en alguno de los dos polígonos; sin embargo, cuando la división implica un mayor número de partes, será muy complicado agrupar los puntos, razón por la cual, se cuenta con una hoja de entrada de información donde el usuario debe ingresar las coordenadas de cada polígono y para cada tabla solo se extraerá la información que se encuentre dentro del polígono definido. Una vez realizada la división del terreno, se analiza por separado cada cuadro definido. En el ejemplo se realizó la nivelación por cuadros, haciendo una divisoria en la parte media del terreno donde se puede ver

claramente que hay un cambio de pendiente brusco, buscando reducir los volúmenes de corte y relleno y por ende el costo total de la nivelación (Figuras 6.8 y 6.9).

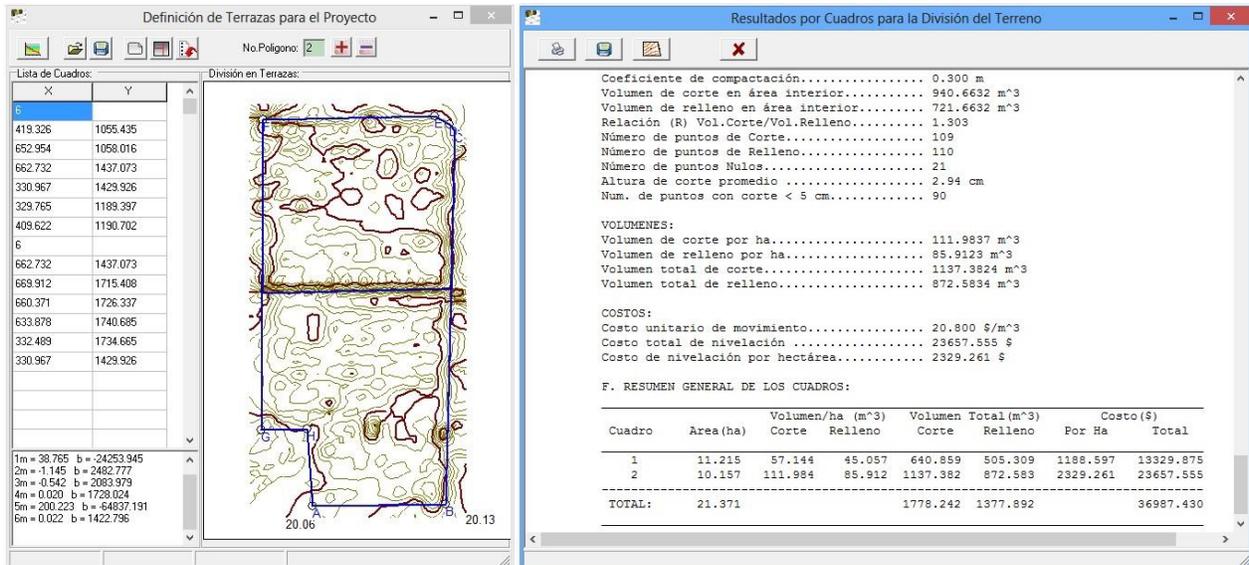
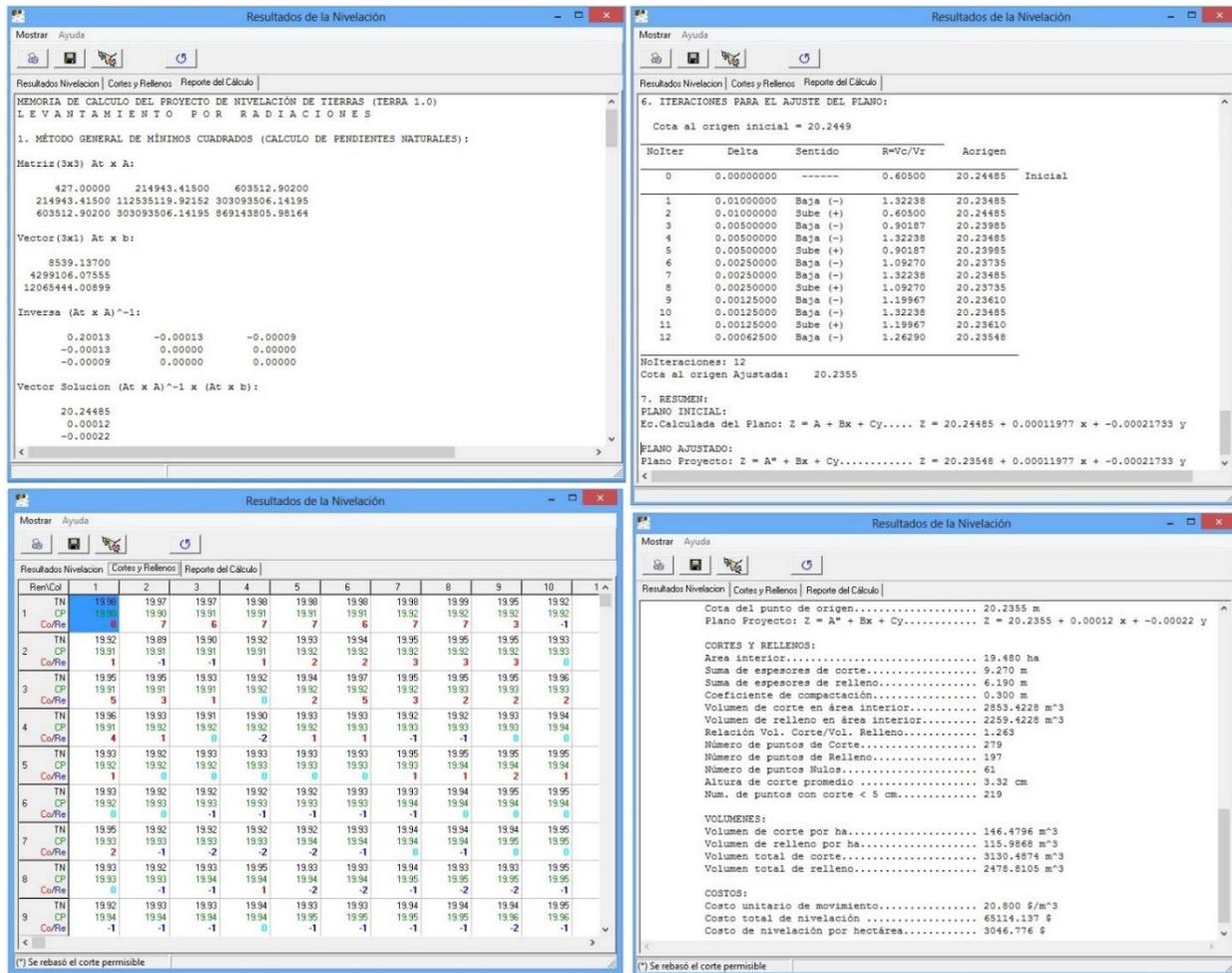


Figura 6.8. Resultados al dividir el terreno en 2 tablas independientes.

6.2.5. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN

Después de realizar los cálculos respectivos con los datos de entrada, TERRA proporciona con características detalladas información de todo el proyecto, agrupado en tres cejas: Resultados Nivelación, Cortes y Rellenos y Reporte o Memoria de Cálculo (Figura 6.9). Las secciones que se describen en los resultados son: Datos generales del proyecto, Parámetros del diseño, Coordenadas de la Poligonal y Resultados de la Nivelación (Generales, Ajuste al Plano, Cortes y Rellenos, Volúmenes y Costos).



6.2.6. ESTIMACIÓN DE COSTOS

Al dividir el terreno en dos cuadros con base en la topografía del terreno natural, el costo total de nivelación para el ejemplo de las figuras 6.8 y 6.9, y cuadro 6.1, tuvo una reducción del 43%, de \$65,114.14 a \$36,987.43; considerando el costo/m³ del movimiento de tierra en \$20.80/m³; lo cual mejoró el diseño inicial sin divisiones considerando solamente pendientes naturales promedio.

Cuadro 6.1. Comparación de volúmenes y costos para el ejemplo, aplicando la nivelación al terreno completo vs el predio dividido en dos cuadros según topografía del terreno natural.

No. Cuadro	Area(ha)	Volumen/ha (m ³)		Volumen Total(m ³)		Costo(\$)	
		Corte	Relleno	Corte	Relleno	Por Ha	Total
1	21.371	146.48	115.987	3,130.487	2,478.810	3,046.77	65,114.13
2	21.371			1,778.242	1,377.892		36,987.43
2a	11.215	57.144	45.057	640.859	505.309	1,188.59	13,329.87
2b	10.157	111.98	85.912	1137.382	872.583	2,329.26	23,657.55

El valor de 1 en No.Cuadro, indica que el terreno no fue dividido.

6.2.7. PLANOS DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN

Una vez calculado el proyecto, TERRA permite determinar y dibujar las curvas de nivel representativas de la cuadrícula analizada mostrando un plano del terreno nivelado. De igual manera que la topografía del terreno natural se usa el método de Kriging o el del Inverso de la Distancia. También se presenta un plano de cortes y rellenos, y un diagrama de bloques de cortes y rellenos que sirve como guía al tractorista para el trabajo de la nivelación en campo. La figura 6.10, muestra los planos generados para un solo cuadro.

Resumen de la nivelación en un solo cuadro

El resumen muestra los datos proporcionados al programa para realizar el proyecto de nivelación y los resultados principales del proyecto.

RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON TERRA 1.0

I. DATOS GENERALES

- 1. Identificación de lote Terrazas: Fernando Gaspar
- 2. Número de lote Lote No.100
- 3. Observaciones Ejido Tehuantepec

- 4. Número de Renglones 34
- 5. Número de columnas..... 17
- 6. Longitud de cuadrícula (m)..... 20.000

II. PARÁMETROS DEL DISEÑO

- 7. Coeficiente de compactación..... 0.300
- 8. Corte permisible (cm)..... 0.300
- 9. Pendiente deseada en X (%)..... Natural_X
- 10. Pendiente deseada en Y (%)..... Natural_Y

III. COORDENADAS DE LA POLIGONAL DEL TERRENO:

VERTICE	COORDENADA	
	X	Y
A	419.326	1055.435
B	652.954	1058.016
C	669.912	1715.408
D	660.371	1726.337
E	633.878	1740.685
F	332.489	1734.665
G	329.765	1189.397
H	409.622	1190.702

IV. RESULTADOS DE LA NIVELACIÓN:

(PENDIENTES NATURALES)

GENERALES:

- Superficie a nivelar 21.3715 ha
- Plano inicial: $Z = A + Bx + Cy$ $Z = 20.24485 + 0.00012 x + -0.00022 y$
- Pendiente natural en el eje X 0.01198 %
- Pendiente natural en el eje Y..... -0.02173 %

AJUSTE AL PLANO:

- X centroidal..... 502.8243 m
- Y centroidal..... 1413.9234 m
- Cota(Z) centroidal..... 19.9980 m
- Cota del punto de origen..... 20.2355 m

Plano Proyecto: $Z = A'' + Bx + Cy$ $Z = 20.2355 + 0.00012 x + - 0.00022 y$

CORTES Y RELLENOS:

Area interior.....	19.480 ha
Suma de espesores de corte.....	9.270 m
Suma de espesores de relleno.....	6.190 m
Coefficiente de compactación.....	0.300 m
Volumen de corte en área interior.....	2853.4228 m ³
Volumen de relleno en área interior.....	2259.4228 m ³
Relación Vol. Corte/Vol. Relleno.....	1.263
Número de puntos de Corte.....	279
Número de puntos de Relleno.....	197
Número de puntos Nulos.....	61
Altura de corte promedio	3.32 cm
Num. de puntos con corte < 5 cm.....	219

VOLUMENES:

Volumen de corte por ha.....	146.4796 m ³
Volumen de relleno por ha.....	115.9868 m ³
Volumen total de corte.....	3130.4874 m ³
Volumen total de relleno.....	2478.8105 m ³

COSTOS:

Costo unitario de movimiento.....	20.800 \$/m ³
Costo total de nivelación	65114.137 \$
Costo de nivelación por hectárea.....	3046.776 \$

Cortes y Rellenos para un solo cuadro

Los cortes y rellenos finales son presentados por el programa en un cuadro con la información el terreno natural (TN), cota proyecto (CP) y el valor de corte (Co) en rojo, relleno (Re) en azul o de punto nulo en color cyan.

El informe de cortes, rellenos y puntos nulos del ejemplo 1 se puede ver en el cuadro 6.2. La cuadrícula generada por el sistema es a cada 20m de longitud en este caso, valor definido por el usuario en el programa.

Cuadro 6.2. Reporte de cortes, rellenos y puntos nulos para el ejemplo 1.

Resultados Nivelación		Cortes y Rellenos																	Reporte del Cálculo
Ren/Col		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	TN	19.98	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.95	19.92	19.96	19.97	19.98	19.98	19.97	19.99	20.01	
	CP	19.90	19.90	19.91	19.91	19.91	19.91	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	
	Co/Re	8	7	6	7	7	6	7	7	3	-1	4	4	5	5	4	5	7	
2	TN	19.92	19.89	19.90	19.92	19.93	19.94	19.95	19.95	19.95	19.93	19.94	19.93	19.95	19.95	19.94	19.96	20.00	
	CP	19.91	19.91	19.91	19.91	19.92	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	
	Co/Re	1	-1	-1	1	2	2	3	3	3	0	1	0	1	1	0	2	6	
3	TN	19.95	19.95	19.93	19.92	19.94	19.97	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.97	19.97	19.96	19.95	19.96	19.99	
	CP	19.91	19.91	19.91	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	
	Co/Re	5	3	1	0	2	5	3	2	2	2	2	3	4	2	1	1	4	
4	TN	19.96	19.93	19.91	19.90	19.93	19.93	19.92	19.92	19.93	19.94	19.93	19.94	19.94	19.97	19.96	19.94	19.98	
	CP	19.91	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	
	Co/Re	4	1	0	-2	1	1	-1	-1	0	0	-1	0	3	1	0	0	2	
5	TN	19.93	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.95	19.95	19.95	19.95	19.92	19.93	19.97	19.94	19.95	19.97	20.01	
	CP	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	
	Co/Re	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	1	-2	1	2	-1	1	6	
6	TN	19.93	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.94	19.95	19.95	19.93	19.94	19.95	19.93	19.94	19.96	20.01	
	CP	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	
	Co/Re	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	-1	0	-1	0	-3	-2	5	
7	TN	19.95	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.94	19.94	19.96	20.00	
	CP	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.97	
	Co/Re	2	-1	-2	-2	-2	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	-2	-2	-1	3	
8	TN	19.93	19.92	19.93	19.95	19.93	19.93	19.94	19.93	19.95	19.94	19.93	19.94	19.93	19.94	19.93	19.95	20.00	
	CP	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	
	Co/Re	0	-1	-1	1	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-3	-3	-2	3	
9	TN	19.92	19.93	19.93	19.94	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.95	19.94	19.93	19.94	19.94	19.95	19.98	20.02	
	CP	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	
	Co/Re	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-2	-3	-3	-3	-2	1	4	
10	TN	19.95	19.92	19.91	19.91	19.92	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.95	19.94	19.95	19.94	19.95	19.98	20.02	
	CP	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	
	Co/Re	1	-2	-3	-4	-3	-2	-2	-3	-2	-2	-2	-3	-3	-2	-2	0	4	
11	TN	19.96	19.93	19.92	19.91	19.91	19.91	19.91	19.91	19.90	19.92	19.93	19.93	19.92	19.91	19.92	19.95	20.02	
	CP	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	
	Co/Re	2	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-4	-4	-4	-4	-5	-6	-6	-3	4	
12	TN	19.94	19.92	19.92	19.91	19.91	19.91	19.91	19.91	19.91	19.91	19.93	19.93	19.93	19.91	19.91	19.94	20.02	
	CP	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	
	Co/Re	-1	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-6	-6	-6	-6	-4	-5	-7	-7	-4	3	
13	TN	19.95	19.91	19.90	19.91	19.91	19.90	19.91	19.92	19.91	19.91	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	20.00	
	CP	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	
	Co/Re	-1	-4	-6	-5	-6	-6	-5	-5	-7	-7	-6	-6	-6	-5	-6	-6	1	
14	TN	19.96	19.92	19.91	19.91	19.90	19.91	19.93	19.92	19.92	19.92	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.94	20.02	
	CP	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	
	Co/Re	0	-4	-5	-5	-6	-6	-4	-5	-5	-6	-6	-7	-6	-6	-5	-5	2	
15	TN	19.95	19.90	19.91	19.91	19.90	19.89	19.92	19.91	19.91	19.93	19.91	19.93	19.93	19.90	19.93	19.95	20.01	
	CP	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	
	Co/Re	-1	-7	-6	-6	-7	-9	-6	-7	-7	-6	-7	-6	-7	-9	-7	-5	1	
16	TN	20.06	20.02	19.99	20.01	20.01	20.00	20.02	20.02	20.02	20.04	20.03	20.03	20.03	20.06	20.03	20.03	20.05	19.97
	CP	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
	Co/Re	9	5	2	3	4	2	4	4	3	3	5	4	4	6	3	4	-3	
17	TN	20.06	20.02	20.02	20.02	20.02	20.04	20.05	20.05	20.06	20.07	20.06	20.06	20.08	20.07	20.07	20.07	20.10	
	CP	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	
	Co/Re	9	5	4	4	4	6	6	6	7	8	6	6	8	7	6	7	9	
18	TN	20.05	20.01	20.00	20.00	20.00	20.02	20.02	20.01	20.02	20.03	20.03	20.03	20.04	20.05	20.05	20.07	20.13	
	CP	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	
	Co/Re	7	3	2	2	1	3	3	3	2	3	3	3	4	4	6	12		
19	TN	20.05	20.02	20.01	20.01	20.00	20.02	20.04	20.04	20.04	20.04	20.05	20.06	20.05	20.06	20.06	20.09	20.13	
	CP	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	
	Co/Re	7	4	3	2	1	3	5	4	4	5	5	4	4	5	7	11		
20	TN	20.03	20.01	20.01	20.01	19.99	20.02	20.03	20.02	20.03	20.03	20.04	20.04	20.05	20.05	20.04	20.07	20.09	
	CP	19.98	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	
	Co/Re	5	3	2	2	0	2	3	2	2	3	3	3	4	4	3	5	7	
21	TN	20.03	20.01	20.02	20.03	20.04	20.03	20.04	20.06	20.04	20.04	20.06	20.06	20.05	20.06	20.05	20.07	20.09	
	CP	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	
	Co/Re	4	2	3	3	4	3	4	5	4	3	5	4	4	4	3	4	7	
22	TN	20.03	20.01	20.02	20.02	20.02	20.03	20.04	20.02	20.03	20.04	20.02	20.04	20.04	20.04	20.05	20.07	20.08	
	CP	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	
	Co/Re	3	2	2	2	1	3	3	3	1	2	2	1	2	2	2	4	6	
23	TN	20.03	20.03	20.04	20.05	20.04	20.04	20.05	20.07	20.05	20.04	20.05	20.04	20.05	20.06	20.05	20.05	20.09	
	CP	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.03	
	Co/Re	4	3	4	4	3	3	4	6	3	2	2	2	2	3	2	5	5	
24	TN	20.03	20.00	20.02	20.03	20.01	20.02	20.03	20.03	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.04	20.04	20.04	20.08	
	CP	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.03	20.04	
	Co/Re	3	0	1	2	0	0												

Reporte del cálculo para un solo cuadro

La memoria de cálculo generada hace un desglose de los cálculos realizados por el programa, éste es el soporte técnico del proyecto, bastará imprimirlo e integrarlo al expediente para tener el proyecto completo. A continuación se muestra la memoria de cálculo del ejemplo 1 para todo el predio, es decir para un solo cuadro.

MEMORIA DE CALCULO DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DE TIERRAS (TERRA 1.0)
L E V A N T A M I E N T O P O R R A D I A C I O N E S

1. MÉTODO GENERAL DE MÍNIMOS CUADRADOS (CALCULO DE PENDIENTES NATURALES):

Matriz(3x3) At x A:

```
      427.00000      214943.41500      603512.90200
214943.41500 112535119.92152 303093506.14195
603512.90200 303093506.14195 869143805.98164
```

Vector(3x1) At x b:

```
      8539.13700
4299106.07555
12065444.00899
```

Inversa (At x A)⁻¹:

```
      0.20013      -0.00013      -0.00009
-0.00013      0.00000      0.00000
-0.00009      0.00000      0.00000
```

Vector Solucion (At x A)⁻¹ x (At x b):

```
      20.24485
      0.00012
     -0.00022
```

Parámetros del Plano Cálculados:

```
Cota al Origen: 20.24485499
Pendiente X:    0.00011977 = 0.011977 %
Pendiente Y:    -0.00021733 = -0.021733 %
```

3. CALCULO DEL ÁREA Y CENTROIDE:

```
Area:          213714.89 m^2
Centroide x:   502.82 m
Centroide y:   1413.92 m
```

4. CALCULO DE LA COTA CENTROIDAL:

Zcentroidal (Zc): 19.9980 m

Coefficientes del plano $Z = A + Bx + Cy$:

$A = Zc - (B Xc + C Yc)$

A: 20.24485499

B: 0.00011977 = 0.011977 %

C: -0.00021733 = -0.021733 %

5. PROYECTO INICIAL.

INFORMACION DE CORTES/RELLENOS ANTES DEL AJUSTE

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
19.98	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.95	19.92	19.96	19.97	19.98	19.98	19.97	19.99	20.01	TN
19.91	19.91	19.92	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	CP
7	6	5	6	6	5	6	6	2	-2	3	3	4	4	3	4	6	C/R
19.92	19.89	19.90	19.92	19.93	19.94	19.95	19.95	19.95	19.93	19.94	19.93	19.95	19.95	19.94	19.96	20.00	TN
19.91	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	CP
0	-2	-2	0	1	1	2	2	2	-1	0	-1	0	0	-1	1	5	C/R
19.95	19.95	19.93	19.92	19.94	19.97	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.97	19.97	19.96	19.95	19.96	19.99	TN
19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	CP
4	2	0	-1	1	4	2	1	1	2	1	2	3	1	0	0	3	C/R
19.96	19.93	19.91	19.90	19.93	19.93	19.92	19.92	19.93	19.94	19.93	19.94	19.97	19.96	19.94	19.95	19.98	TN
19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	CP
3	0	-1	-3	0	0	-2	-2	-1	-1	-2	-1	2	0	-1	-1	2	C/R
19.93	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	19.95	19.95	19.95	19.95	19.92	19.93	19.97	19.94	19.95	19.97	20.01	TN
19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	CP
0	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	0	-3	-2	1	-2	-1	0	5	C/R
19.93	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.93	19.94	19.95	19.95	19.93	19.94	19.95	19.93	19.94	19.96	20.01	TN
19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	CP
-1	-1	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-4	-3	-1	4	C/R
19.95	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.94	19.94	19.96	20.00	TN
19.94	19.94	19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	CP
1	-2	-2	-3	-3	-2	-1	-2	-1	-1	-2	-1	-1	-3	-3	-2	3	C/R
19.93	19.92	19.93	19.95	19.93	19.93	19.94	19.93	19.93	19.95	19.94	19.93	19.94	19.93	19.93	19.95	20.00	TN
19.94	19.94	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	CP
-1	-2	-2	0	-2	-3	-2	-3	-3	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-3	2	C/R
19.92	19.93	19.93	19.94	19.93	19.93	19.94	19.94	19.94	19.95	19.94	19.93	19.94	19.94	19.95	19.98	20.02	TN
19.95	19.95	19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	CP
-2	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-3	0	3	C/R
19.95	19.92	19.91	19.91	19.92	19.93	19.93	19.93	19.94	19.94	19.95	19.94	19.94	19.95	19.95	19.98	20.02	TN
19.95	19.95	19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	CP
0	-3	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-4	-4	-3	-3	-1	3	C/R
19.96	19.93	19.92	19.91	19.91	19.91	19.91	19.91	19.90	19.92	19.93	19.93	19.92	19.91	19.92	19.95	20.02	TN
19.95	19.96	19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	CP
1	-3	-4	-5	-5	-6	-6	-7	-5	-5	-5	-5	-6	-7	-6	-3	3	C/R
19.94	19.92	19.92	19.91	19.91	19.91	19.91	19.91	19.91	19.91	19.93	19.93	19.93	19.91	19.91	19.94	20.02	TN
19.96	19.96	19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	CP
-1	-4	-5	-5	-5	-6	-6	-6	-7	-7	-5	-5	-6	-8	-8	-5	2	C/R
19.95	19.91	19.90	19.91	19.91	19.90	19.91	19.92	19.91	19.91	19.92	19.92	19.93	19.93	19.93	19.93	20.00	TN
19.96	19.97	19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	CP
-1	-5	-7	-6	-7	-7	-6	-6	-7	-8	-7	-7	-7	-6	-7	-6	0	C/R
19.96	19.92	19.91	19.91	19.90	19.91	19.93	19.92	19.92	19.93	19.92	19.92	19.92	19.92	19.93	19.94	20.02	TN
19.97	19.97	19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	CP
-1	-5	-6	-6	-7	-7	-5	-6	-6	-6	-7	-7	-7	-7	-7	-6	1	C/R

TERRA 1.0, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

19.95	19.90	19.91	19.91	19.90	19.89	19.92	19.91	19.91	19.93	19.91	19.93	19.93	19.90	19.93	19.95	20.01	TN
19.97	19.97	19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	CP
-2	-8	-7	-7	-8	-10	-6	-8	-8	-7	-8	-7	-8	-10	-8	-6	0	C/R
20.06	20.02	19.99	20.01	20.01	20.00	20.02	20.02	20.02	20.04	20.03	20.03	20.06	20.03	20.03	20.05	19.97	TN
19.98	19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	CP
8	4	1	3	3	1	3	2	2	4	3	3	5	2	2	3	-4	C/R
20.06	20.02	20.02	20.02	20.02	20.04	20.05	20.05	20.06	20.07	20.06	20.06	20.08	20.07	20.07	20.07	20.10	TN
19.98	19.98	19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	CP
8	4	3	3	3	5	5	5	6	7	5	6	7	6	5	6	9	C/R
20.05	20.01	20.00	20.00	20.00	20.02	20.02	20.01	20.02	20.03	20.03	20.03	20.04	20.05	20.05	20.07	20.13	TN
19.98	19.99	19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	CP
6	2	1	1	0	2	2	1	2	2	2	2	3	3	3	5	11	C/R
20.05	20.02	20.01	20.01	20.00	20.02	20.04	20.04	20.04	20.05	20.06	20.05	20.05	20.06	20.06	20.09	20.13	TN
19.99	19.99	19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	CP
6	3	2	1	0	2	4	3	3	4	4	3	3	4	4	7	10	C/R
20.03	20.01	20.01	20.01	19.99	20.02	20.03	20.02	20.03	20.04	20.04	20.04	20.05	20.05	20.04	20.07	20.09	TN
19.99	20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	CP
4	2	2	1	-1	1	2	1	1	2	2	2	2	3	3	2	4	C/R
20.03	20.01	20.02	20.03	20.04	20.03	20.04	20.06	20.04	20.04	20.06	20.06	20.05	20.06	20.05	20.07	20.09	TN
20.00	20.00	20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.04	CP
3	1	2	3	3	2	3	4	3	2	4	3	3	3	2	3	6	C/R
20.03	20.01	20.02	20.02	20.02	20.03	20.04	20.02	20.03	20.04	20.02	20.04	20.04	20.04	20.05	20.07		TN
20.00	20.00	20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.03	20.04	20.04	CP
2	1	1	1	1	2	2	0	1	1	0	1	1	1	1	1	4	C/R
20.03	20.03	20.04	20.05	20.04	20.04	20.05	20.07	20.05	20.04	20.05	20.04	20.05	20.06	20.05	20.09		TN
20.01	20.01	20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.03	20.04	20.04	20.04		CP
3	2	3	3	2	2	3	5	2	1	1	1	1	2	1	4		C/R
20.03	20.00	20.02	20.03	20.01	20.02	20.03	20.03	20.02	20.02	20.02	20.03	20.04	20.04	20.04	20.08		TN
20.01	20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.04	20.04	20.04	20.04	20.05		CP
2	-1	0	1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	0	3		C/R
20.03	20.02	20.03	20.03	20.04	20.02	20.02	20.04	20.06	20.04	20.04	20.07	20.07	20.07	20.07	20.08		TN
20.01	20.02	20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.04	20.04	20.04	20.04	20.04	20.05	20.05		CP
2	1	1	1	1	-1	-1	1	2	0	0	2	3	2	2	3		C/R
20.04	20.02	20.02	20.02	20.02	20.01	20.03	20.05	20.05	20.05	20.05	20.07	20.07	20.06	20.05	20.08		TN
20.02	20.02	20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.04	20.04	20.04	20.04	20.05	20.05	20.05	20.05	20.06		CP
2	0	0	0	-1	-2	0	1	1	1	1	2	2	1	0	2		C/R
20.09	20.05	20.04	20.03	20.05	20.06	20.05	20.05	20.05	20.09	20.07	20.06	20.06	20.05	20.05	20.08		TN
20.02	20.03	20.03	20.03	20.03	20.04	20.04	20.04	20.04	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05	20.06	20.06		CP
7	3	2	0	2	2	1	1	1	5	2	1	1	0	0	2		C/R
				20.08	20.04	20.03	20.03	20.04	20.13	20.04	20.07	20.07	20.05	20.06	20.15		TN
				20.04	20.04	20.04	20.04	20.05	20.05	20.05	20.05	20.06	20.06	20.06	20.06		CP
				4	0	-1	-2	-1	8	-1	1	1	-1	-1	9		C/R
				20.07	20.05	20.04	20.04	20.04	20.05	20.05	20.06	20.06	20.06	20.06	20.11		TN
				20.04	20.04	20.05	20.05	20.05	20.05	20.06	20.06	20.06	20.06	20.07	20.07		CP
				3	0	-1	-1	-2	0	-1	0	0	0	-1	4		C/R
				20.06	20.02	20.03	20.03	20.04	20.05	20.05	20.04	20.05	20.05	20.05	20.07		TN
				20.05	20.05	20.05	20.05	20.06	20.06	20.06	20.06	20.07	20.07	20.07	20.07		CP
				2	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-2	-2	0		C/R
				20.07	20.06	20.05	20.04	20.04	20.05	20.05	20.04	20.04	20.05	20.05	20.06		TN
				20.05	20.05	20.06	20.06	20.06	20.06	20.06	20.07	20.07	20.07	20.07	20.08		CP
				2	1	-1	-1	-3	-2	-2	-3	-3	-2	-3	-2		C/R
				20.07	20.06	20.05	20.05	20.05	20.05	20.04	20.04	20.04	20.04	20.03	20.05		TN
				20.05	20.06	20.06	20.06	20.06	20.07	20.07	20.07	20.07	20.08	20.08	20.08		CP
				2	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-5	-3		C/R
				20.08	20.06	20.05	20.05	20.06	20.06	20.05	20.04	20.04	20.03	20.02	20.06		TN
				20.06	20.06	20.06	20.07	20.07	20.07	20.07	20.08	20.08	20.08	20.08	20.09		CP
				2	-1	-1	-1	-1	-1	-3	-4	-4	-5	-7	-3		C/R
				20.05	20.04	20.04	20.05	20.05	20.06	20.06	20.05	20.06	20.06	20.02	20.07		TN
				20.06	20.07	20.07	20.07	20.07	20.08	20.08	20.08	20.08	20.09	20.09	20.09		CP
				-2	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-3	-2	-2	-6	-2		C/R

Valores Iniciales:

No.Cortes = 229
 No.Rellenos = 257
 No.PuntosNulos = 51
 Vcorte = 1900.7563
 Vrelleno = 3141.7563
 R = Vcorte/Vrelleno = 0.6050

6. ITERACIONES PARA EL AJUSTE DEL PLANO:

Cota al origen inicial = 20.2449

NoIter	Delta	Sentido	R=Vc/Vr	Aorigen	
0	0.00000000	-----	0.60500	20.24485	Inicial
1	0.01000000	Baja (-)	1.32238	20.23485	
2	0.01000000	Sube (+)	0.60500	20.24485	
3	0.00500000	Baja (-)	0.90187	20.23985	
4	0.00500000	Baja (-)	1.32238	20.23485	
5	0.00500000	Sube (+)	0.90187	20.23985	
6	0.00250000	Baja (-)	1.09270	20.23735	
7	0.00250000	Baja (-)	1.32238	20.23485	
8	0.00250000	Sube (+)	1.09270	20.23735	
9	0.00125000	Baja (-)	1.19967	20.23610	
10	0.00125000	Baja (-)	1.32238	20.23485	
11	0.00125000	Sube (+)	1.19967	20.23610	
12	0.00062500	Baja (-)	1.26290	20.23548	

NoIteraciones: 12

Cota al origen Ajustada: 20.2355

7. RESUMEN:

PLANO INICIAL:

$$Z = A + Bx + Cy \dots \dots \dots Z = 20.24485 + 0.00011977 x + -0.00021733 y$$

PLANO AJUSTADO (Plano Proyecto):

$$Z = A'' + Bx + Cy \dots \dots \dots Z = 20.23548 + 0.00011977 x + -0.00021733 y$$

Reporte de la división de predio en cuadros

En caso de haber dividido el terreno en cuadros, se presenta un resumen de los cálculos realizados para cada área.

TERRA 1.0, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

MEMORIA DE CALCULO CUADROS DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DE TIERRAS (TERRA 1.0)
L E V A N T A M I E N T O P O R R A D I A C I O N E S

A. POLIGONOS PARA EL DISEÑO DE LOS CUADROS

No Datos Totales: 427

Parametros de la linea Divisoria ($Y = mX + b$):

m: 0.022

b: 1422.795

Puntos de Interseccion:

Pinicial: 288.000,1429.000

Pfinal : 845.000,1441.000

Max/Min de los datos:

Max: 659.765,1725.435,20.154

Min: 339.765,1065.435,19.888

MaxPRO: 659.765,1725.435,20.081

MinPRO: 339.765,1065.435,19.901

Max/Min Extendidos:

COORDENADA		
VERTICE	X	Y

Poligono No. 1 :		
A	319.765	1745.435
B	679.765	1745.435
C	679.765	1437.750
D	319.765	1429.830

Poligono No. 2 :		
A	319.765	1429.830
B	679.765	1437.750
C	679.765	1045.435
D	319.765	1045.435

No Cuadros: 2

Cuadro No.1: 204

Cuadro No.2: 223

Areas y Centroides de los Cuadros:

Area(1): 112147.980 Centroide(1): 506.721,1258.382

Area(2): 101566.767 Centroide(2): 498.522,1585.669

B. MÉTODO GENERAL DE MÍNIMOS CUADRADOS (CALCULO DE PENDIENTES NATURALES):

RESUMEN CUADRO No.1: -----

PLANO INICIAL:

$Z = A + Bx + Cy \dots \dots \dots Z = 20.04857 + -0.00019574 x + -0.00018402 y$

$R = V_{\text{corte}}/V_{\text{relleno}} = 553.1548/436.1548 = 1.2683$

PLANO AJUSTADO (Plano Proyecto):

$$Z = A'' + Bx + Cy \dots\dots\dots Z = 20.04795 + -0.00019574 x + -0.00018402 y$$

RESUMEN DE RESULTADOS DEL CUADRO 1:

A. DATOS GENERALES:

- 1. Identificación de lote Terrazas: Fernando Gaspar
- 2. Número de lote Lote No.100
- 3. No de cuadro 1

- 4. Número de Renglones 19
- 5. Número de columnas..... 16
- 6. Longitud de cuadrícula (m)..... 20.000

B. PARÁMETROS DEL DISEÑO:

- 7. Coeficiente de compactación..... 0.300
- 8. Corte permisible (cm)..... 0.300
- 9. Pendiente deseada en X (%)..... Natural_X
- 10. Pendiente deseada en Y (%)..... Natural_Y

C. COORDENADAS DE LA POLIGONAL DEL TERRENO:

VERTICE	COORDENADA	
	X	Y
A	419.326	1055.435
B	652.954	1058.016
C	662.732	1437.073
D	330.967	1429.926
E	329.765	1189.397
F	409.622	1190.702

D. RESULTADOS DE LA NIVELACIÓN:

(PENDIENTES NATURALES)

GENERALES:

- Superficie a nivelar 11.2148 ha
- Plano inicial: $Z = A + Bx + Cy \dots\dots\dots Z = 20.04795 + -0.00020 x + -0.00018 y$
- Pendiente natural en el eje X -0.01957 %
- Pendiente natural en el eje Y..... -0.01840 %

AJUSTE AL PLANO:

- X centroidal..... 506.7207 m
- Y centroidal..... 1258.3822 m
- Cota(Z) centroidal..... 19.9940 m
- Cota del punto de origen..... 20.0479 m
- Plano Proyecto: $Z = A'' + Bx + Cy \dots\dots\dots Z = 20.0479 + -0.00020 x + -0.00018 y$

CORTES Y RELLENOS:

- Area interior..... 9.680 ha
- Suma de espesores de corte..... 1.570 m
- Suma de espesores de relleno..... 1.420 m
- Coeficiente de compactación..... 0.300 m
- Volumen de corte en área interior..... 553.1548 m³
- Volumen de relleno en área interior..... 436.1548 m³
- Relación (R) Vol.Corte/Vol.Relleno..... 1.268

TERRA 1.0, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

Número de puntos de Corte..... 109
 Número de puntos de Relleno..... 97
 Número de puntos Nulos..... 70
 Altura de corte promedio 1.44 cm
 Num. de puntos con corte < 5 cm..... 109

VOLUMENES:

Volumen de corte por ha..... 57.1441 m³
 Volumen de relleno por ha..... 45.0573 m³
 Volumen total de corte..... 640.8594 m³
 Volumen total de relleno..... 505.3086 m³

COSTOS:

Costo unitario de movimiento..... 20.800 \$/m³
 Costo total de nivelación 13329.875 \$
 Costo de nivelación por hectárea..... 1188.597 \$

RESUMEN CUADRO No.2: -----

PLANO INICIAL:

$$Z = A + Bx + Cy \dots Z = 20.13265 + -0.00072224 x + -0.00013249 y$$

$$R = V_{\text{corte}}/V_{\text{relleno}} = 940.6632/721.6632 = 1.3035$$

PLANO AJUSTADO (Plano Proyecto):

$$Z = A'' + Bx + Cy \dots Z = 20.12765 + -0.00072224 x + -0.00013249 y$$

RESUMEN DE RESULTADOS DEL CUADRO2:

A. DATOS GENERALES:

1. Identificación de lote Terrazas: Fernando Gaspar
2. Número de lote Lote No.100
3. No de cuadro 2
4. Número de Renglones 15
5. Número de columnas..... 16
6. Longitud de cuadrícula (m)..... 20.000

B. PARÁMETROS DEL DISEÑO:

7. Coeficiente de compactación..... 0.300
8. Corte permisible (cm)..... 0.300
9. Pendiente deseada en X (%)..... Natural_X
10. Pendiente deseada en Y (%)..... Natural_Y

C. COORDENADAS DE LA POLIGONAL DEL TERRENO:

VERTICE	COORDENADA	
	X	Y
A	662.732	1437.073
B	669.912	1715.408
C	660.371	1726.337
D	633.878	1740.685
E	332.489	1734.665
F	330.967	1429.926

D. RESULTADOS DE LA NIVELACIÓN:
(PENDIENTES NATURALES)

GENERALES:

Superficie a nivelar 10.1567 ha
 Plano inicial: $Z = A + Bx + Cy$ $Z = 20.12765 + -0.00072 x + -0.00013 y$
 Pendiente natural en el eje X -0.07222 %
 Pendiente natural en el eje Y..... -0.01325 %

AJUSTE AL PLANO:

X centroidal..... 498.5221 m
 Y centroidal..... 1585.6688 m
 Cota(Z) centroidal..... 19.9739 m
 Cota del punto de origen..... 20.1277 m
 Plano Proyecto: $Z = A'' + Bx + Cy$ $Z = 20.1277 + -0.00072 x + -0.00013 y$

CORTES Y RELLENOS:

Area interior..... 8.400 ha
 Suma de espesores de corte..... 3.210 m
 Suma de espesores de relleno..... 2.100 m
 Coeficiente de compactación..... 0.300 m
 Volumen de corte en área interior..... 940.6632 m³
 Volumen de relleno en área interior..... 721.6632 m³
 Relación (R) Vol.Corte/Vol.Relleno..... 1.303
 Número de puntos de Corte..... 109
 Número de puntos de Relleno..... 110
 Número de puntos Nulos..... 21
 Altura de corte promedio 2.94 cm
 Num. de puntos con corte < 5 cm..... 90

VOLUMENES:

Volumen de corte por ha..... 111.9837 m³
 Volumen de relleno por ha..... 85.9123 m³
 Volumen total de corte..... 1137.3824 m³
 Volumen total de relleno..... 872.5834 m³

COSTOS:

Costo unitario de movimiento..... 20.800 \$/m³
 Costo total de nivelación 23657.555 \$
 Costo de nivelación por hectárea..... 2329.261 \$

F. RESUMEN GENERAL DE LOS CUADROS:

Cuadro	Area (ha)	Volumen/ha (m ³)		Volumen Total (m ³)		Costo (\$)	
		Corte	Relleno	Corte	Relleno	Por Ha	Total
1	11.215	57.144	45.057	640.859	505.309	1188.597	13329.875
2	10.157	111.984	85.912	1137.382	872.583	2329.261	23657.555
TOTAL:		21.371		1778.242	1377.892		36987.430

6.3. EJEMPLO 2, LEVANTAMIENTO POR CUADRÍCULA REGULAR 9 X 9

Predio No 2. Nivelado en 1971 en el Ejido Tlayacapa, Morelos; propiedad del Sr. Sánchez. Levantamiento obtenido del libro: *“La Nivelación de Terrenos Agrícolas (Coeficientes de Trueba). Samuel Trueba Coronel”*.

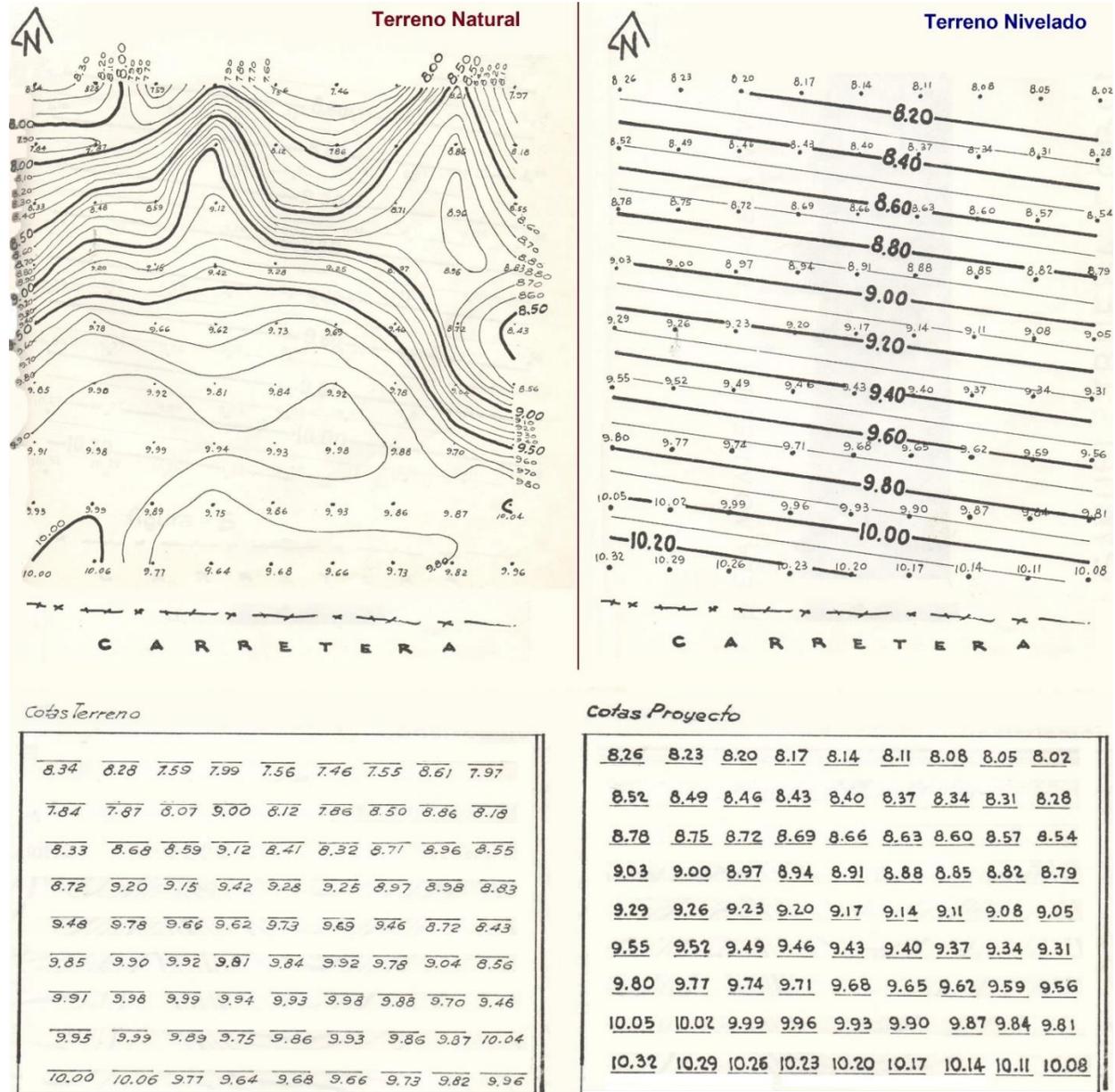


Figura 6.11. Ejemplo 2, levantamiento topográfico por cuadrícula

6.3.2. CAPTURA DE LA INFORMACIÓN DE UNA CUADRÍCULA RECTANGULAR

El software desarrollado permite procesar la información obtenida con un levantamiento con una cuadrícula rectangular, por lo que se puede aplicar la metodología tradicional para el cálculo de nivelación de tierras. En este caso ya existe la cuadrícula desde campo por lo que no hay necesidad de crear una nueva, como en el caso del levantamiento por radiaciones donde se genera la cuadrícula. El programa tiene definido una cuadrícula de máximo 50 x 50. La figura 6.12 muestra el cuadro de diálogo del programa donde se captura la información. En este cuadro de diálogo se especificará el tipo de levantamiento realizado, en este caso está seleccionada la opción cuadrícula homogénea, se han definido 9 renglones, 9 columnas y una longitud de cuadrícula de 20m.

Datos Topograficos para la Nivelación

Archivo Parametros de la Nivelación

Levantamiento por:

- Cuadrícula homogénea
- Distribución variable

Posición Actual: Col: 1 , Ren: 1

Coordenada [X,Y]:

Cuadrícula:

No. Renglones (Y): 9

No. Columnas (X): 9

Longitud de Cuadrícula (m): 20

Sistema de Coordenadas:

Referencia:

- Coordenadas Relativas
- Coordenadas UTM

Aceptar Cancelar

Datos de Campo:

Ren\Col	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	8.340	8.280	7.590	7.990	7.560	7.460	7.550	8.610	7.970
8	7.840	7.870	8.070	9.000	8.120	7.860	8.500	8.860	8.180
7	8.330	8.680	8.590	9.120	8.410	8.320	8.710	8.960	8.550
6	8.720	9.200	9.150	9.420	9.280	9.250	8.970	8.980	8.830
5	9.480	9.780	9.660	9.620	9.730	9.690	9.460	8.720	8.430
4	9.850	9.900	9.920	9.810	9.840	9.920	9.780	9.040	8.560
3	9.910	9.980	9.990	9.940	9.930	9.980	9.880	9.700	9.460
2	9.950	9.990	9.890	9.750	9.860	9.930	9.860	9.870	10.040
1	10.000	10.060	9.770	9.640	9.680	9.660	9.730	9.820	9.960

Figura 6.12. Captura de la información de un levantamiento por cuadrícula, ejemplo de 9 x 9.

6.3.3. PARÁMETROS DE DISEÑO Y POLIGONAL DEL TERRENO.

Los datos del proyecto tienen su propio cuadro de diálogo en el programa, habrá que especificar los datos generales del lote y los parámetros básicos que se ocupan en el diseño, como son: el coeficiente de compactación, el corte permisible y las pendientes longitudinales y transversales (figura 6.12).

Se debe definir las coordenadas de la poligonal del terreno en el cuadro de diálogo respectivo. Los vértices de la poligonal se enumeran automáticamente iniciando con la letra “A”, no es necesario duplicar el valor del vértice “A” al final para cerrar el polígono. Esta información permite calcular el área y centroide del terreno e iniciar con el cálculo del plano proyectado (figura 6.12).

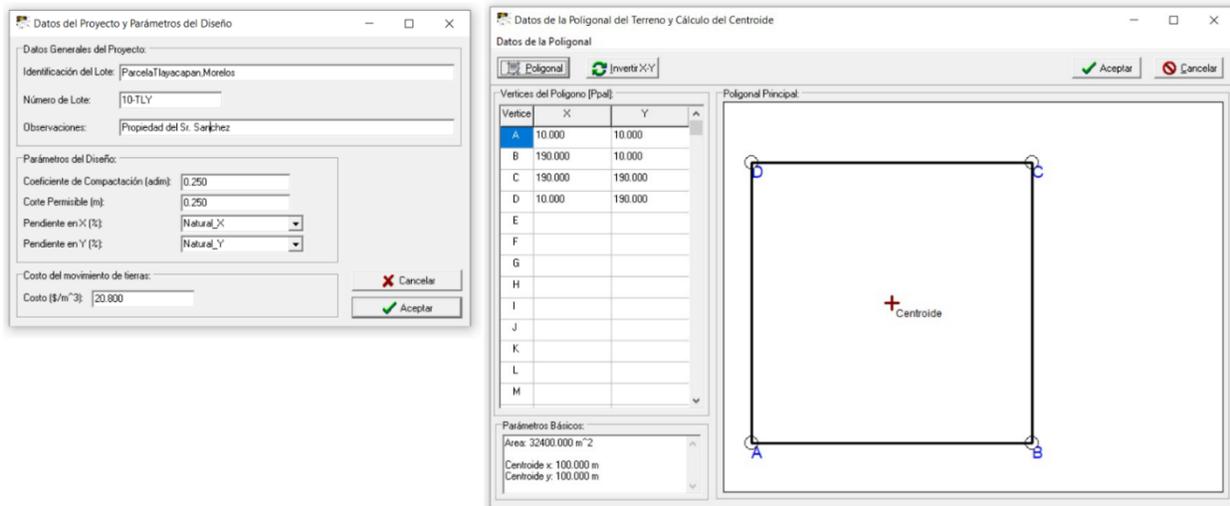


Figura 6.13. Información general del proyecto y poligonal del terreno, ejemplo 2.

6.3.4. RESULTADOS DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DEL EJEMPLO 2.

Después de introducir la información y generar el plano de topografía natural (figura 6.14), se ejecuta la nivelación, con los resultados que se muestran a continuación.

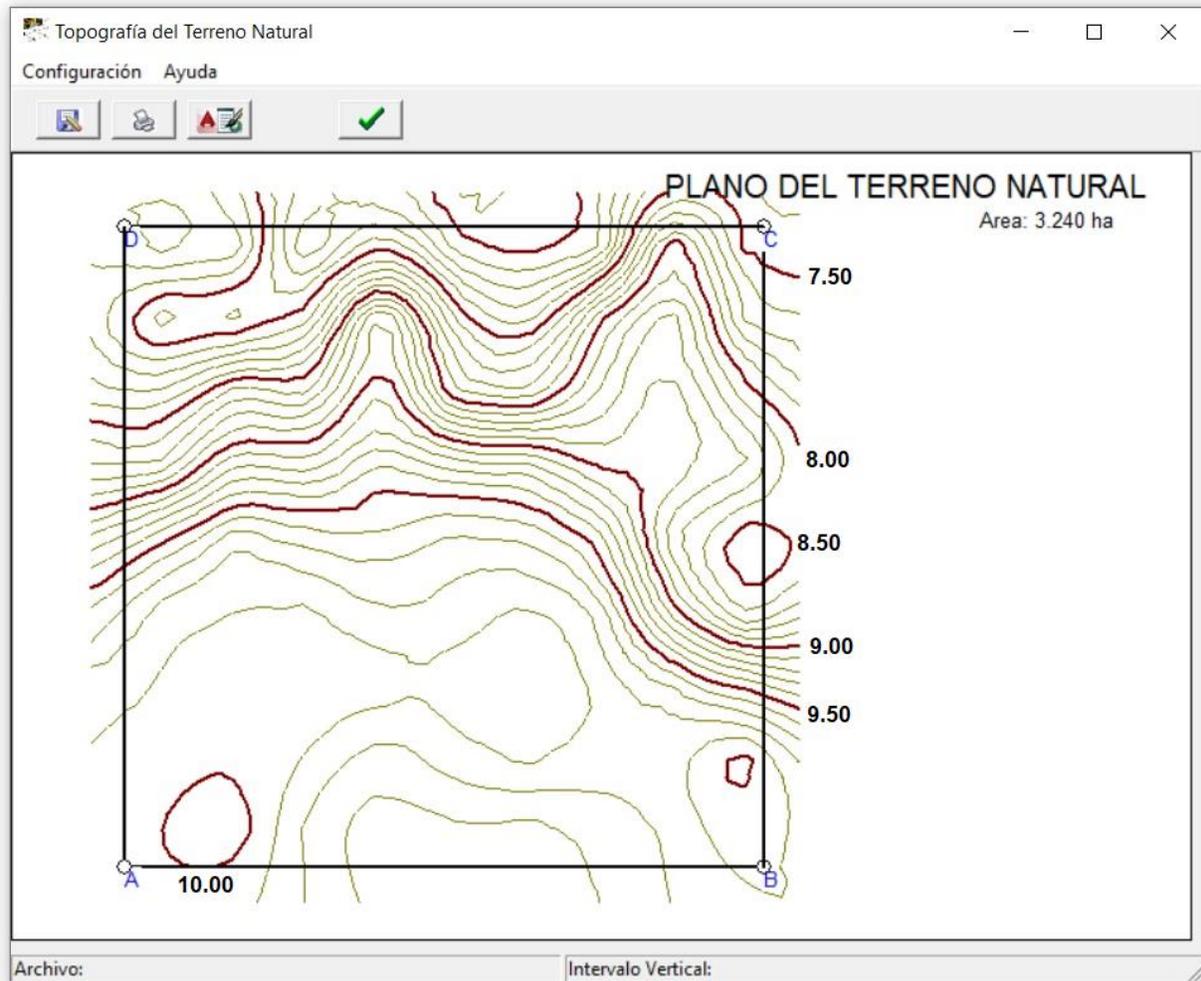


Figura 6.14. Topografía del predio de ejemplo 2, antes de la nivelación.

Resumen de la nivelación en un solo cuadro

A continuación se presenta el resumen del proyecto de nivelación sin divisiones.

RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON TERRA 1.0

I. DATOS GENERALES

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| 1. Identificación de lote | Parcela Tlayacapan, Morelos |
| 2. Número de lote | 10-TLY |
| 3. Observaciones | Propiedad del Sr. Sanchez |
| 4. Número de Renglones | 9 |
| 5. Número de columnas..... | 9 |
| 6. Longitud de cuadrícula (m)..... | 20.000 |

II. PARÁMETROS DEL DISEÑO

- | | |
|-------------------------------------|-------|
| 7. Coeficiente de compactación..... | 0.250 |
| 8. Corte permisible (cm)..... | 0.250 |

TERRA 1.0, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

9. Pendiente deseada en X (%)..... Natural_X
10. Pendiente deseada en Y (%)..... Natural_Y

III. COORDENADAS DE LA POLIGONAL DEL TERRENO:

VERTICE	COORDENADA	
	X	Y
A	10.000	10.000
B	190.000	10.000
C	190.000	190.000
D	10.000	190.000

IV. RESULTADOS DE LA NIVELACIÓN: (PENDIENTES NATURALES)

GENERALES:

Superficie a nivelar 3.2400 ha
Plano inicial: $Z = A + Bx + Cy$ $Z = 10.60531 + -0.00147 x + -0.01291 y$
Pendiente natural en el eje X -0.14722 %
Pendiente natural en el eje Y..... -1.29093 %

AJUSTE AL PLANO:

X centroidal..... 100.0000 m
Y centroidal..... 100.0000 m
Cota(Z) centroidal..... 9.1672 m
Cota del punto de origen..... 10.6378 m
Plano Proyecto: $Z = A'' + Bx + Cy$ $Z = 10.6378 + -0.00147 x + -0.01291 y$

CORTES Y RELLENOS:

Area interior..... 2.560 ha
Suma de espesores de corte..... 11.400 m
Suma de espesores de relleno..... 14.020 m
Coeficiente de compactación..... 0.250 m
Volumen de corte en área interior..... 3687.9820 m³
Volumen de relleno en área interior... 2965.9820 m³
Relación Vol. Corte/Vol. Relleno..... 1.243
Número de puntos de Corte..... 40
Número de puntos de Relleno..... 41
Número de puntos Nulos..... 0
Altura de corte promedio 28.50 cm
Núm. de puntos con corte < 5 cm..... 2

VOLUMENES:

Volumen de corte por ha..... 1440.6180 m³
Volumen de relleno por ha..... 1158.5867 m³
Volumen total de corte..... 4667.6022 m³
Volumen total de relleno..... 3753.8209 m³

COSTOS:

Costo unitario de movimiento..... 20.800 \$/m³
Costo total de nivelación 97086.125 \$
Costo de nivelación por hectárea..... 29964.853 \$

Cortes y Rellenos

El informe de cortes, rellenos y puntos nulos del ejemplo 2 se puede ver en el cuadro 6.3.

Cuadro 6.3. Reporte de cortes, rellenos y puntos nulos para el ejemplo 2.

Resultados Nivelacion		Cortes y Rellenos		Reporte del Cálculo						
Ren\Col		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	TN	8.34	8.28	7.59	7.99	7.56	7.46	7.55	8.61	7.97
	CP	8.28	8.26	8.23	8.20	8.17	8.14	8.11	8.08	8.05
	Co/Re	6	2	-64	-21	-61	-68	-56	* 53	-8
2	TN	7.84	7.87	8.07	9.00	8.12	7.86	8.50	8.86	8.18
	CP	8.54	8.51	8.48	8.45	8.43	8.40	8.37	8.34	8.31
	Co/Re	-70	-64	-41	* 55	-31	-54	13	* 52	-13
3	TN	8.33	8.68	8.59	9.12	8.41	8.32	8.71	8.96	8.55
	CP	8.80	8.77	8.74	8.71	8.68	8.65	8.62	8.59	8.57
	Co/Re	-47	-9	-15	* 41	-27	-33	9	* 37	-2
4	TN	8.72	9.20	9.15	9.42	9.28	9.25	8.97	8.98	8.83
	CP	9.06	9.03	9.00	8.97	8.94	8.91	8.88	8.85	8.82
	Co/Re	-34	17	15	* 45	* 34	* 34	9	13	1
5	TN	9.48	9.78	9.66	9.62	9.73	9.69	9.46	8.72	8.43
	CP	9.32	9.29	9.26	9.23	9.20	9.17	9.14	9.11	9.08
	Co/Re	16	* 49	* 40	* 39	* 53	* 52	* 32	-39	-65
6	TN	9.85	9.90	9.92	9.81	9.84	9.92	9.78	9.04	8.56
	CP	9.58	9.55	9.52	9.49	9.46	9.43	9.40	9.37	9.34
	Co/Re	* 27	* 35	* 40	* 32	* 38	* 49	* 38	-33	-78
7	TN	9.91	9.98	9.99	9.94	9.93	9.98	9.88	9.70	9.46
	CP	9.83	9.80	9.77	9.75	9.72	9.69	9.66	9.63	9.60
	Co/Re	8	18	22	19	21	* 29	22	7	-14
8	TN	9.95	9.99	9.89	9.75	9.86	9.93	9.86	9.87	10.04
	CP	10.09	10.06	10.03	10.00	9.97	9.94	9.92	9.89	9.86
	Co/Re	-14	-7	-14	-25	-11	-1	-6	-2	18
9	TN	10.00	10.06	9.77	9.64	9.68	9.66	9.73	9.82	9.96
	CP	10.35	10.32	10.29	10.26	10.23	10.20	10.17	10.14	10.11
	Co/Re	-35	-26	-52	-62	-55	-54	-44	-32	-15

Reporte del cálculo para un solo cuadro

La siguiente memoria de cálculo generada por el programa es considerando que la nivelación del predio fue en un solo cuadro, es decir, sin divisiones.

MEMORIA DE CALCULO DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DE TIERRAS (TERRA 1.0)
 LEVANTAMIENTO POR CUADRICULA

1. MÉTODO GENERAL DE MÍNIMOS CUADRADOS (CALCULO DE PENDIENTES NATURALES):

Matriz(3x3) At x A:

TERRA 1.0, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

```

81.00000      8100.00000      8100.00000
8100.00000    1026000.00000    810000.00000
8100.00000      810000.00000    1026000.00000
    
```

Vector(3x1) At x b:

```

742.54000
73936.00000
71465.60000
    
```

Inversa (At x A)^-1:

```

0.10494      -0.00046      -0.00046
-0.00046      0.00000      0.00000
-0.00046      0.00000      0.00000
    
```

Vector Solucion (At x A)^-1 x (At x b):

```

10.60531
-0.00147
-0.01291
    
```

Parámetros del Plano Calculados:

```

Cota al Origen: 10.60530864
Pendiente X:    -0.00147222 = -0.147222 %
Pendiente Y:    -0.01290926 = -1.290926 %
    
```

3. CALCULO DEL ÁREA Y CENTROIDE:

```

Area:          32400.00 m^2
Centroide x:   100.00 m
Centroide y:   100.00 m
    
```

4. CALCULO DE LA COTA CENTROIDAL:

Zcentroidal (Zc): 9.1672 m

Coefficientes del plano $Z = A + Bx + Cy$:

```

A = Zc - (B Xc + C Yc)
A: 10.60530864
B: -0.00147222 = -0.147222 %
C: -0.01290926 = -1.290926 %
    
```

5. PROYECTO INICIAL.

INFORMACION DE CORTES/RELLENOS ANTES DEL AJUSTE

1	2	3	4	5	6	7	8	9	
8.34	8.28	7.59	7.99	7.56	7.46	7.55	8.61	7.97	TN
8.25	8.22	8.19	8.16	8.13	8.10	8.08	8.05	8.02	CP
9	6	-60	-17	-57	-64	-53	56	-5	C/R
7.84	7.87	8.07	9.00	8.12	7.86	8.50	8.86	8.18	TN
8.51	8.48	8.45	8.42	8.39	8.36	8.33	8.30	8.27	CP
-67	-61	-38	58	-27	-50	17	56	-9	C/R

8.33	8.68	8.59	9.12	8.41	8.32	8.71	8.96	8.55	TN
8.77	8.74	8.71	8.68	8.65	8.62	8.59	8.56	8.53	CP
-44	-6	-12	44	-24	-30	12	40	2	C/R
8.72	9.20	9.15	9.42	9.28	9.25	8.97	8.98	8.83	TN
9.03	9.00	8.97	8.94	8.91	8.88	8.85	8.82	8.79	CP
-31	20	18	48	37	37	12	16	4	C/R
9.48	9.78	9.66	9.62	9.73	9.69	9.46	8.72	8.43	TN
9.28	9.26	9.23	9.20	9.17	9.14	9.11	9.08	9.05	CP
20	52	43	42	56	55	35	-36	-62	C/R
9.85	9.90	9.92	9.81	9.84	9.92	9.78	9.04	8.56	TN
9.54	9.51	9.48	9.45	9.43	9.40	9.37	9.34	9.31	CP
31	39	44	36	41	52	41	-30	-75	C/R
9.91	9.98	9.99	9.94	9.93	9.98	9.88	9.70	9.46	TN
9.80	9.77	9.74	9.71	9.68	9.65	9.62	9.60	9.57	CP
11	21	25	23	25	33	26	10	-11	C/R
9.95	9.99	9.89	9.75	9.86	9.93	9.86	9.87	10.04	TN
10.06	10.03	10.00	9.97	9.94	9.91	9.88	9.85	9.82	CP
-11	-4	-11	-22	-8	2	-2	2	22	C/R
10.00	10.06	9.77	9.64	9.68	9.66	9.73	9.82	9.96	TN
10.32	10.29	10.26	10.23	10.20	10.17	10.14	10.11	10.08	CP
-32	-23	-49	-59	-52	-51	-41	-29	-12	C/R

Valores Iniciales:

No.Cortes = 43
 No.Rellenos = 38
 No.PuntosNulos = 0
 Vcorte = 4188.6562
 Vrelleno = 2626.6562
 $R = Vcorte/Vrelleno = 1.5947$

6. ITERACIONES PARA EL AJUSTE DEL PLANO:

Cota al origen inicial = 10.6053

NoIter	Delta	Sentido	R=Vc/Vr	Aorigen	
0	0.00000000	-----	1.59467	10.60531	Inicial
1	0.01000000	Sube (+)	1.47870	10.61531	
2	0.01000000	Sube (+)	1.37078	10.62531	
3	0.01000000	Sube (+)	1.27013	10.63531	
4	0.01000000	Sube (+)	1.17643	10.64531	
5	0.01000000	Baja (-)	1.27013	10.63531	
6	0.00500000	Sube (+)	1.21259	10.64031	
7	0.00500000	Baja (-)	1.27013	10.63531	
8	0.00250000	Sube (+)	1.24343	10.63781	

NoIteraciones: 8

Cota al origen Ajustada: 10.6378

7. RESUMEN:

PLANO INICIAL:

$$Z = A + Bx + Cy \dots\dots\dots Z = 10.60531 + -0.00147222 x + -0.01290926 y$$

PLANO AJUSTADO (Plano Proyecto):

$$Z = A'' + Bx + Cy \dots\dots\dots Z = 10.63781 + -0.00147222 x + -0.01290926 y$$

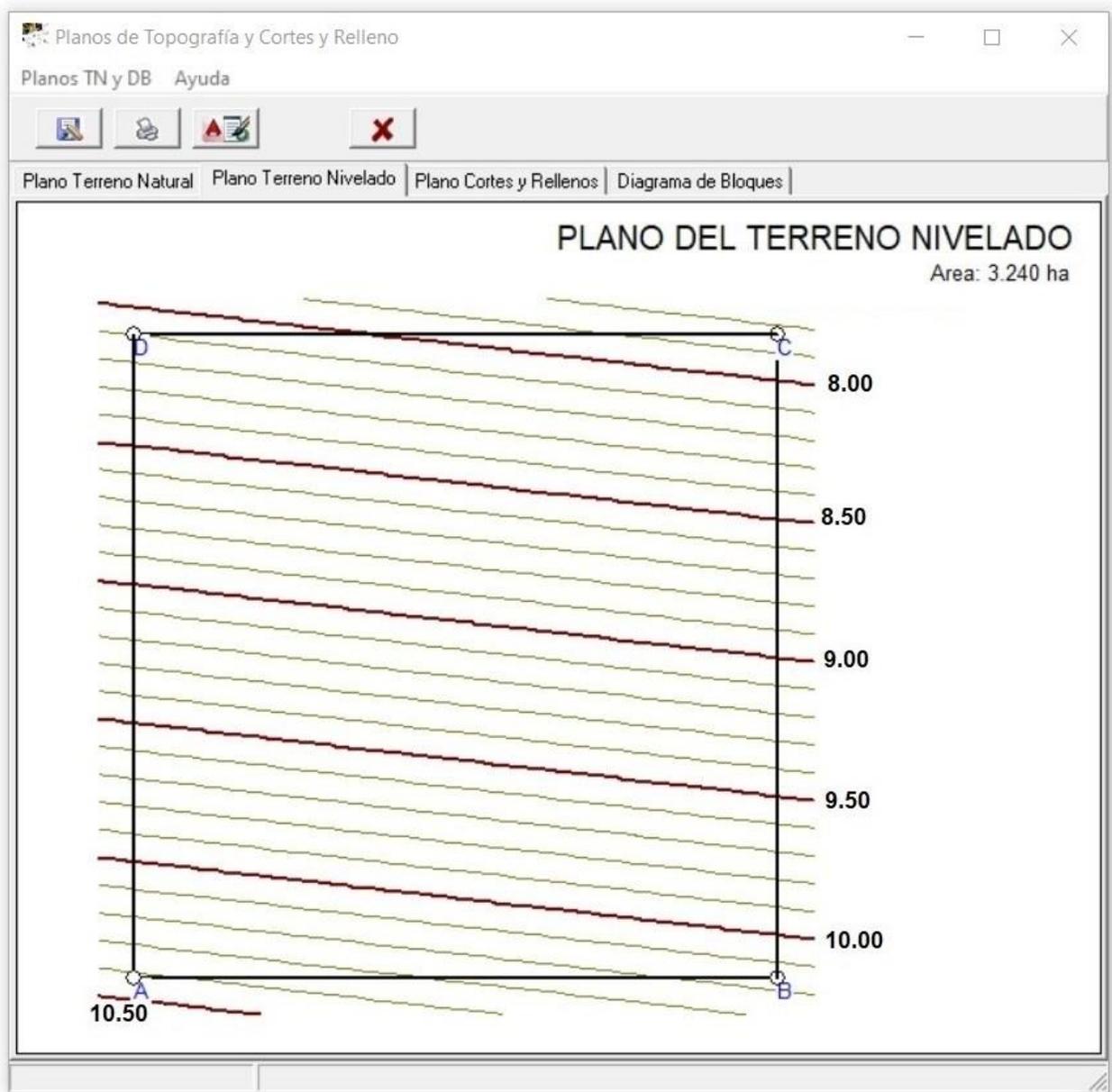


Figura 6.15. Plano del terreno nivelado (plano proyecto) para el ejemplo 2.

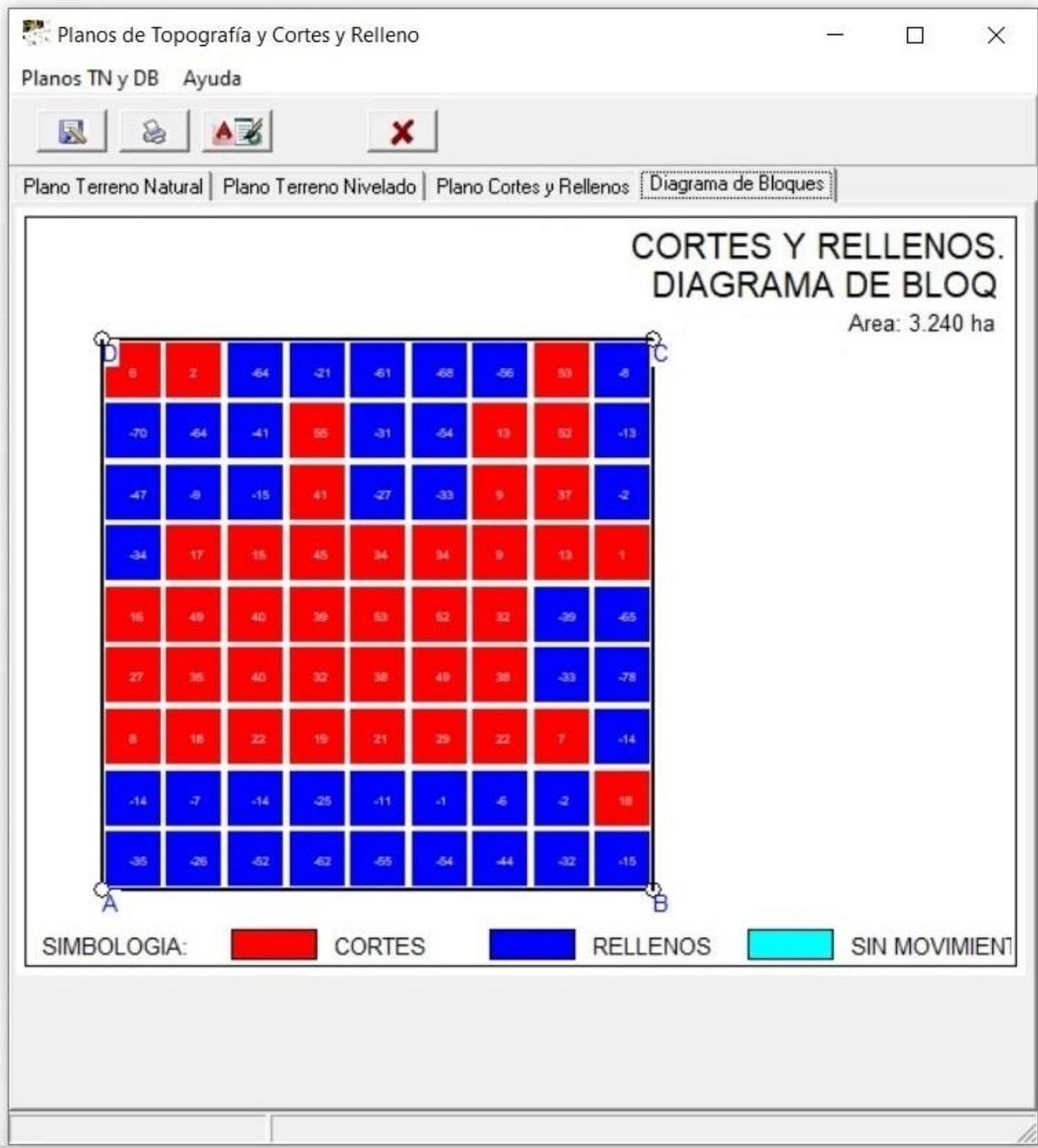


Figura 6.16. Diagrama de Bloques para el ejemplo 2.

TERRA 1.0, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

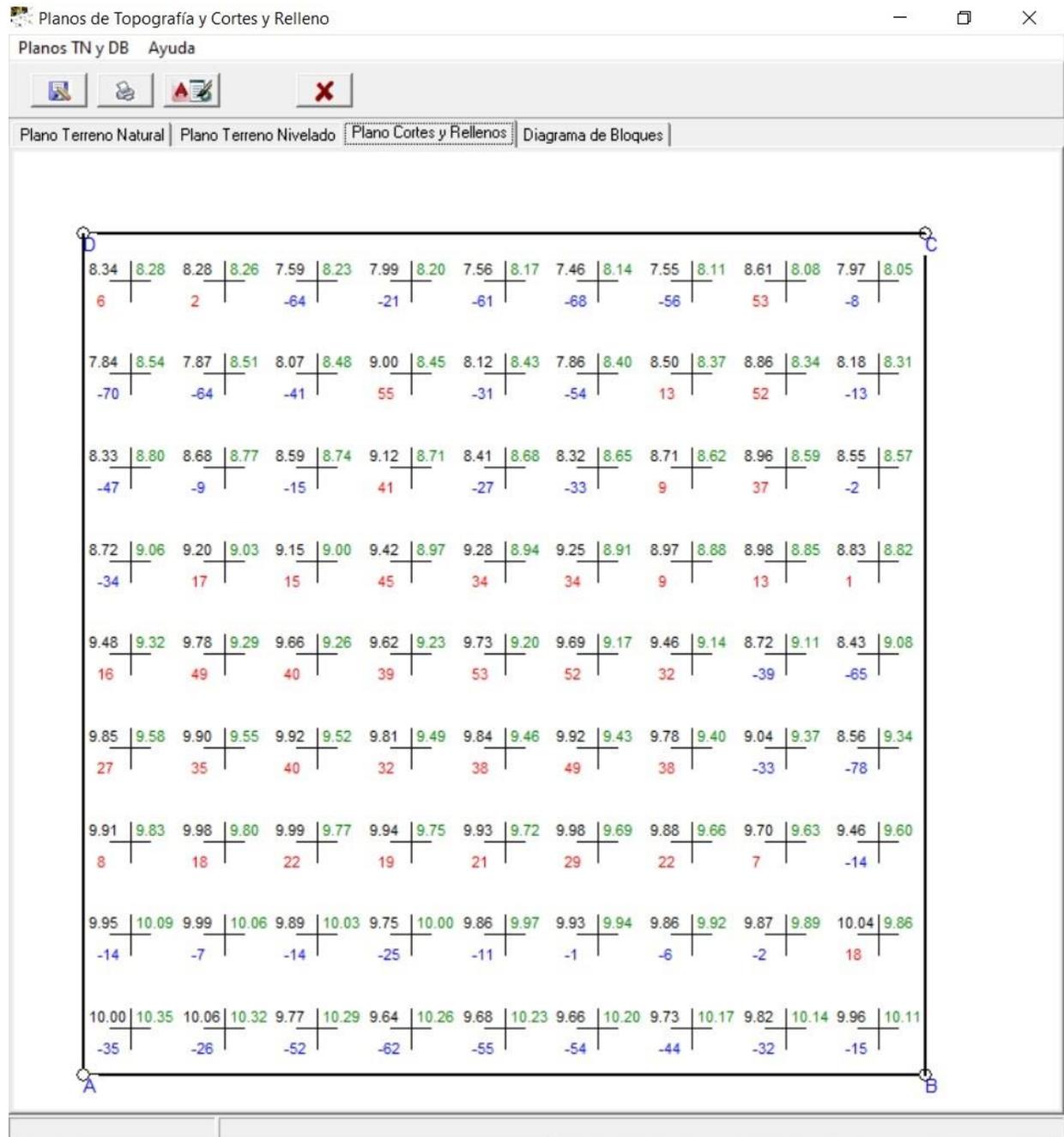


Figura 6.17. Plano de cortes y rellenos para el ejemplo 2.

6.4. EJEMPLO 3, LEVANTAMIENTO POR CUADRÍCULA REGULAR 5 X 6

Predio No.3. Ejemplo desarrollado en el manual de SINIVET 2.0, predio ubicado en el Distrito de Riego 011, La Begoña, Guanajuato; propiedad del Sr. Ezequiel Hernández (figura 6.18).

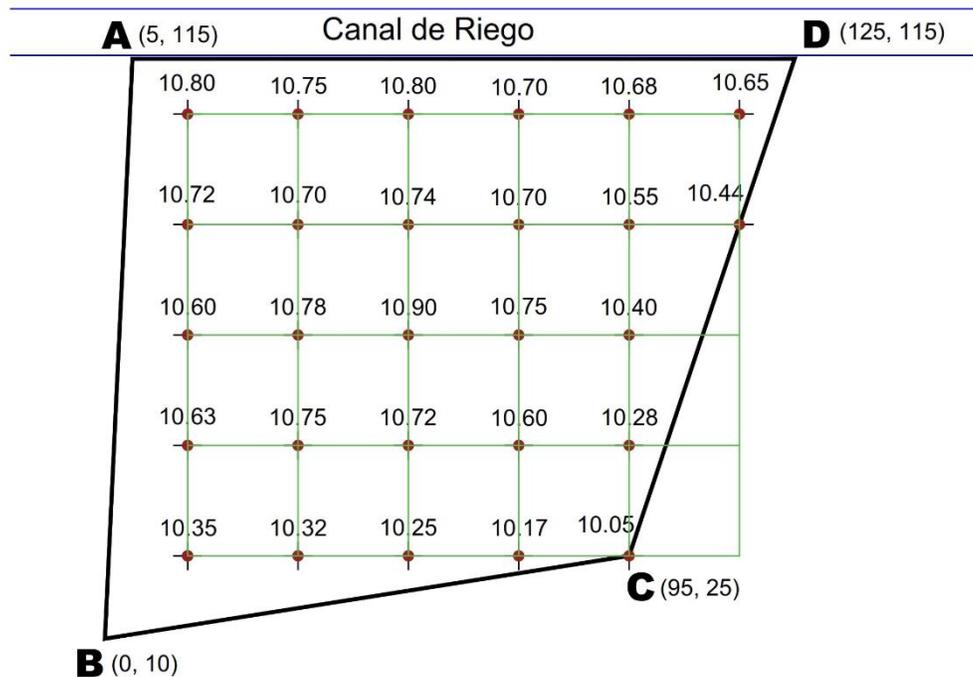


Figura 6.18. Ejemplo 3, levantamiento topográfico por cuadrícula

6.4.2. DATOS DE ENTRADA DEL EJEMPLO 3.

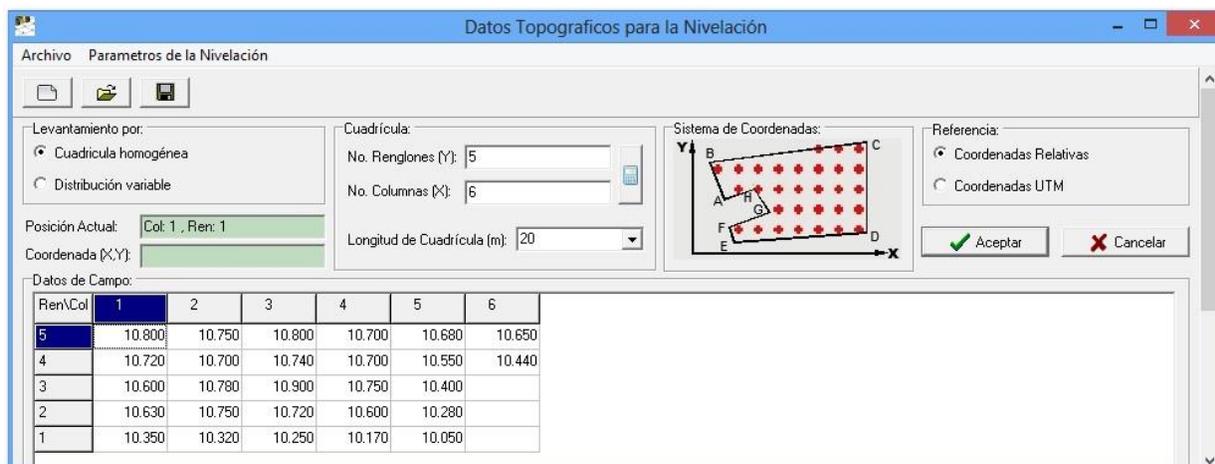


Figura 6.19. Captura de datos de la cuadrícula del ejemplo 3.

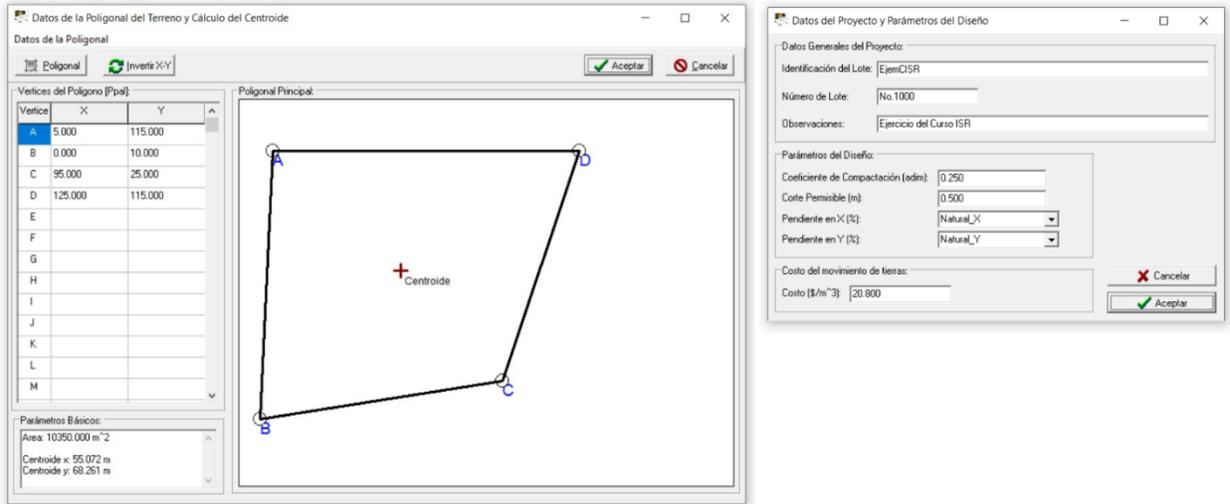


Figura 6.20. Parámetros de diseño y poligonal del terreno, del ejemplo 3.

6.4.3. RESULTADOS DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DEL EJEMPLO 3.

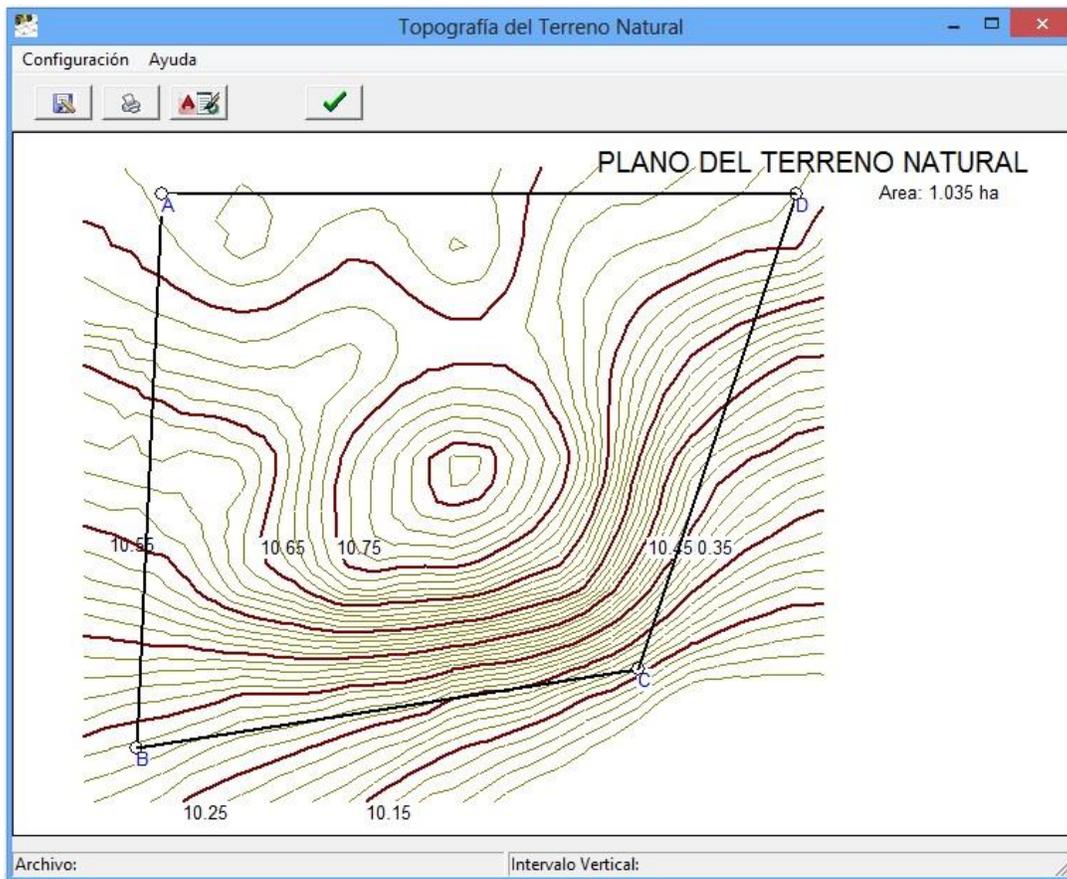


Figura 6.21. Topografía del terreno natural del ejemplo 3.

Resumen de la nivelación en un solo cuadro

RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON TERRA 1.0

I. DATOS GENERALES

- 1. Identificación de lote EjemCISR
- 2. Número de lote No.1000
- 3. Observaciones Ejercicio del Curso ISR
- 4. Número de Renglones 5
- 5. Número de columnas..... 6
- 6. Longitud de cuadrícula (m)..... 20.000

II. PARÁMETROS DEL DISEÑO

- 7. Coeficiente de compactación..... 0.250
- 8. Corte permisible (cm)..... 0.500
- 9. Pendiente deseada en X (%)..... Natural_X
- 10. Pendiente deseada en Y (%)..... Natural_Y

III. COORDENADAS DE LA POLIGONAL DEL TERRENO:

VERTICE	COORDENADA	
	X	Y
A	5.000	115.000
B	0.000	10.000
C	95.000	25.000
D	125.000	115.000

IV. RESULTADOS DE LA NIVELACIÓN:

(PENDIENTES NATURALES)

GENERALES:

- Superficie a nivelar 1.0350 ha
- Plano inicial: $Z = A + Bx + Cy$ $Z = 10.42350 + -0.00287 x + 0.00556 y$
- Pendiente natural en el eje X -0.28670 %
- Pendiente natural en el eje Y..... 0.55559 %

AJUSTE AL PLANO:

- X centroidal..... 55.0725 m
- Y centroidal..... 68.2609 m
- Cota(Z) centroidal..... 10.5844 m
- Cota del punto de origen..... 10.4610 m
- Plano Proyecto: $Z = A'' + Bx + Cy$ $Z = 10.4610 + -0.00287 x + 0.00556 y$

CORTES Y RELLENOS:

- Area interior..... 0.680 ha
- Suma de espesores de corte..... 1.130 m
- Suma de espesores de relleno..... 2.150 m
- Coeficiente de compactación..... 0.250 m
- Volumen de corte en área interior..... 342.7570 m³
- Volumen de relleno en área interior..... 275.7570 m³
- Relación Vol. Corte/Vol. Relleno..... 1.243
- Número de puntos de Corte..... 8

TERRA 1.0, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

Número de puntos de Relleno..... 18
 Número de puntos Nulos..... 1
 Altura de corte promedio 14.13 cm
 Núm. de puntos con corte < 5 cm..... 2

VOLUMENES:

Volumen de corte por ha..... 504.0544 m³
 Volumen de relleno por ha..... 405.5250 m³
 Volumen total de corte..... 521.6963 m³
 Volumen total de relleno..... 419.7184 m³

COSTOS:

Costo unitario de movimiento..... 20.800 \$/m³
 Costo total de nivelación 10851.284 \$
 Costo de nivelación por hectárea..... 10484.332 \$

Cortes y Rellenos

Cuadro 6.4. Reporte de cortes, rellenos y puntos nulos para el ejemplo 3.

Resultados Nivelacion		Cortes y Rellenos		Reporte del Cálculo			
Ren\Col		1	2	3	4	5	6
1	TN	10.80	10.75	10.80	10.70	10.68	10.65
	CP	10.96	10.90	10.84	10.79	10.73	10.67
	Co/Re	-16	-15	-4	-9	-5	-2
2	TN	10.72	10.70	10.74	10.70	10.55	10.44
	CP	10.85	10.79	10.73	10.68	10.62	10.56
	Co/Re	-13	-9	1	2	-7	-12
3	TN	10.60	10.78	10.90	10.75	10.40	
	CP	10.74	10.68	10.62	10.57	10.51	
	Co/Re	-14	10	28	18	-11	
4	TN	10.63	10.75	10.72	10.60	10.28	
	CP	10.63	10.57	10.51	10.45	10.40	
	Co/Re	0	18	21	15	-12	
5	TN	10.35	10.32	10.25	10.17	10.05	
	CP	10.51	10.46	10.40	10.34	10.29	
	Co/Re	-16	-14	-15	-17	-24	

Reporte del cálculo

MEMORIA DE CALCULO DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DE TIERRAS (TERRA 1.0)
L E V A N T A M I E N T O P O R C U A D R I C U L A

1. MÉTODO GENERAL DE MÍNIMOS CUADRADOS (CALCULO DE PENDIENTES NATURALES):

Matriz(3x3) At x A:

27.00000	1740.00000	1680.00000
1740.00000	138800.00000	111600.00000
1680.00000	111600.00000	126400.00000

Vector(3x1) At x b:

285.78000
18359.00000
17893.80000

Inversa (At x A)⁻¹:

0.32956	-0.00210	-0.00253
-0.00210	0.00004	-0.00001
-0.00253	-0.00001	0.00005

Vector Solucion (At x A)⁻¹ x (At x b):

10.42350
-0.00287
0.00556

Parámetros del Plano Cálculados:

Cota al Origen: 10.42350303
Pendiente X: -0.00286699 = -0.286699 %
Pendiente Y: 0.00555594 = 0.555594 %

3. CALCULO DEL ÁREA Y CENTROIDE:

Area: 10350.00 m²
Centroide x: 55.07 m
Centroide y: 68.26 m

4. CALCULO DE LA COTA CENTROIDAL:

Zcentroidal (Zc): 10.5844 m

Coeficientes del plano $Z = A + Bx + Cy$:

$A = Zc - (B Xc + C Yc)$
A: 10.42350303
B: -0.00286699 = -0.286699 %
C: 0.00555594 = 0.555594 %

TERRA 1.0, SISTEMA AUXILIAR EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE NIVELACIÓN DE TIERRAS

5. PROYECTO INICIAL.

INFORMACION DE CORTES/RELLENOS ANTES DEL AJUSTE

1	2	3	4	5	6	
10.80	10.75	10.80	10.70	10.68	10.65	TN
10.92	10.86	10.81	10.75	10.69	10.64	CP
-12	-11	-1	-5	-1	1	C/R
10.72	10.70	10.74	10.70	10.55	10.44	TN
10.81	10.75	10.70	10.64	10.58	10.52	CP
-9	-5	4	6	-3	-8	C/R
10.60	10.78	10.90	10.75	10.40		TN
10.70	10.64	10.58	10.53	10.47		CP
-10	14	32	22	-7		C/R
10.63	10.75	10.72	10.60	10.28		TN
10.59	10.53	10.47	10.42	10.36		CP
4	22	25	18	-8		C/R
10.35	10.32	10.25	10.17	10.05		TN
10.48	10.42	10.36	10.31	10.25		CP
-13	-10	-11	-14	-20		C/R

Valores Iniciales:

No.Cortes = 10
 No.Rellenos = 17
 No.PuntosNulos = 0
 Vcorte = 474.6961
 Vrelleno = 149.6961
 R = Vcorte/Vrelleno = 3.1711

6. ITERACIONES PARA EL AJUSTE DEL PLANO:

Cota al origen inicial = 10.4235

NoIter	Delta	Sentido	R=Vc/Vr	Aorigen	
0	0.00000000	-----	3.17106	10.42350	Inicial
1	0.01000000	Sube (+)	2.42582	10.43350	
2	0.01000000	Sube (+)	1.88762	10.44350	
3	0.01000000	Sube (+)	1.48880	10.45350	
4	0.01000000	Sube (+)	1.18661	10.46350	
5	0.01000000	Baja (-)	1.48880	10.45350	
6	0.00500000	Sube (+)	1.32356	10.45850	
7	0.00500000	Sube (+)	1.18661	10.46350	
8	0.00500000	Baja (-)	1.32356	10.45850	
9	0.00250000	Sube (+)	1.24297	10.46100	

NoIteraciones: 9

Cota al origen Ajustada: 10.4610

7. RESUMEN:

PLANO INICIAL:

$$Z = A + Bx + Cy \dots\dots\dots Z = 10.42350 + -0.00286699 x + 0.00555594 y$$

PLANO AJUSTADO (Plano Proyecto):

$$Z = A'' + Bx + Cy \dots\dots\dots Z = 10.46100 + -0.00286699 x + 0.00555594 y$$

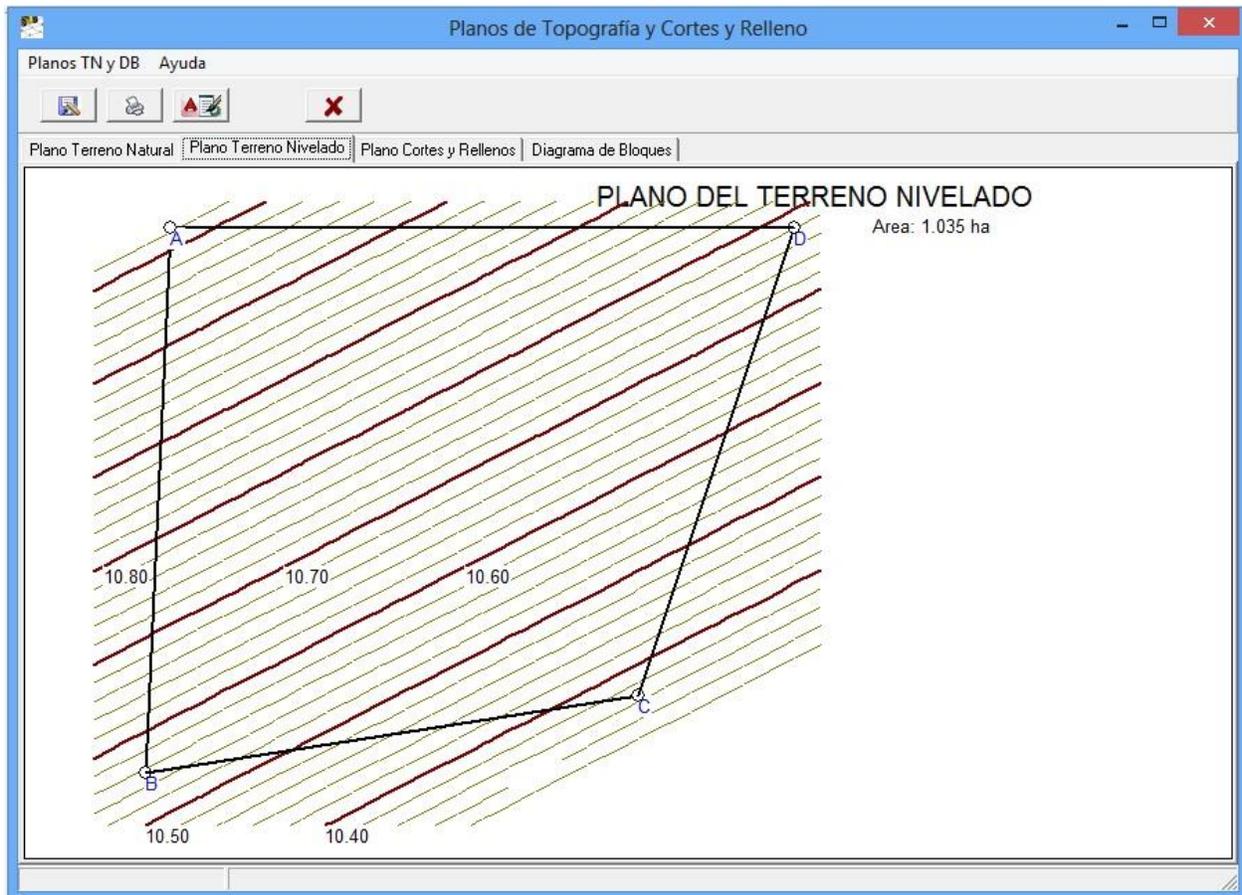


Figura 6.22. Topografía del terreno nivelado del ejemplo 3.

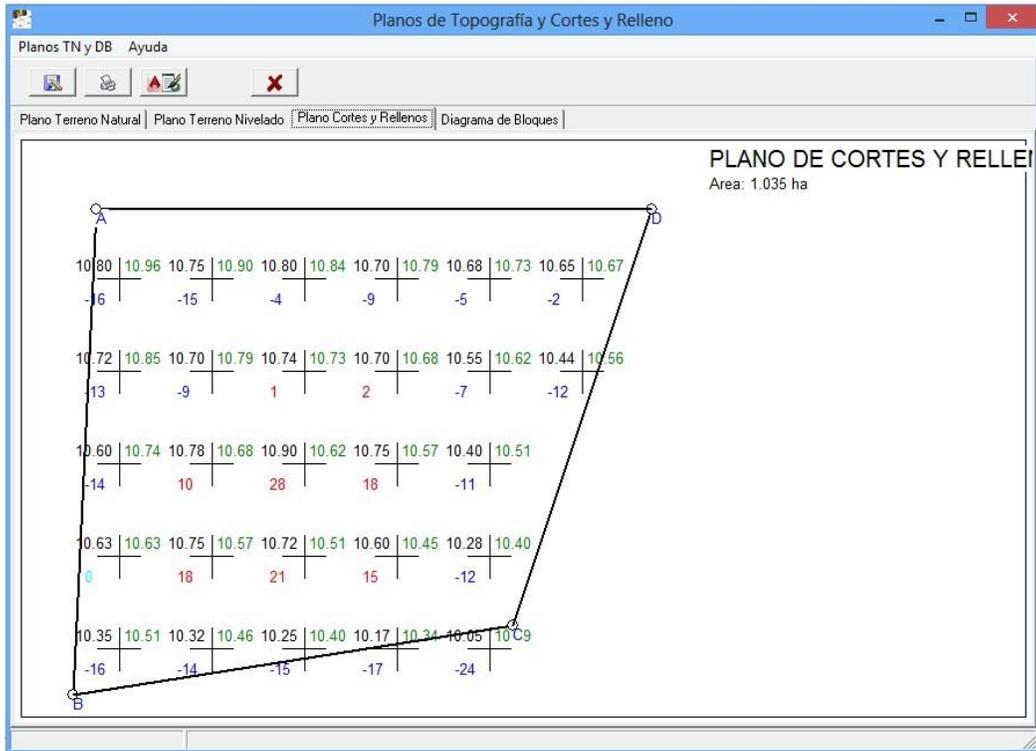


Figura 6.23. Plano de cortes y rellenos del ejemplo 3.

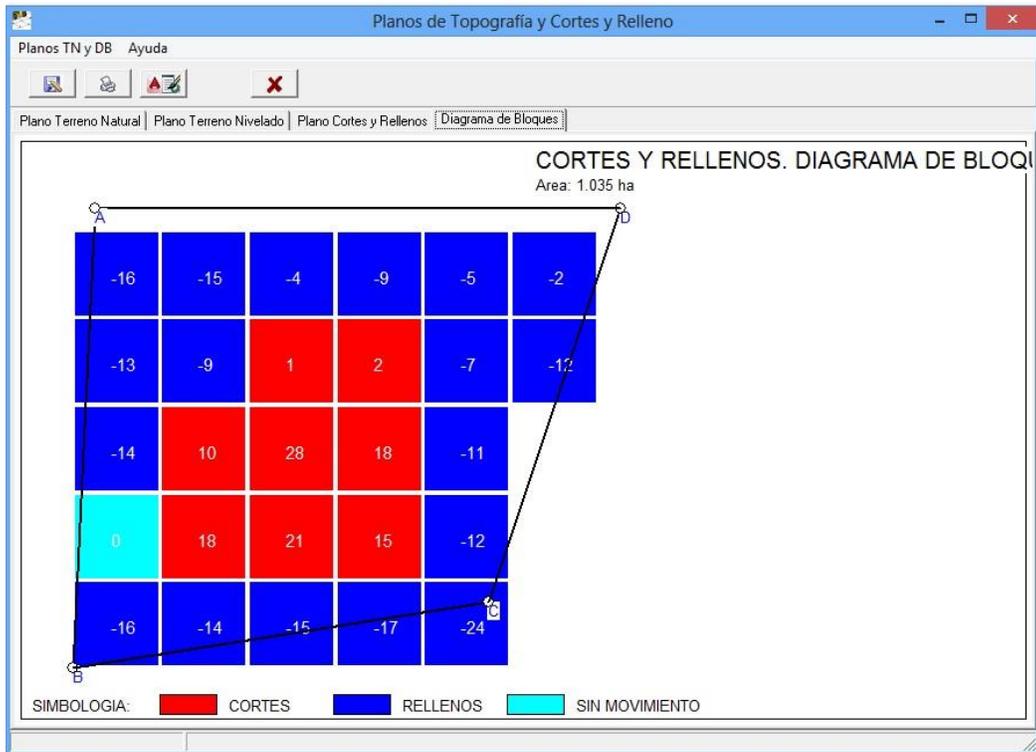


Figura 6.24. Topografía del terreno nivelado del ejemplo 3.

La mayor ventaja de TERRA (Figura 6.24), radica en el expediente para el cálculo de la nivelación de tierras, El expediente completo contiene de forma detallada como es que se han realizado los cálculos de nivelación, de tal forma, que el proyectista no necesitará más que anexar el expediente, en su papelería para llevar un control o bien para hacer alguna solicitud de apoyo económico a instituciones bancarias. En caso de que los planos generados no cubran las expectativas del proyectista, existe una opción en TERRA que permite exportar los planos a AutoCAD para darles el terminado final a gusto del usuario.



Figura 6.25. Portada del programa TERRA 1.0.

6.5. DISCUSIÓN.

En el año 2011, se iniciaron los trabajos del proyecto TERRA 1.0, planteándose la siguiente pregunta: ¿Es posible desarrollar un programa con la metodología propuesta anteriormente?. El nacimiento de TERRA la contesta de manera positiva. Cuando se inició el desarrollo del programa, se valoró el método a usar y dentro de las posibilidades estaba la generación del modelo digital del terreno por el método de triangulación pero se decidió usar Kriging, para evitar huecos en los lugares del terreno donde por alguna circunstancia el topógrafo tomó pocos datos (Figura 4.7 y c.12).

El proyecto realizado no es un caso experimental por lo que el planteamiento de la hipótesis se formuló complementando el objetivo del trabajo en relación a: *“Adaptarse a las nuevas tecnologías que implican la toma de información de los datos de campo, para el uso y aplicación de la nivelación de tierras”*. Como caso práctico, el algoritmo del programa TERRA se ha ocupado para nivelar predios en los distritos de riego del norte. El ejemplo mostrado en el presente trabajo es un terreno real ubicado en Mexicali con información tomada por una estación total, por radiaciones (Figura 6.3).

El método de Kriging es uno de los mejores estimadores geoestadísticos (Clark, 1979; Delhome, 1978) y se ha aplicado en una gran cantidad de trabajos. El objeto fundamental de usar Kriging en la nivelación de tierras, es generar un modelo digital de elevaciones (MDE) del terreno y calcular geoestadísticamente la elevación Z en cualquier punto del predio. En la antigüedad los levantamientos topográficos para la nivelación de tierras se hacían formando una cuadrícula regular (opción también integrada en el programa TERRA), pero con el avance de la tecnología los aparatos se hicieron más prácticos (estación total, GPS diferencial, Drones) y hoy en día se pueden levantar grandes masas de puntos en poco tiempo, pero los levantamientos se hacen sin seguir una distribución regular como se hacía en un inicio con el uso del tránsito y teodolito, aun cuando las recomendaciones para la nivelación es que se tomen puntos en forma regular, lo topógrafos no logran tomar los datos en forma de cuadrícula. Por lo que, el programa TERRA, hace una cuadrícula virtual o digital antes de cuantificar los volúmenes y

apoyándose con el método de Kriging, estima el valor de la Z en cada nodo de ella. El tener una cuadrícula perfecta (que en el documento y programa se denomina una cuadrícula homogénea) se hace necesario para que se pueda aplicar alguno de los métodos para la cuantificación de volumen a mover. El método que en México se usa de forma oficial es el método de los cuatro vértices (Marr, 1957; USDA, 1970; Walker 1987; Hernández y Sánchez, 2008); y para la estimación de volúmenes es necesario contar con datos del terreno en una cuadrícula.

Cano, 1997; describe varios métodos que se ocupan en España incluyendo el de los cuatro puntos o cuatro vértices y es el autor que describe mejor el procedimiento de la nivelación de tierras, incluso propone un programa para el cálculo y diseño de la nivelación con un ambiente gráfico poco elaborado, pero para un levantamiento en cuadrícula.

Existe software como el de la empresa Leica o el de Trimble (Anexo C), que lo han integrado a las niveladoras laser; hacen un recorrido inicial al terreno para determinar las pendientes naturales y definir el plano de nivelación y a partir del centroide del terreno, inician el proceso de nivelación. A medida que avanzan se va formando el plano del terreno natural y los cortes y rellenos realizados en tiempo real, pero no dan la oportunidad de saber si la cuantificación de los volúmenes es el adecuado. El costo total es uno de los parámetros más importantes para poder nivelar, puesto que algunos productores necesitan fuentes de financiamientos y por tanto un proyecto ejecutivo previo a la nivelación (que puede ser proporcionado por Terra).

De la revisión realizada acerca del tema de nivelación de tierras, no existe evidencia alguna de que se haya usado el Método de Kriging como apoyo para la estimación de los volúmenes de corte y relleno y por tanto es un procedimiento nuevo.

Si se observa el levantamiento hecho por radiaciones con una estación total de la figura 4.7, se puede observar que el equipo de campo, intentó tomar datos en forma de cuadrícula, pero en algunos lugares no fue posible. De la misma forma se puede ver que en la parte superior y superior derecha quedan huecos, que no podrán ser subsanados en

caso de usar algún método rígido como es la triangulación, quedando áreas sin información, de ahí que el uso de Kriging es una excelente propuesta dado que se podrá modelar la topografía de esas áreas con los datos tomados en campo.

En lo que respecta al ajuste del plano de nivelación de tierras como el esquematizado en la figura 4.9, se puede observar como una línea media continua y las líneas punteadas son los planos virtuales que se pueden generar con la misma pendiente, si se sube o baja el plano de nivelación para lograr un equilibrio entre cortes y rellenos.

Se ha demostrado que es necesario contar con un volumen mayor de corte que de relleno para cubrir las necesidades de este último por efecto de la compactación del suelo. Por lo tanto, es necesario modificar el plano proyecto de tal forma que se cumpla la condición de la ecuación (4.32). El cambio de volumen (Δ), generado al subir o bajar el plano proyecto, se puede estimar según Hernandez y Sánchez (2008) con la expresión (4.33 o 4.34). En la práctica se ha encontrado que esta relación R debe estar entre 1.10 y 1.50, dependiendo fundamentalmente de la textura del suelo y su mayor o menor contenido de materia orgánica (Walker, 1989).

“El plano de nivelación se debe generar y se genera por TERRA con los datos tomados en campo mediante un levantamiento topográfico en cualquiera de las formas que se realice. Si la estimación de los datos de la cuadrícula fueran inconsistentes, el cálculo de los delta para subir o bajar el plano sería imposible generando una gran cantidad de cortes y prácticamente cero rellenos o viceversa, y por tanto no se podría encontrar ese equilibrio necesario propuesto por (Walker, 1989) y comprobado en la práctica por (Hernández y Sánchez, 2008), dado que la expresión depende del cálculo de volumen de cortes y rellenos que se hagan, de tal forma, que deben estar acoplados; aunque sean valores que se obtienen de distintas fuentes (el plano proyecto de los datos de campo y los volúmenes de la Cuadrícula generada por Kriging). Se encontró que el método de Kriging se acopla de forma que el balance se obtiene y por tanto se puede encontrar el valor que se debe hacer al movimiento del plano, para ejercer la nivelación con el coeficiente de abundamiento deseado.

En los primeros años de trabajo en el algoritmo de ajuste del plano, se realizaron varios intentos de nivelación de tierras con serios problemas en el ajuste. Este algoritmo fue ajustado en forma práctica a invitación de la CONAGUA a participar en la capacitación para nivelar tierras en el proyecto RIGRAT (Riego por Gravedad Tecnificado), donde se probaron los algoritmos y se hicieron los ajustes correspondientes en campo.”

De lo anterior se puede concluir que **“TERRA toma en cuenta las especificaciones técnicas en cuanto a la determinación de pendientes, textura del suelo y cálculo de volúmenes para obtener resultados con un alto grado de confiabilidad”**.

Uno de los aspectos técnicos más importantes del presente trabajo es la generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) mediante el método de Kriging; para la determinación de alturas de corte o relleno y cuantificación de los volúmenes de corte y relleno, donde se aplica el método de los cuatro puntos sugerido por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (1970), y que aplica para su estimación una cuadrícula cuya área de influencia sea un cuadrado. Sin embargo, que tan acertado es el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) generado con el método de Kriging, respecto a los resultados obtenidos con un levantamiento usando una cuadrícula regular; ésta pregunta puede ser controversial en los resultados de TERRA y puede ser respondida haciendo un símil con otro programa. Esta es una comparación que puede hacerse con amplio sentido. Existen programas profesionales como ARCGIS, SURFER, QGIS, entre otros que pueden generar un Modelo de Elevación Digital (MDE), usando el método de Kriging. De tal forma, que se podría comparar el modelo generado por TERRA con otro generado por los programas antes mencionados y aplicarles alguna prueba estadística básica para ver la fiabilidad del modelo. Para verificar que el modelo de TERRA es técnicamente adecuado se comparó el MDE, generando un modelo similar con un programa profesional como SURFER (Golden Software, Inc. 2011); los modelos se muestran en la figura 6.27.

El MDE creado por TERRA para el ejemplo 1 (levantamiento por radiaciones) mostrado anteriormente, consta de una cuadrícula de 39 columnas x 73 renglones, con un total de 2847 datos de elevaciones Z (Figura 6.26). Se elaboró un modelo similar usando los

mismos datos de campo y configurando el programa SURFER con estas dimensiones y con los mismos límites que usó y determinó en forma automática TERRA de manera que se cubra toda la superficie del terreno; cuyos valores son: Xmin: 308.755, Ymin: 689.633, Xmax=1036.081, Ymax=1761.396.

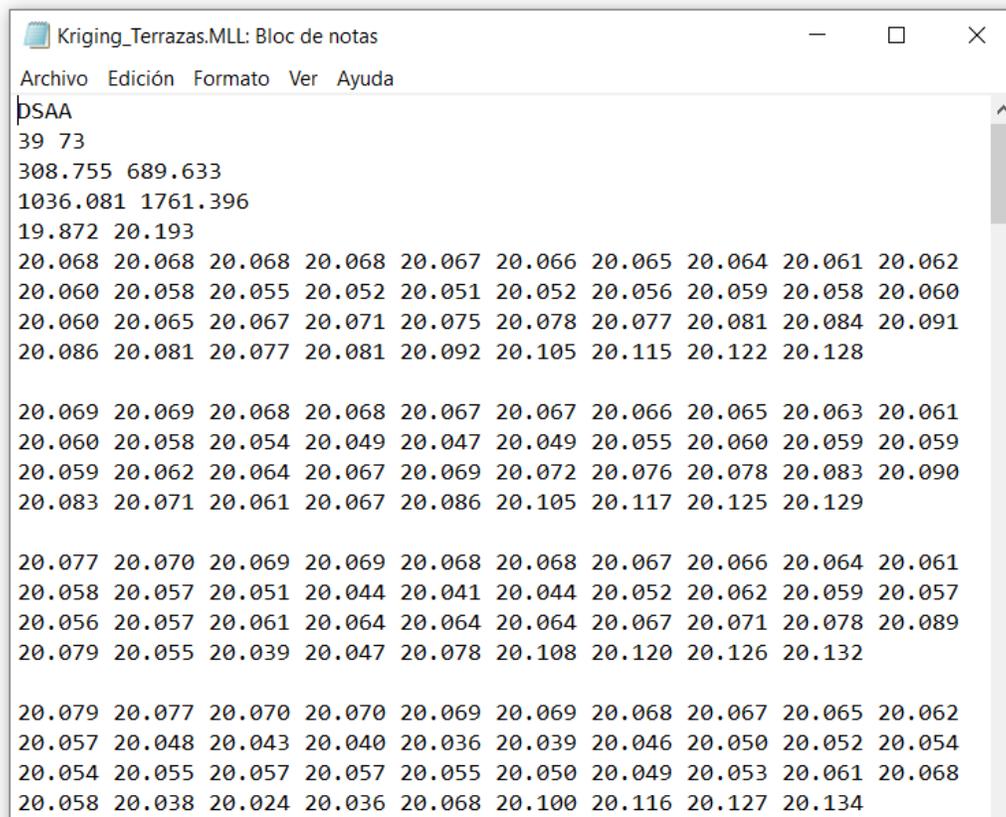
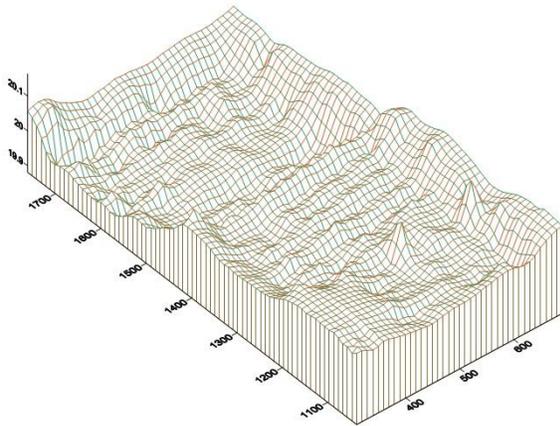
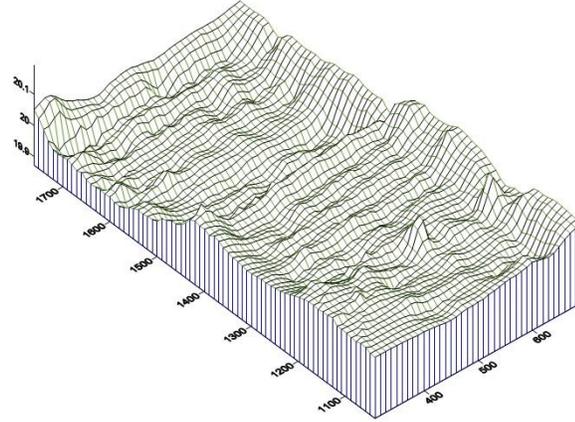


Figura 6.26. Cuadrícula generada por TERRA, con el Método de Kriging para ejemplo 1.

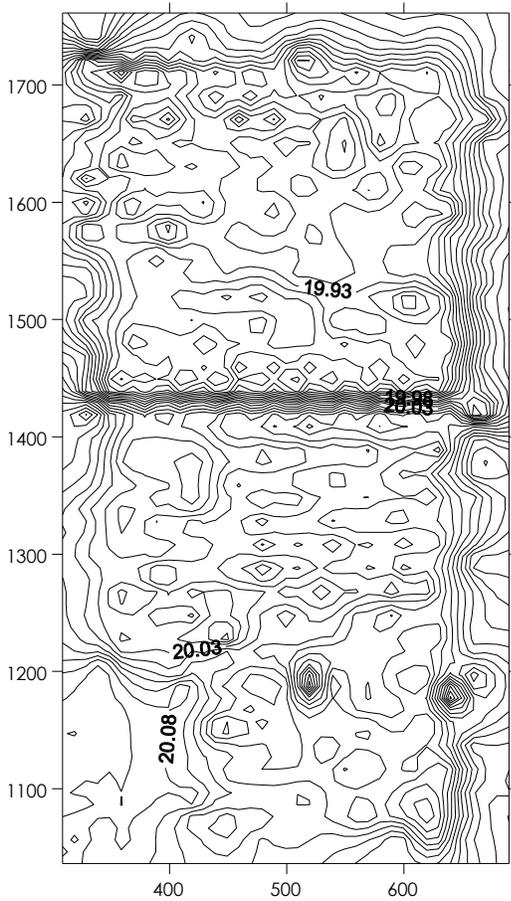
Con medias: $Zm_{TERRA} = 20.00739094$, $Zm_{SURFER} = 20.00997930$ y varianzas: $S^2_{TERRA} = 0.00373831$, $S^2_{SURFER} = 0.00388370$; se practicó una prueba de hipótesis para medias diferentes y varianzas distintas concluyendo que los modelos anteriores con un 97% de confiabilidad tienen valores de medias iguales y con un valor de 99% de confiabilidad tienen varianzas similares, lo que nos hace inducir que son prácticamente iguales (Cuadro 6.5). Lo anterior permite aseverar que el modelo generado por TERRA, predice el comportamiento en forma adecuada y al generar la cuadrícula para estimar los valores de cortes y rellenos, produce volúmenes congruentes que permiten ajustar el plano proyecto de la nivelación de forma adecuada (Figura 6.27).



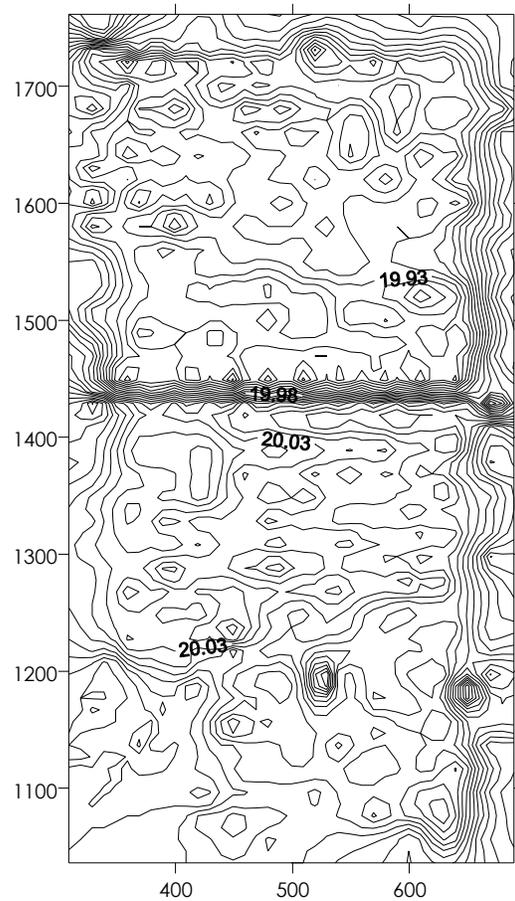
Modelo 3D, con los datos de SURFER



Modelo 3D con los datos de TERRA



Topografía Generada por SURFER



Topografía generada por TERRA

Figura 6.27. Modelos Digitales de Elevación generados por SURFER y por TERRA, para el ejemplo 1.

Cuadro 6.5. Prueba de hipótesis dos medias con varianzas diferentes.

Medias y Varianzas:		Definiciones:	
NoDatos:	2847	Ho: Hipótesis nula	
Zmedia_TERRA:	20.00739094	Ha: Hipótesis alternativa	
Zmedia_SURFER:	20.00997930	σ_x (Tx): Varianza del modelo TERRA.	
S ² _TERRA:	0.00373831	σ_y (Ty): Varianza del modelo SURFER.	
S ² _SURFER:	0.00388370	n = No.datos DEM _{TERRA} ; m = No.datos DEM _{SURFER}	
Prueba de hipótesis:			
Parte I (Distribución F): Confiabilidad: 97%			
Ho: Tx² = Ty²		vs	Ha: Tx² <> Ty²
F_cal = 0.962563284			F Calculada
F_a/2 = F_0.025/2 = 0.01 = 1.47			F tablas
1/F_0.01 = 0.680272109			
Se rechaza Ho, si: F_cal >= F_a/2(v1,v2) y F_cal <= (1/F_a/2(v2,v1))			
0.962563284	<	1.47	Ok
0.962563284	>	0.68027211	Ok
No se rechaza Ho:			
Conclusión: La variabilidad de las Z calculadas en TERRA y SURFER es similar o igual			
Estadística de prueba: $F_{cal} = \frac{S_x^2}{S_y^2}$; Cuantil 1: $F_{\alpha/2}(v_1, v_2)$; Cuantil 2: $\frac{1}{F_{\alpha/2}(v_2, v_1)}$; $v_1 = n - 1$; $v_2 = m - 1$			
Se rechaza Ho sí: $F_{cal} \geq F_{\alpha/2}(v_1, v_2)$ y Se rechaza Ho sí: $F_{cal} \leq \frac{1}{F_{\alpha/2}(v_2, v_1)}$;			
Parte II (Distribución t-Student): Confiabilidad: 99%			
Ho: Mx = My		vs	Ha: Mx <> My
t_cal = -2.25882110			t Calculada
v > 5689.929596		5690	
t_a/2(v) = t_0.01/2(v) = t_0.005(5690) =		2.58	t Tablas
Se rechaza Ho, si t_cal >= t_a/2			
2.2588211	<	2.58	Ok
No se rechaza Ho:			
Conclusión: La media de los datos es Estadísticamente es igual para ambos MDE			
Estadística de prueba: $t_{cal} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{S_x^2}{n} + \frac{S_y^2}{m}}}$; $v \geq \frac{\left(\frac{S_x^2}{n} + \frac{S_y^2}{m}\right)^2}{\left[\frac{(S_x^2)^2}{n^2(n-1)} + \frac{(S_y^2)^2}{m^2(m-1)}\right]}$; $t_{\alpha/2}(v)$			
Se rechaza Ho sí: $ t_{cal} \geq t_{\alpha/2}(v)$			

SURFER, es un programa confiable en el área de la geoestadística y esta prueba comparativa, y da la certeza buscada en relación al tipo de Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que se genera con el programa TERRA.

Del análisis anterior, puede inferir que el programa desarrollado (TERRA), genera resultados geoestadísticamente correctos para el proceso de la nivelación de tierras. Y en el Anexo C, se puede observar que la fuente de captura de información es el principal problema para poder hacer la comparación. En caso de querer compararlo con otros programas que actualmente circulan sobre el mismo tema, se tendría que tener condiciones similares, por ejemplo para un terreno levantado por radiaciones, se puede estimar con TERRA la cuadrícula (como actualmente lo hace el programa) e ingresarla al programa que se desee comparar para realizar los cálculos. De hecho, una de las ventajas de TERRA, es precisamente el acoplamiento a las nuevas tecnologías de información, dado que hoy en día la mayoría de levantamientos topográficos se hacen tomando una masa de puntos representativos del terreno.

Un comentario final acerca de los proyectos de nivelación de tierras, es que la aplicación de las tecnologías modernas para la nivelación de tierras, como es la nivelación con rayo láser, pareciera ser innecesario el desarrollo de un proyecto de nivelación, sin embargo, no es así; cualquier proyecto de nivelación, independientemente de la forma en que se tomen los datos de campo, necesita un proyecto ejecutivo con datos y resultados que incluyan una memoria de cálculo con la estimación de volúmenes de corte y relleno y por supuesto el costo de la nivelación, el plano con la topografía original y el terreno nivelado. Esto será el sustento del proyecto y el respaldo para que el usuario realice los trámites necesarios en caso de requerir apoyos económicos en instituciones que lo brindan al campo o bien en el pago del movimiento de tierras al tractorista que realice el trabajo, sin duda alguna.

En relación al ajuste del semivariograma experimental a un modelo teórico del variograma, en el Anexo B del presente trabajo se hace un análisis y un resumen de las ecuaciones a las que se llegan para el cálculo de los variogramas teóricos. Fue un arduo trabajo; Clark

(1979), Delhome (1978), entre otros, comentan que existen muchos tipos de semivariogramas, que su ajuste a los variogramas debe ser manual. Sin embargo, al hacer un programa es poco probable que el usuario entienda que significa ajustar un variograma, razón por la cual se buscó una solución analítica para encontrar los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 de las funciones propuestas por los diversos investigadores (aunque existe la opción de meterlos manualmente). Se abordaron dos casos que se integraron al programa, el primero sólo considera variogramas que salen de origen, es decir que el valor de $C_0=0$, por lo que, el cálculo de los parámetros de variograma se dedican a determinar C_1 y C_2 . El segundo caso en el que se considera que los variogramas no salen del origen por lo que la determinación de los coeficientes de los modelos son C_0 , C_1 y C_2 . Las variantes se pueden ver en el programa al interpolar manualmente en el menú "Interpolación".

Sin estos parámetros es imposible determinar una función teórica y por ende no se pueden estimar los pesos para el cálculo de la interpolación. Se deja libre que el usuario elija el variograma, porque no todos van a dar los resultados deseados en algunas ocasiones será necesario revisar como se está ajustando el variograma y en caso extremo se podrá ajustar manualmente.

En el cuadro (5.1) se mencionan los modelos que tiene integrados el programa TERRA (Lineal, Cuadrático, Esférico, Cúbico, Exponencial y Gausiano) y las soluciones automáticas que el programa propondrá, el desglose de las soluciones para el ajuste de los modelos se muestra con detalle en el Anexo B. Las ecuaciones se han probado para varios casos y han funcionado de manera congruente.

Respecto a la plataforma en la que fue desarrollado TERRA, Delphi es Pascal moderno, desarrollado para realizar aplicaciones para Windows. El hecho de que sea un lenguaje viejo comparado con los lenguajes modernos como R, Python, Octave; que se están ocupando científicamente; sigue siendo un lenguaje muy potente. A través de los años ha evolucionado para el desarrollo de aplicaciones en un RAD (Rapid Application Developed) que permite a los programadores realizar aplicaciones de gran impacto con todas las bondades del lenguaje; que si debieran enumerarse serian en primer lugar la consistencia

en sus procedimientos y funciones que desde los años 80's no han cambiado en nombre ni en sintaxis, lo que ocasiona que se puedan integrar a él algoritmos de todas las épocas de la era de las computadoras. En segundo lugar es un lenguaje con un compilador muy veloz, en comparación con desarrollos similares de alto nivel como C/C++, Basic, Lisp, entre otros.

Cuando se elabora un programa, el mantenimiento es una de las características que van a hacer que el programa siga en el mercado o desaparezca y ese es uno de los objetivos fundamentales de usar Delphi, que cualquier investigador se una al desarrollo de aplicaciones para la agricultura, Mexicana.

No es casualidad que no haya muchos programas para la nivelación de tierras, son pocos los investigadores preocupados en que se lleven las tecnologías de este tipo a las áreas que realmente necesitan nivelación en México. Hay mucho por nivelar y ésta es una de las maneras que permite integrarnos a la agricultura de México. Pero debe ser una tecnología propia que incluya la normatividad mexicana y que resuelva un problema mexicano.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

El objetivo fundamental de este trabajo fue el desarrollo de un sistema de cómputo electrónico, que auxilie en el cálculo preciso y expedito para la elaboración de proyectos ejecutivos de nivelación de tierras agrícolas, a partir de un levantamiento topográfico realizado con una distribución regular o variable (radiaciones) con equipos modernos, como Estaciones Totales o GPS de precisión.

El programa TERRA 1.0, desarrollado en la presente investigación cubre el objetivo planteado, es un sistema de cómputo electrónico desarrollado como herramienta fundamental para auxiliar a los técnicos en la formulación y optimización de proyectos ejecutivos de nivelación de tierras. Incluye algoritmos para el cálculo del proyecto a partir de un levantamiento topográfico realizado en cuadrícula o con distribución variable. El uso del método de Kriging se integró con éxito para el dibujo de las isolíneas del plano del terreno natural, del terreno nivelado, y la utilización de una cuadrícula levantada en campo o generada por el programa para realizar el cálculo del volumen de cortes y rellenos aplicando el método de los cuatro puntos.

La metodología propuesta, implicó el resolver en forma detallada el ajuste de mínimos cuadrados ordinarios usando un método matricial para el cálculo del plano inicial e implementar un algoritmo eficiente para el ajuste del coeficiente C_A de la ecuación del plano. En el caso de la cuadrícula generada, se incluyen algoritmos para la determinación de semivariogramas y se propusieron ecuaciones algebraicas para el cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico para el cálculo de los pesos en la interpolación espacial de los datos de la cuadrícula. En caso de la división en cuadros o terrazas, se implementaron algoritmos para la separación de los puntos de campo según los polígonos divididos; se incluyen las rutinas necesarias para que el proyectista pueda generar un diseño técnicamente adecuado de la nivelación, con lo que se logra la disminución de los volúmenes totales de cortes y rellenos y por tanto se logra disminuir

los costos de nivelación. El sistema TERRA, se podrá utilizar con las nubes de puntos que se generan en levantamientos topográficos que se realizan con VANTs, conocidos como drones.

A pesar de que existen diversos programas para el cálculo de los proyectos de nivelación de tierras; con TERRA 1.0 se pretende tener un sistema para auxiliar en la formulación de proyectos ejecutivos de nivelación de tierras, que incluya la experiencia práctica acumulada en los años de trabajo en ésta área. Ésta primera versión será liberada con la idea de que los ingenieros y el personal relacionado al área de nivelación de tierras lo utilice y envíe sus comentarios y sugerencias para enriquecerlo.

7.2. RECOMENDACIONES

TERRA 1.0, está diseñado para funcionar en un sistema operativo Windows a 64 bits, sin embargo, es posible compilarlo para que funcione en equipos a 32 bits y poder darles uso a esos equipos en desuso. Los requerimientos tecnológicos del programa diseñado son muy básicos, las necesidades de memoria extendida no superan 1.0 GB y puede funcionar perfectamente en un procesador Core i3 o su equivalente.

Una de las recomendaciones importantes, es compilar en programa en alguna versión moderna de Delphi que incluya algún módulo especial para que funcione en un sistema operativo OSx, que permita su uso en equipos Apple. Es posible que se tenga que cambiar algunos objetos propios de Windows; por lo que proceso no es automático.

Dentro de las recomendaciones técnicas, es necesario darle mantenimiento continuo al programa y estar pendiente de los cambios tecnológicos que permitan realizar mejoras a la interface con el usuario. Este aspecto es de suma importancia y es lo que permitirá que el programa no pierda vigencia.

De los algoritmos desarrollados es necesario seguir con su revisión y corregir posibles errores que se presenten con los distintos casos particulares de la nivelación.

Habría que implementar algunos otros métodos de cuantificación de volúmenes, como los mencionados por Hernández (1994) y Cano (1997) como son: el método de la adición, el estereométrico, de las áreas medidas, entre otros; que permitan comparar los resultados, respecto al método de los cuatro puntos, método implementado en TERRA.

El algoritmo de división puede mejorarse adicionado alguna rutina que permita la división en más de dos cuadros de manera sencilla. Por lo pronto el algoritmo funciona de manera adecuada para dos cuadros y en caso de necesitar dividir en más cuadro habrá que definirlos en forma manual en la entrada de datos del sistema.

En el caso del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), las opciones implementadas permiten modelar el terreno para el cálculo de volúmenes con el método de Kriging; para una masa de puntos considerable, sin embargo, se puede implementar la elaboración del Modelo Digital de Elevaciones por el método de Triangulación o interpolación lineal en caso de que el usuario se sienta más tranquilo y confiado con él. Esta opción permitirá comparar los modelos generados de manera geoestadística respecto al método que oficialmente usan los topógrafos, la triangulación.

En caso del dibujo de isolíneas para el plano antes y después de la nivelación, TERRA cuenta con el método del Inverso de la Distancia además de Kriging, pero adicionar el método de triangulación podrá dar al usuario la certeza de que está haciendo el plano que necesita; por lo que su implementación será adecuada.

8. LITERATURA CITADA

Anderson, C. L.; Halderman, A.D.; Paul, H. A. y Rap, E. 1980. "Land shaping requirements". En: Design and operation of Farm Irrigation Systems. Editado por M. E. Jensen, A.S.A.E., St. Joseph, Michigan, USA.

Cano-Muñoz, J. y Vázquez-Guzmán, A. 1997. Nivelación de Tierras. Ediciones Mundi-Prensa. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Sevilla, España. 215pp.

Cisneros-Iturbe, H.L.; Bouvier C. y Domínguez-Mora R. 2001. Aplicación del método kriging en la construcción de campos de tormenta en la ciudad de México. Ingeniería Hidráulica en México, 16(3). 5-14 pp. Julio-septiembre 2001.

Chapra, C. S. y Canale, R. P. 2015. Métodos Numéricos para Ingenieros. Editorial Mc Graw Hill. Séptima Edición. Mexico D.F. 78-110pp, 247-281pp, 466-500pp.

Chávez-Morales, J.; Ibañez-Castillo, L.A. y Hernández-Saucedo, F.R. 1990. Programa de Nivelación de Tierras (NIVTERRA 1.1). Colegio de Postgraduados, Hidrociencias. Montecillo, México. 25pp.

Clark, Isobel. 1979. Practical Geostatistics. Cuarta reimpresión. Editorial Elsevier Applied Science. London, Great Britain. 127pp.

Clayton V.D, André G.J. 1998: GSLIB: Geoestatistical software library and User's Guide. Oxford University Press, New York, USA. 369 pp.

CONAGUA. 2014. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola. Gerencia de Distritos de Riego. Proyecto de Riego por Gravedad Tecnificado (RIGRAT). Curso de capacitación: Nivelación de tierras para el riego por gravedad. México, D.F. 132pp.

Covarrubias-Lugo, A. 1968. Cálculo de nivelación de tierras para riego por medio del cómputo electrónico. Ingeniería Hidráulica. México, D.F. 80pp.

Delfiner P. y Delhome J.P. 1975. Optimum Interpolation by Kriging. Capítulo del libro: "Display and Analysis of Spatial Data". J.C. David (Editor). NATO. Advanced Study Institute, Editorial John Wiley and Sons, pp. 96-114.

Delhome J.P. 1978. Kriging in the hydrociencias. Advances in water resouces vol. 1(5): 251-266pp.

Estévez C. E. 2016. Apuntes sobre estimación de recursos y reservas. Departamento de Geología. Universidad de Pinar del Río "Hermanos Saíz Montes de Oca", Cuba.

Fuentes-Ruiz, C. y Rendón-Pimentel L. 2012. Riego por gravedad. Universidad Autónoma de Querétaro-CONAGUA. 358pp.

García H. F. y Hernández S. F. R. 2013. Sistema de Nivelación de Tierras (SINIVET plus 5.0/5.1). Manual de Usuario. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de irrigación. Chapingo, México.

Guajarati D. N. y Porter D.C. 2010. Econometría. Ed. Mc Graw Hill. Quinta Edición. México D.F. 801-876pp.

Hernández S. F. R. y Sánchez B. J. R. 1994. Diplomado de Nivelación de Tierras, Volumen I. Capítulo: La nivelación de tierras en forma tradicional. Coeditado por Universidad Autónoma Chapingo, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Comisión Nacional del Agua. Bermejillo, Durango; México. 49p

Hernández S. F. R. y Sánchez B. J. R. 1997. Nivelación de tierras. En: Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Primera edición. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos.

Hernández S. F. R. y Sánchez B. J. R. 2003. Nivelación de tierras con tecnología láser. En: IX Curso Internacional de Sistemas de Riego. Tomo I. Departamento de Irrigación. UACH. Chapingo, México.

Hernández-Saucedo, F.R y Sánchez-Bravo, J.R. 2008. Manual para diseño de obras de riego pequeñas. Capítulo 1.4: Nivelación de Tierras. Editado por: De León M. B. y Robles R.B.D. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. 53-73pp.

Journel, AG, y Huijbregts, C J. 1976. Geoestadística minera. Londres, Reino Unido. 600p

Legrá-Lobaina, A.A. y Atanes-Beatón, D.M. 2010. Variogramas adaptativos: un método práctico para aumentar la utilidad del error de estimación por Kriging. Minería y Geología, 26(4), octubre-diciembre, 2010, pp. 53-78.

López Galván J.V.O. 1995. Comparación de 4 métodos numéricos utilizados en la interpolación puntual de precipitación pluvial en el estado de Veracruz. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Programa de Cómputo Aplicado. Montecillos, Texcoco, México.

Licano Chacón, E. 1988. Comparación de métodos para el proyecto de nivelación de tierras. Tesis profesional. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Madero, R. J. y Torres, C. R. 1971. "Nivelación de tierras agrícolas". Ingeniería Hidráulica en México, 25 (2): 179-192. México, D. F.

Marr J.C. 1957. Grading Land for Surface Irrigation. Circular 438. University of California, Division of Agricultural Sciences. Davis, USA. 55pp.

Michael J.P., Clayton V.D. 2014. Geostatistical Reservoir Modeling. Second Edition. Oxford University Press. New York, USA. 362pp.

Montgomery, D.C. y Runger, G.C. 2008. Probabilidad y Estadística Aplicadas a la Ingeniería. Editorial Limusa Wiley. 2ª Edición. Mexico D.F. 430-560pp.

Pedraza O.F.J. 1988. Aplicación del Método Kriging en la interpolación de valores de precipitación anual. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Zonas Áridas. Chapingo, México.

Pérez N. S. y Hernández S. F. R. 1996. Topografía Aplicada. DEGETA. SEP. México D.F. 307p

Pascual R.F. 2001. Evaluación Técnico-Económica de Proyectos de Nivelación de Tierras Agrícolas. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, Méx.

Purcell E.J y Varberg, D. 2009. Cálculo con Geometría Analítica. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A. 9ª Edición. México D.F. 496-506pp, 420-451pp.

Reisdorph Kent. 1999. Aprendiendo Borland Delphi 4 en 21 días. Editorial Prentice Hall. Mexico D.F. 944 paginas.

Roman C.J.A. 1980. Aplicación de la Metodología Kriging Universal en la Elaboración de Planos del Nivel Freático. Tesis de Maestría. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México.

Sánchez B.J.R., Chávez M.J., Ibañez C.L.A. y Hernández S.F.R., 1991. Programa de Nivelación de Tierras (NIVTERRA 2.0). Colegio de Postgraduados Centro de Hidrociencias. Montecillo, México.

Sánchez, B.J.R., Martínez E.R. 1994. Diplomado de Nivelación de Tierras, Volumen I. Coeditado por Universidad Autónoma Chapingo, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Comisión Nacional del Agua. Bermejillo, Durango; México.

Sánchez, B.J.R., Martínez E.R. 1994. Diplomado de Nivelación de Tierras, Volumen II. Coeditado por Universidad Autónoma Chapingo, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Comisión Nacional del Agua. Bermejillo, Dgo., México.

Sánchez B.J.R., Hernández S.F.R. y García H.F., 1995. Sistema de Cómputo Electrónico para Proyectos de Nivelación de Terrenos Agrícolas (SINIVET 2.0). Manual del usuario. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de irrigación. Chapingo, México.

Saucedo, H.; Fuentes, C. y Zavala M. 2006. El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: 3. Verificación numérica de la hipótesis del tiempo de contacto en el riego por melgas. Ingeniería hidráulica en México, 21(4). 135-143 pp. Octubre-diciembre 2006.

Trueba, C. S. 1971. La nivelación de tierras agrícolas. Editorial CECOSA. México, D. F.

U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 1970. Land Leveling, National Engineering Handbook. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C., Chap 12: 65pp.

Villatoro, M., Henríquez, C. y Sancho F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kiging en la variación espacial de PH, CA, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense* 32(1): 95-105.

Walker W.R. y Skogerboe G.V. 1987. *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Editorial Pearson College Div. 386 pags. Englewood, Cliffs, New Jersey, U. S. A.

Walker, W. R. 1989. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems. *Irrigation and drainage paper 45*. FAO. Roma, Italia. Capítulos 1 y 2. PP: 1-16.

Walker, W.R. y Skogerboe, G.V. 1987. *Surface Irrigation: Theory and Practice*. Editorial Prentice-Hall. A Division of Simon & Schuster. Englewood Cliffs, New Jersey, 07632 USA. 178-191pp.

<https://www.monografias.com/trabajos65/estimacion-recursos-reservas/estimacion-recursos-reservas4.shtml#xmetodespac>

<http://www.agroservicios.com.ar/agricultura/software-proyectos-calculo-movimiento-tierra/23-software-para-el-diseno-de-proyectos-y-calculo-de-movimiento-de-tierra>.

ANEXOS

A.	MÉTODO MATRICIAL DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS (MCO).....	149
B.	DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES (C0, C1 Y C2) DEL VARIOGRAMA TEÓRICO.	158
C.	ANTECEDENTES DE SOFTWARE ESPECIALIZADO EN LA NIVELACIÓN DE TIERRAS.	175
D.	CÓDIGO EN DELPHI DE PROCEDIMIENTOS DE CALCULO DE TERRA.....	197
E.	MANUAL DE USUARIO	217
F.	PLANOS DEL EJEMPLO 1	240

A. MÉTODO MATRICIAL DE MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS (MCO).

A.1. Deducción de la forma matricial de los MCO	150
A.2. Expresión matricial para dos variables	154
A.3. Coeficiente de determinación R^2 en notación matricial	154
A.4. Ejemplo de Regresión Lineal de 2 variables	156

A.1. Deducción de la forma matricial de los MCO

A continuación se describe el enfoque matricial de la regresión lineal múltiple, según Gujarati y Porter (2009).

Al ajustar un modelo de regresión múltiple, es mucho más conveniente expresar las operaciones matemáticas utilizando la notación matricial. Esta estimación se denomina Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO). Para obtener el estimado MCO de β , se escribe primero la regresión muestral de k-variables:

$$Y_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 X_{2i} + \hat{\beta}_3 X_{3i} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ki} + \hat{u}_i \quad (\text{a.1})$$

La cual puede ser escrita en forma más compacta en notación matricial como:

$$y = X\hat{\beta} + \hat{u} \quad (\text{a.2})$$

Y en forma matricial así,

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_{21} & X_{31} & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{2n} & X_{3n} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \vdots \\ \hat{u}_k \end{bmatrix} \quad (\text{a.3})$$

$$\begin{matrix} y & = & X & \hat{\beta} & + & \hat{u} \\ n \times 1 & & n \times k & k \times 1 & & n \times 1 \end{matrix}$$

Donde $\hat{\beta}$ es un vector columna de k elementos compuesto por los estimadores de MCO de los coeficientes de regresión, y donde \hat{u} es un vector columna de $n \times 1$ con n residuos.

Como en los modelos de dos y tres variables, en el caso de k variables los estimadores de MCO se obtienen al reducir:

$$\sum \hat{u}_i^2 = \sum (Y_i - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 X_{2i} - \dots - \hat{\beta}_k X_{ki})^2 \quad (\text{a.4})$$

Donde $\sum \hat{u}_i^2$ es la suma de cuadrados residual (SCR). En notación matricial, esto

equivale a reducir $\hat{\mathbf{u}}' \hat{\mathbf{u}}$, pues:

$$\hat{\mathbf{u}}' \hat{\mathbf{u}} = [\hat{u}_1 \quad \hat{u}_2 \quad \dots \quad \hat{u}_n] \begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \vdots \\ \hat{u}_n \end{bmatrix} = \hat{u}_1^2 + \hat{u}_2^2 + \dots + \hat{u}_n^2 = \sum \hat{u}_i^2 \quad (\text{a.5})$$

Ahora, de (a.2) se obtendrá:

$$\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{y} - \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (\text{a.6})$$

Por consiguiente:

$$\hat{\mathbf{u}}' \hat{\mathbf{u}} = (\mathbf{y} - \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}})' (\mathbf{y} - \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (\text{a.7})$$

$$\hat{\mathbf{u}}' \hat{\mathbf{u}} = \mathbf{y}'\mathbf{y} - 2 \hat{\boldsymbol{\beta}}' \mathbf{X}'\mathbf{y} + \hat{\boldsymbol{\beta}}' \mathbf{X}'\mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (\text{a.8})$$

Donde se aprovechan las propiedades de la transpuesta de la matriz, a saber: $(\mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}})' = \hat{\boldsymbol{\beta}}' \mathbf{X}'$ y como $\hat{\boldsymbol{\beta}}' \mathbf{X}'\mathbf{y}$ es un escalar (es decir un número real), es igual a su transpuesta $\mathbf{y}' \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}}$

La ecuación (a.6) es la representación matricial de (a.4). En notación escalar, el método de MCO consiste en estimar $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k$ de manera que $\sum \hat{u}_i^2$ sea lo más pequeño posible. Esto se logra al diferenciar parcialmente (a.4) respecto de $\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k$ e igualar a cero las expresiones resultantes. Este proceso produce k ecuaciones simultáneas con k incógnitas, que son las ecuaciones normales de la teoría de mínimos cuadrados. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\begin{array}{ccccccccccc} n \hat{\beta}_1 & + & \hat{\beta}_2 \sum X_{2i} & + & \hat{\beta}_3 \sum X_{3i} & + & \dots & + & \hat{\beta}_k \sum X_{ki} & = & Y_i \\ \hat{\beta}_1 \sum X_{2i} & + & \hat{\beta}_2 \sum X_{2i}^2 & + & \hat{\beta}_3 \sum X_{2i} X_{3i} & + & \dots & + & \hat{\beta}_k \sum X_{2i} X_{ki} & = & \sum X_{2i} Y_i \\ \hat{\beta}_1 \sum X_{3i} & + & \hat{\beta}_2 \sum X_{3i} X_{2i} & + & \hat{\beta}_3 \sum X_{3i}^2 & + & \dots & + & \hat{\beta}_k \sum X_{3i} X_{ki} & = & \sum X_{3i} Y_i \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ \hat{\beta}_1 \sum X_{ki} & + & \hat{\beta}_2 \sum X_{ki} X_{2i} & + & \hat{\beta}_3 \sum X_{ki} X_{3i} & + & \dots & + & \hat{\beta}_k \sum X_{ki}^2 & = & \sum X_{ki} Y_i \end{array} \quad (\text{a.9})$$

En forma matricial la ecuación (a.9) se puede representar de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_{2i} & \sum X_{3i} & \dots & \sum X_{ki} \\ \sum X_{2i} & \sum X_{2i}^2 & \sum X_{2i} X_{3i} & \dots & \sum X_{2i} X_{ki} \\ \sum X_{3i} & \sum X_{3i} X_{2i} & \sum X_{3i}^2 & \dots & \sum X_{3i} X_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum X_{ki} & \sum X_{ki} X_{2i} & \sum X_{ki} X_{3i} & \dots & \sum X_{ki}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_i \\ \sum X_{2i} Y_i \\ \sum X_{3i} Y_i \\ \vdots \\ \sum X_{ki} Y_i \end{bmatrix} \quad (a.10)$$

$$(X' X) \quad \hat{\beta} = X' y$$

o bien:

$$\begin{bmatrix} n & \sum X_{2i} & \sum X_{3i} & \dots & \sum X_{ki} \\ \sum X_{2i} & \sum X_{2i}^2 & \sum X_{2i} X_{3i} & \dots & \sum X_{2i} X_{ki} \\ \sum X_{3i} & \sum X_{3i} X_{2i} & \sum X_{3i}^2 & \dots & \sum X_{3i} X_{ki} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum X_{ki} & \sum X_{ki} X_{2i} & \sum X_{ki} X_{3i} & \dots & \sum X_{ki}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ X_{31} & X_{32} & \dots & X_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{k1} & X_{k2} & \dots & X_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (a.11)$$

$$(X' X) \quad \hat{\beta} = X' y$$

O en forma compacta como:

$$(X' X) \hat{\beta} = X' y \quad (a.12)$$

De esta forma la matriz $(X' X)$ tiene las siguientes características:

- 1).-Proporciona las sumas simples de cuadrados y productos cruzados de las variables X, una de las cuales es el término de intercepto que toma el valor 1 para cada observación, Los elementos sobre la diagonal principal dan las sumas simples de cuadrados y los que no están en la diagonal principal dan sumas simples de productos cruzados (por simple se refiere, a que están expresada en las unidades originales de medición.
- 2).- Es simétrica, pues el producto cruzado entre X_{2i} y X_{3i} , es el mismo que entre X_{3i} y

X_{2i} .

3).- Es de orden $(k \times k)$, es decir, tiene k renglones y k columnas.

En (a.12), las cantidades conocidas son $(X' X)$ y $(X' y)$, que corresponde al producto cruzado entre las variables X y y ; y la incógnita $\hat{\beta}$. Ahora, mediante algebra matricial, si existe la inversa de $(X' X)$, es decir, $(X' X)^{-1}$, entonces se premultiplican ambos lados de (a.12) por esta inversa para obtener:

$$(X' X)^{-1}(X' X) \hat{\beta} = (X' X)^{-1} X' y \quad (\text{a.13})$$

Pero como $(X' X)^{-1}(X' X) = I$ es una matriz identidad de orden $k \times k$, se obtiene:

$$I \hat{\beta} = (X' X)^{-1} X' y \quad (\text{a.14})$$

Por lo tanto:

$$\begin{matrix} \hat{\beta} & = & (X' X)^{-1} & X' & y \\ k \times 1 & & k \times k & (k \times n) & (n \times 1) \end{matrix} \quad (\text{a.15})$$

La ecuación (a.15) es un resultado fundamental de la teoría de MCO en notación matricial. Muestra la estimación del vector $\hat{\beta}$ a partir de la información dada. Aunque (a.15) se obtuvo de (a.11), se puede obtener directamente de (a.8) al diferenciar $\hat{u}' \hat{u}$ respecto de $\hat{\beta}$.

La solución se podrá obtener si se cumple la condición descrita en la ecuación (a.12):

$$(X' X) \hat{\beta} = X' y$$

Donde:

X = Matriz de coordenadas XY.

X' = Transpuesta de la Matriz de coordenadas XY.

y = Vector de coordenadas Z.

$\hat{\beta}$ = Vector de incógnitas o Coeficientes (A, B, C).

De las ecuaciones anteriores se despeja el vector de incógnitas o vector de coeficientes ($\hat{\beta}$):

$$(X' X)^{-1}(X' X) \hat{\beta} = (X' X)^{-1} X' y \quad (\text{a.16})$$

$$I \hat{\beta} = (X' X)^{-1} X' y \quad (a.17)$$

$$\hat{\beta} = (X' X)^{-1} (X' y) \quad (a.18)$$

A.2. Expresión matricial para dos variables

Será posible calcular los parámetros de la expresión anterior de la siguiente manera, para el caso de dos parámetros:

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} \quad (a.19)$$

$$(X' X) = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} \\ X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{1} \\ \mathbf{1} \\ \vdots \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum X_i \\ \sum X_i & \sum X_i^2 \end{bmatrix} \quad (a.20)$$

$$X' y = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{1} \\ X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_i \\ \sum X_i Y_i \end{bmatrix} \quad (a.21)$$

A.3. Coeficiente de determinación R² en notación matricial

Aunque en principio, $\hat{u}' \hat{u}$ se calcula a partir de los residuos estimados, en la práctica se obtiene directamente calculando la Suma de Cuadrados Residuales (SCR).

$$SCR = \sum \hat{u}_1^2 = SCT - SCE \quad (a.22)$$

Y en el caso de dos variables se puede escribir:

$$\sum \hat{u}_1^2 = \sum y_i^2 - \hat{\beta}_2^2 \sum x_i^2 \quad (a.23)$$

Y en caso de tres variables

$$\sum \hat{u}_1^2 = \sum y_i^2 - \hat{\beta}_2 \sum y_i x_{2i} + \hat{\beta}_3 \sum y_i x_{3i} \quad (a.24)$$

Al extender este principio, se ve que para el modelo de k variables

$$\sum \hat{u}_1^2 = \sum y_i^2 - \hat{\beta}_2 \sum y_i x_{2i} + \hat{\beta}_3 \sum y_i x_{3i} + \dots + \hat{\beta}_k \sum y_i x_{ki} \quad (\text{a.25})$$

Quedando la siguiente notación matricial:

$$SCT: \sum y_i^2 = \mathbf{y}'\mathbf{y} - n\bar{Y}^2 \quad (\text{a.26})$$

$$SCE: \hat{\beta}_2 \sum y_i x_{2i} + \hat{\beta}_3 \sum y_i x_{3i} + \dots + \hat{\beta}_k \sum y_i x_{ki} = \hat{\beta}'\mathbf{X}'\mathbf{y} - n\bar{Y}^2 \quad (\text{a.27})$$

Donde los parámetros son conocidos como:

SCE = Suma de Cuadrados del Error

SCT = Suma de Cuadrados Totales

Y donde el término \bar{Y}^2 se conoce como corrección para la media. Por consiguiente:

$$\hat{\mathbf{u}}'\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{y}'\mathbf{y} - \hat{\beta}'\mathbf{X}'\mathbf{y} \quad (\text{a.28})$$

De esta manera, el coeficiente de determinación R^2 se ha definido como:

$$R^2 = \frac{SCE}{SCT} \quad (\text{a.29})$$

En caso de dos variables:

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}_2^2 \sum x_i^2}{\sum y_i^2} \quad (\text{a.30})$$

En caso de tres variables

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}_2 \sum y_i x_{2i} + \hat{\beta}_3 \sum y_i x_{3i}}{\sum y_i^2} \quad (\text{a.31})$$

Si generalizamos, para el caso de k variables se obtendrá:

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}_2 \sum y_i x_{2i} + \hat{\beta}_3 \sum y_i x_{3i} + \dots + \hat{\beta}_k \sum y_i x_{ki}}{\sum y_i^2} \quad (\text{a.32})$$

Con las ecuaciones (a.12) y (a.13) la ecuación (a.16), se podrá representar en forma matricial como:

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}'X'y - n\bar{Y}^2}{y'y - n\bar{Y}^2} \quad (a.33)$$

A.4. Ejemplo de Regresión Lineal de 2 variables

Se cuenta con información obtenida de una muestra para una variable independiente (X) y una variable dependiente (Y); mostrada en el siguiente cuadro:

Cuadro a.1. Información de la muestra para un ejemplo de 2 variables

No.	X	Y
1	80	70
2	100	65
3	120	90
4	140	95
5	160	110
6	180	115
7	200	120
8	220	140
9	240	155
10	260	150

REPRESENTACIÓN MATRICIAL					
$\begin{bmatrix} 70 \\ 65 \\ 90 \\ 95 \\ 110 \\ 115 \\ 120 \\ 140 \\ 155 \\ 150 \end{bmatrix}$	=	$\begin{bmatrix} 1 & 80 \\ 1 & 100 \\ 1 & 120 \\ 1 & 140 \\ 1 & 160 \\ 1 & 180 \\ 1 & 200 \\ 1 & 220 \\ 1 & 240 \\ 1 & 260 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$	+	$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \\ u_{10} \end{bmatrix}$
y 10 × 1		X 10 × 2	β 2 × 1	+	u 10 × 1

Con la información del cuadro (a.1) se pueden realizar las operaciones indicadas en la expresión (a.18).

$X'X =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 80 & 100 & 120 & 140 & 160 & 180 & 200 & 220 & 240 & 260 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 80 \\ 1 & 100 \\ 1 & 120 \\ 1 & 140 \\ 1 & 160 \\ 1 & 180 \\ 1 & 200 \\ 1 & 240 \\ 1 & 260 \end{bmatrix} \quad X'X = \begin{bmatrix} 10 & 1700 \\ 1700 & 322000 \end{bmatrix} \quad (\text{a.34})$$

$X'y =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 80 & 100 & 120 & 140 & 160 & 180 & 200 & 220 & 240 & 260 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 70 \\ 65 \\ 90 \\ 95 \\ 110 \\ 115 \\ 120 \\ 140 \\ 155 \\ 150 \end{bmatrix} \quad X'y = \begin{bmatrix} 1110 \\ 205500 \end{bmatrix} \quad (\text{a.35})$$

Recurriendo a las reglas de inversión de matriz, se puede calcular la matriz inversa $(X'X)^{-1}$, multiplicando la ecuación (a.34) por su transpuesta, obteniendo (a.36).

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.97576 & -0.005152 \\ -0.005152 & 0.0000303 \end{bmatrix} \quad (\text{a.36})$$

La expresión (a.38), muestra el vector solución $(\hat{\beta})$, resultado de multiplicar (a.36) por (a.35).

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97576 & -0.005152 \\ -0.005152 & 0.0000303 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1110 \\ 205500 \end{bmatrix} \quad (\text{a.37})$$

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} 24.4545 \\ 0.5079 \end{bmatrix} \quad (\text{a.38})$$

B. DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES (C0, C1 Y C2) DEL VARIOGRAMA TEÓRICO.

B.	DETERMINACIÓN DE LOS COEFICIENTES (C0, C1 Y C2) DEL VARIOGRAMA TEÓRICO	158
B.1.	Modelos para el ajuste del variograma.....	159
B.2.	Modelos con intercepción en el Origen ($C_0 \neq 0$)	160
B.3.	Modelos sin intercepción con el Origen ($C_0 = 0$)	165
B.4.	Resumen del Cálculo de los coeficientes C0, C1 y C2.....	170

B.1. Modelos para el ajuste del variograma.

El Semivariograma se contruye con:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{t=1}^P [Zr(d_t) - Zr(d_{t+h})]^2}{2P} \quad (\text{b.1})$$

Donde: $Zr(d_t)$ = Valor de la cota topografía (Z) en el punto t , $Zr(d_{t+h})$ = Valor de la cota topográfica (Z) en el sitio ubicado a la distancia h del punto t , P = Número total de puntos del levantamiento por radiaciones.

Los elementos básicos para ajustar al variograma se pueden ver en la figura b.1.

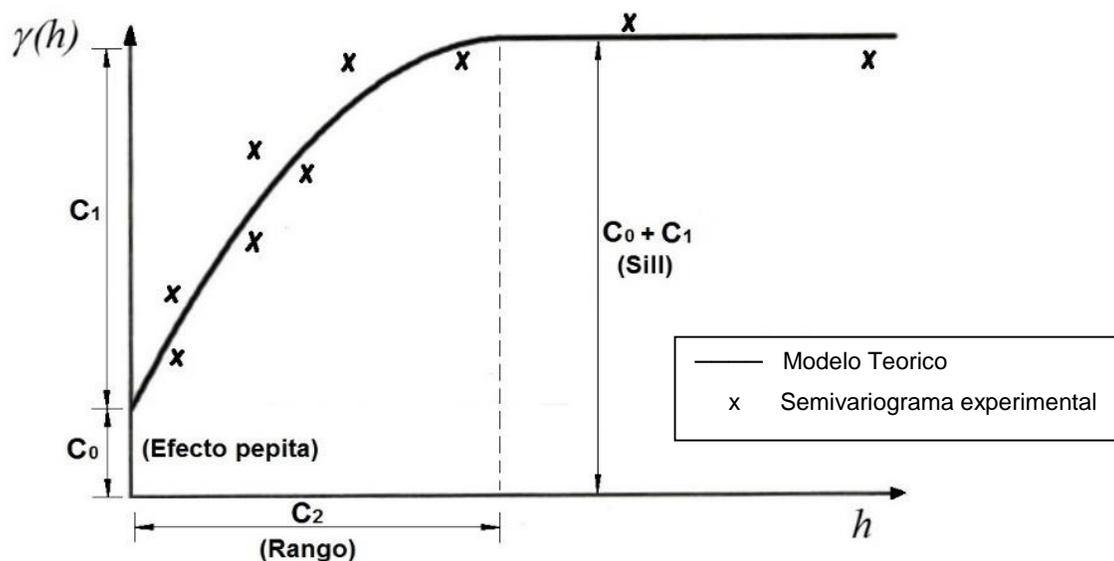


Figura b.1. Parámetros del variograma teórico.

Los modelos propuestos para la determinación del variograma experimental se linealizaron para determinar los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 . Las variables usadas para indicar la linealización se representan mediante (β) . Posterior al proceso de linealización se determinaron los valores numéricos de los β :

Para el ajuste del variograma se analizaron las siguientes posibilidades:

B.2. Modelos con intercepción en el Origen ($C_0 \neq 0$)

1). Lineal

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 h \quad (b.2)$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h \quad (b.3)$$

$$C_0 = \beta_0 \quad (b.3a) \quad C_1 = \beta_1 \quad (b.3b)$$

2). Esférico

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{C_2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{C_2} \right)^3 \right] \quad (b.4)$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^3 \quad (b.5)$$

$$\beta_0 = C_0 \quad (b.5a)$$

$$\beta_1 = \frac{3}{2} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (b.5b)$$

$$\beta_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{C_1}{C_2^3} \right) \quad (b.5c)$$

Coefficientes:

$$C_1 = \frac{2 \beta_1 C_2}{3} \quad (b.5d) \quad C_1 = -2 C_2^3 \beta_2 \quad (b.5e)$$

$$C_2 = \pm \sqrt{\frac{-1 \beta_1}{3 \beta_2}} \quad (b.5f) \quad C_0 = \beta_0 \quad (b.5g)$$

3). Cúbico

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[7 \left(\frac{h}{C_2} \right) - 8.75 \left(\frac{h}{C_2} \right)^3 + 3.5 \left(\frac{h}{C_2} \right)^5 - \left(\frac{h}{C_2} \right)^7 \right] \quad (b.6)$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^3 + \beta_3 h^5 + \beta_4 h^7 \quad (\text{b.7})$$

$$\beta_0 = C_0 \quad (\text{b.7a})$$

$$\beta_1 = 7 \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (\text{b.7b}) \quad \beta_2 = -8.75 \left(\frac{C_1}{C_2^3} \right) \quad (\text{b.7d})$$

$$\beta_3 = 3.5 \left(\frac{C_1}{C_2^5} \right) \quad (\text{b.7c}) \quad \beta_4 = - \left(-\frac{C_1}{C_2^7} \right) \quad (\text{b.7e})$$

Una vez resuelta la regresión múltiple y calculados los coeficientes β_1 , β_2 , β_3 y β_4 se podrán calcular los coeficientes C_1 y C_2 . Dado que polinomio ajustado es de grado 7, se tiene más de una solución; se tomará la que cubra las mejores condiciones para el variograma.

Coefficientes:

$$C_0 = \beta_0 \quad (\text{b.7f})$$

$$C_1 = \frac{\beta_1 C_2}{7} \quad (\text{b.7g})$$

$$C_1 = \frac{\beta_3 C_2^5}{3.5} \quad (\text{b.7h})$$

$$C_1 = \frac{\beta_2 C_2^3}{-8.75} \quad (\text{b.7i})$$

$$C_1 = \beta_4 C_2^7 \quad (\text{b.7j})$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{8.75}{-7} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)} \quad (\text{b.7k})$$

$$C_2 = \sqrt[6]{\frac{1}{7} \left(\frac{\beta_1}{\beta_4} \right)} \quad (\text{b.7l})$$

$$C_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_3} \right)} \quad (\text{b.7m})$$

$$C_2 = \sqrt{\frac{-3.5}{8.75} \left(\frac{\beta_2}{\beta_3} \right)} \quad (\text{b.7n})$$

$$C_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{-8.75} \left(\frac{\beta_2}{\beta_4} \right)} \quad (\text{b.7o})$$

4). Cuadrático

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[2 \left(\frac{h}{C_2} \right) - \left(\frac{h}{C_2} \right)^2 \right] \quad (b.8)$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2 \quad (b.9)$$

$$\beta_0 = C_0 \quad (b.9a)$$

$$\beta_1 = 2 \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (b.9b)$$

$$\beta_2 = -\frac{C_1}{C_2^2} \quad (b.9c)$$

Una vez resuelta la regresión múltiple y calculados los coeficientes β_1 y β_2 :

Coeficientes:

$$C_0 = \beta_0 \quad (b.9d)$$

$$C_1 = \frac{C_2 \beta_1}{2} \quad (b.9e)$$

$$C_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \quad (b.9h)$$

$$C_1 = -C_2^2 \beta_2 \quad (b.9f)$$

$$C_2 = 2 \left(\frac{C_1}{\beta_1} \right) \quad (b.9g)$$

$$C_1 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} \right) \quad (b.9i)$$

5). Exponencial

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{C_2} \right) \right] \quad (b.10)$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) \cong \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2 \quad (b.11)$$

Aproximando la función a un polinomio de orden 2, mediante Series de Taylor y para $h=C_2$:

$$f(h) \cong \gamma(h) \cong C_0 + C_1 - \left(\frac{5 C_1}{2 e^1}\right) + \left(\frac{2 C_1}{e^1 C_2}\right) h - \frac{1}{2 e^1} \left(\frac{C_1}{C_2^2}\right) h^2 \quad (\text{b.12})$$

Reagrupando términos:

$$f(h) \cong \gamma(h) \cong C_0 + C_1 \left[1 - \frac{5}{2 e}\right] + \frac{2}{e} \left(\frac{C_1}{C_2}\right) h - \frac{1}{2 e} \left(\frac{C_1}{C_2^2}\right) h^2 \quad (\text{b.13})$$

$$\beta_0 = C_0 + C_1 - \left(\frac{5 C_1}{2 e^1}\right) \quad (\text{b.13a})$$

$$\beta_1 = \frac{2}{e} \left(\frac{C_1}{C_2}\right) \quad (\text{b.13b}) \quad \beta_2 = -\frac{1}{2e} \left(\frac{C_1}{C_2^2}\right) \quad (\text{b.13c})$$

Una vez resuelta la regresión múltiple y calculados los coeficientes β_0 , β_1 y β_2 ; después de hacer el álgebra correspondiente el valor de C_0 , C_1 y C_2 podrán calcularse los coeficientes de la expresión (b.9).

Coefficientes:

$$C_0 = \beta_0 + \left(\frac{5}{2 e} - 1\right) C_1 \quad (\text{b.13d}) \quad C_0 = \beta_0 + \left(\frac{\beta_1^2}{8 \beta_2}\right) \left[e - \frac{5}{2}\right] \quad (\text{b.13h})$$

$$C_1 = \left(\frac{e}{2}\right) \beta_1 C_2 \quad (\text{b.13e})$$

$$C_1 = -\frac{e}{8} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right) \quad (\text{b.13i})$$

$$C_1 = -2 e \beta_2 C_2^2 \quad (\text{b.13f})$$

$$C_2 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right) \quad (\text{b.13g})$$

6). Gaussiano

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{C_2}\right)^2\right] \quad (\text{b.14})$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) \cong \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2 \quad (\text{b.15})$$

Aproximando la función a un polinomio de orden 2, mediante Series de Taylor y para $h=C_2$:

$$f(h) \cong \gamma(h) \cong C_0 + C_1 - \left(\frac{4 C_1}{e^1}\right) + \left(\frac{4 C_1}{e^1 C_2}\right) h - \left(\frac{C_1}{e^1 C_2^2}\right) h^2 \quad (\text{b.16})$$

Reagrupando términos:

$$f(h) \cong \gamma(h) \cong C_0 + C_1 \left[1 - \frac{4}{e}\right] + \frac{4}{e} \left(\frac{C_1}{C_2}\right) h - \frac{1}{e} \left(\frac{C_1}{C_2^2}\right) h^2 \quad (\text{b.17})$$

$$\beta_0 = C_0 + C_1 - \frac{4 C_1}{e} \quad (\text{b.17a})$$

$$\beta_1 = \frac{4 C_1}{e C_2} \quad (\text{b.17b})$$

$$\beta_2 = -\frac{C_1}{e C_2^2} \quad (\text{b.17c})$$

Una vez resuelta la regresión múltiple y calculados los coeficientes β_0 , β_1 y β_2 ; después de hacer el álgebra correspondiente el valor de C_0 , C_1 y C_2 podrán calcularse con las siguientes expresiones:

Coficientes:

$$C_0 = \beta_0 + C_1 \left(\frac{4}{e} - 1\right) \quad (\text{b.17d})$$

$$C_0 = \beta_0 + \left(\frac{e - 4}{16}\right) \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right) \quad (\text{b.17h})$$

$$C_1 = \left(\frac{e}{4}\right) \beta_1 C_2 \quad (\text{b.17e})$$

$$C_1 = -\frac{e}{16} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right) \quad (\text{b.17i})$$

$$C_1 = -e \beta_2 C_2^2 \quad (\text{b.17f})$$

$$C_2 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right) \quad (\text{b.17g})$$

B.3. Modelos sin intercepción con el Origen ($C_0=0$)

A). Lineal

$$\gamma(h) = C_1 h \quad (\text{b.18})$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) = \beta_1 h \quad (\text{b.19})$$

$$C_1 = \beta_1 \quad (\text{b.19a})$$

B). Esférico

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{C_2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{C_2} \right)^3 \right] \quad (\text{b.20})$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_1$$

Modelo linealizado:

Una vez resuelta la regresión múltiple se calcularon los coeficientes β_1 y β_2 :

$$\gamma(h) = \beta_1 h + \beta_2 h^3 \quad (\text{b.21})$$

$$\beta_1 = \frac{3}{2} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (\text{b.21a}) \quad \beta_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{C_1}{C_2^3} \right) \quad (\text{b.21b})$$

Coefficientes:

$$C_1 = \frac{2 \beta_1 C_2}{3} \quad (\text{b.21c}) \quad C_1 = -2 C_2^3 \beta_2 \quad (\text{b.21d})$$

$$C_2 = \pm \sqrt{-\frac{1}{3} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)} \quad (\text{b.21e})$$

C). Cúbico

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_1 \left[7 \left(\frac{h}{C_2} \right) - 8.75 \left(\frac{h}{C_2} \right)^3 + 3.5 \left(\frac{h}{C_2} \right)^5 - \left(\frac{h}{C_2} \right)^7 \right] \quad (\text{b.22})$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_1$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) = \beta_1 h + \beta_2 h^3 + \beta_3 h^5 + \beta_4 h^7 \quad (\text{b.22})$$

$$\beta_1 = 7 \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (\text{b.22a}) \quad \beta_2 = -8.75 \left(\frac{C_1}{C_2^3} \right) \quad (\text{b.22b})$$

$$\beta_3 = 3.5 \left(\frac{C_1}{C_2^5} \right) \quad (\text{b.22c}) \quad \beta_4 = - \left(- \frac{C_1}{C_2^7} \right) \quad (\text{b.22d})$$

Una vez resuelta la regresión múltiple y calculados los coeficientes β_1 , β_2 , β_3 y β_4 se podrán calcular los coeficientes C_1 y C_2 . Dado que polinomio ajustado es de grado 7, se tiene más de una solución; se tomará la que cubra las mejores condiciones para el variograma.

Coficientes:

$$C_1 = \frac{\beta_1 C_2}{7} \quad (\text{b.22e}) \quad C_2 = \sqrt{\frac{8.75}{-7} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)} \quad (\text{b.22i})$$

$$C_2 = \sqrt[6]{\frac{1}{7} \left(\frac{\beta_1}{\beta_4} \right)} \quad (\text{b.22j})$$

$$C_1 = \frac{\beta_3 C_2^5}{3.5} \quad (\text{b.22f}) \quad C_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_3} \right)} \quad (\text{b.22k})$$

$$C_1 = \frac{\beta_2 C_2^3}{-8.75} \quad (\text{b.22g}) \quad C_2 = \sqrt{\frac{-3.5}{8.75} \left(\frac{\beta_2}{\beta_3} \right)} \quad (\text{b.22l})$$

$$C_1 = \beta_4 C_2^7 \quad (\text{b.22h}) \quad C_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{-8.75} \left(\frac{\beta_2}{\beta_4} \right)} \quad (\text{b.22m})$$

D). Cuadrático

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_1 \left[2 \left(\frac{h}{C_2} \right) - \left(\frac{h}{C_2} \right)^2 \right] \quad (\text{b.23})$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_1$$

Modelo linealizado:

$$\gamma(h) = \beta_1 h + \beta_2 h^2 \quad (\text{b.24})$$

$$\beta_1 = 2 \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (\text{b.24a}) \quad \beta_2 = -\frac{C_1}{C_2} \quad (\text{b.24b})$$

Una vez resuelta la regresión múltiple y calculados los coeficientes β_1 y β_2 :

Coeficientes:

$$C_1 = \frac{C_2 \beta_1}{2} \quad (\text{b.24c}) \quad C_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \quad (\text{b.24e})$$

$$C_2 = 2 \left(\frac{C_1}{\beta_1} \right) \quad (\text{b.24d}) \quad C_1 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} \right) \quad (\text{b.24f})$$

E). Exponencial

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{C_2}\right) \right] \quad (\text{b.25})$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1$$

Aproximando la función a un polinomio de orden 2, mediante Series de Taylor y para $h=C_2$:

$$f(h) \cong \gamma(h) \cong C_1 - \frac{5 C_1}{2 e^1} + \frac{2}{e^1} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) h - \frac{1}{2 e^1} \left(\frac{C_1}{C_2^2} \right) h^2 \quad (\text{b.26})$$

Reordenando términos:

$$f(h) \cong \gamma(h) \cong C_1 \left[1 - \frac{5}{2e} + \frac{2}{e^2 C_2} \right] h - \frac{1}{2e} \left(\frac{C_1}{C_2^2} \right) h^2 \quad (\text{b.27})$$

Así, el modelo linealizado:

$$\gamma(h) \cong \beta_0 h + \beta_1 h^2 \quad (\text{b.28})$$

$$\beta_0 = C_1 - \frac{5 C_1}{2e^2} \quad (\text{b.28a})$$

$$\beta_1 = \frac{2}{e^2} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (\text{b.28b}) \quad \beta_2 = -\frac{1}{2e^2} \left(\frac{C_1}{C_2^2} \right) \quad (\text{b.28c})$$

Una vez resuelta la regresión múltiple y calculados los coeficientes β_0 , β_1 y β_2 ; después de hacer el álgebra correspondiente el valor de C_1 y C_2 podrán calcularse con las siguientes expresiones:

Coefficientes:

$$C_1 = \frac{2 e \beta_0}{2 e - 5} \quad (\text{b.28d})$$

$$C_1 = \left(\frac{e}{2} \right) \beta_1 C_2 \quad (\text{b.28e})$$

$$C_2 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \quad (\text{b.28g})$$

$$C_1 = -\frac{e}{8} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} \right) \quad (\text{b.28f})$$

F). Gaussiano

Para $h \leq C_2$:

$$\gamma(h) = C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{C_2} \right)^2 \right] \quad (\text{b.29})$$

Para el umbral $h > C_2$:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1$$

Aproximando la función a un polinomio de orden 2, mediante Series de Taylor y para $h=C_2$:

$$f(h) \cong \gamma(h) \cong C_1 - \left(\frac{4 C_1}{e}\right) + \left(\frac{4 C_1}{e C_2}\right) h - \left(\frac{C_1}{e C_2^2}\right) h^2 \quad (\text{b.30})$$

Reagrupando términos:

$$f(h) \cong \gamma(h) \cong C_1 \left[1 - \frac{4}{e}\right] + \frac{4}{e} \left(\frac{C_1}{C_2}\right) h - \frac{1}{e} \left(\frac{C_1}{C_2^2}\right) h^2 \quad (\text{b.31})$$

Así, el modelo linealizado:

$$\gamma(h) \cong \beta_1 h + \beta_2 h^2 \quad (\text{b.31})$$

$$\beta_0 = C_1 - \frac{4 C_1}{e} \quad (\text{b.31a})$$

$$\beta_1 = \frac{4}{e} \left(\frac{C_1}{C_2}\right) \quad (\text{b.31b})$$

$$\beta_2 = -\frac{1}{e} \left(\frac{C_1}{C_2^2}\right) \quad (\text{b.31c})$$

Una vez resuelta la regresión múltiple y calculados los coeficientes β_0 , β_1 y β_2 ; después de hacer el álgebra correspondiente el valor de C_1 y C_2 podrán calcularse con la siguiente expresión:

Coefficientes:

$$C_1 = \frac{e \beta_1 C_2}{4} \quad (\text{b.31d})$$

$$C_1 = \left(\frac{e}{e-4}\right) \beta_0 \quad (\text{b.31g})$$

$$C_1 = -e \beta_2 C_2^2 \quad (\text{b.31e})$$

$$C_1 = -\frac{e}{16} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right) \quad (\text{b.31h})$$

$$C_2 = -\frac{4 C_1}{\beta_1 e} \quad (\text{b.31f})$$

$$C_2 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right) \quad (\text{b.31i})$$

B.4. Resumen del Cálculo de los coeficientes C0, C1 y C2.

Funciones Utilizadas:

Cuadro b.1. Modelos utilizados para el ajuste del variograma teórico (Delhome, 1978)

Modelo	Función para ($0 < h \leq C_2$) y linealización	
Lineal	$\gamma(h) = C_0 + C_1 h$	(b.32)
	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h$	(b.32a)
Cuadrático	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[2 \left(\frac{h}{C_2} \right) - \left(\frac{h}{C_2} \right)^2 \right]$	(b.33)
	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2$	(b.33a)
Cúbico	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[7 \left(\frac{h}{C_2} \right) - 8.75 \left(\frac{h}{C_2} \right)^3 + 3.5 \left(\frac{h}{C_2} \right)^5 - \left(\frac{h}{C_2} \right)^7 \right]$	(b.34)
	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^3 + \beta_3 h^5 + \beta_4 h^7$	(b.34a)
Esférico	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{C_2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{C_2} \right)^3 \right]$	(b.35)
	$\gamma(h) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^3$	(b.35a)
Exponencial (*)	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{C_2} \right) \right]$	(b.36)
	$\gamma(h) \cong C_0 + C_1 \left[1 - \frac{5}{2e} \right] + \frac{2}{e} \left(\frac{C_1}{C_2} \right) h - \frac{1}{2e} \left(\frac{C_1}{C_2^2} \right) h^2$ (*)	(b.36a)
	$\gamma(h) \cong \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2$	(b.36b)
Gaussiano (*)	$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{C_2} \right)^2 \right]$	(b.37)
	$\gamma(h) \cong C_0 + C_1 - \left(\frac{4 C_1}{e} \right) + \left(\frac{4 C_1}{e C_2} \right) h - \left(\frac{C_1}{e C_2^2} \right) h^2$ (*)	(b.37a)
	$\gamma(h) \cong \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 h^2$	(b.37b)

Cuando $h > C_2$: $\gamma(h) = C_0 + C_1$ (para los modelos Cuadrático, Cúbico y Esférico)

(*) Función aproximada a polinomio, mediante Series de Taylor y para $h=C_2$.

Coefficientes finales:

El cálculo de los coeficientes finales C_0 , C_1 y C_2 de las expresiones del cuadro (b.1); se podrán calcular con las ecuaciones que se muestran en los cuadros (b.2) al (b.7).

Cuadro b.2. Cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico

Modelo	Partiendo del origen ($C_0=0$) / Con Efecto Pepita ($C_0=\beta_0$)	
	C_2 (Sill)	C_1 (Rango)
Cuadrático	$C_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \quad (b.38)$	$C_1 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} \right) \quad (b.38a)$
Cúbico	$C_2 = \sqrt{\frac{8.75}{-7} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)} \quad (b.39a)$	$C_1 = \frac{\beta_1 C_2}{7} \quad (b.39)$
	$C_2 = \sqrt[6]{\frac{1}{7} \left(\frac{\beta_1}{\beta_4} \right)} \quad (b.39b)$	
	$C_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_3} \right)} \quad (b.40)$	$C_1 = \frac{\beta_3 C_2^5}{3.5} \quad (b.40a)$
	$C_2 = \sqrt{\frac{-3.5}{8.75} \left(\frac{\beta_2}{\beta_3} \right)} \quad (b.41)$	$C_1 = \frac{\beta_2 C_2^3}{-8.75} \quad (b.41a)$
	$C_2 = \sqrt[4]{\frac{1}{-8.75} \left(\frac{\beta_2}{\beta_4} \right)} \quad (b.42)$	$C_1 = \beta_4 C_2^7 \quad (b.42a)$
Esférico	$C_2 = \pm \sqrt{-\frac{1}{3} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)} \quad (b.43)$	$C_1 = \frac{2 \beta_1 C_2}{3} \quad (b.43a)$
		$C_1 = -2 C_2^3 \beta_2 \quad (b.43b)$

Cuadro b.3. Simplificación del cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico

Modelo	Partiendo del origen ($C_0=0$) / Con Efecto Pepita ($C_0=\beta_0$)			
	C_2 (Sill)		C_1 (Rango)	
Cuadrático	$C_2 = -0.5 \left(\beta_1 / \beta_2 \right)$	(b.44)	$C_1 = -0.25 \left(\beta_1^2 / \beta_2 \right)$	(b.44a)
Cúbico	$C_2 = 1.11803 \sqrt{-\beta_1 / \beta_2}$	(b.45a)	$C_1 = 0.14286 \beta_1 C_2$	(b.45)
	$C_2 = 0.72302 \sqrt[6]{\beta_1 / \beta_4}$	(b.45b)		
	$C_2 = 0.84090 \sqrt[4]{\beta_1 / \beta_3}$	(b.46)	$C_1 = 0.28571 \beta_3 C_2^5$	(b.46a)
	$C_2 = 0.63246 \sqrt{-\beta_2 / \beta_3}$	(b.47)	$C_1 = -0.11429 \beta_2 C_2^3$	(b.47a)
	$C_2 = 0.58143 \sqrt[4]{-\beta_2 / \beta_4}$	(b.48)	$C_1 = \beta_4 C_2^7$	(b.48a)
Esférico	$C_2 = 0.57735 \sqrt{-\beta_1 / \beta_2}$	(b.49)	$C_1 = 0.66667 \beta_1 C_2$	(b.49a)
			$C_1 = -2 C_2^3 \beta_2$	(b.49b)

Cuadro b.4. Cálculo de los coeficientes C_1 y C_2 del variograma teórico

Modelo	Coeficientes para Variogramas partiendo del origen ($C_0=0$)	
	C_2 (Sill)	C_1 (Rango)
Exponencial	$C_2 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)$ (b.50)	$C_1 = -\frac{e}{8} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} \right)$ (b.50a)
	$C_2 = \sqrt{\frac{\beta_0}{\beta_2(5-2e)}}$ (b.51)	$C_1 = \frac{2e\beta_0}{2e-5}$ (b.51a)
Gaussiano	$C_2 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)$ (b.52)	$C_1 = -\frac{e}{16} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} \right)$ (b.52a)
	$C_2 = \frac{4}{(e-4)} \left(\frac{\beta_0}{\beta_1} \right)$ (b.53)	$C_1 = \frac{e\beta_0}{e-4}$ (b.53a)

Cuadro b.5. Simplificación del cálculo de los coeficientes C_1 y C_2 del variograma teórico

Modelo	Coeficientes para Variogramas partiendo del origen ($C_0=0$)	
	C_2 (Sill)	C_1 (Rango)
Exponencial	$C_2 = -0.25 \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)$ (b.54)	$C_1 = -0.33979 \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} \right)$ (b.54a)
	$C_2 = 1.51348 \sqrt{-\beta_0/\beta_2}$ (b.55)	$C_1 = 12.45308 \beta_0$ (b.55a)
Gaussiano	$C_2 = -0.25 \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right)$ (b.56)	$C_1 = -0.16989 \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2} \right)$ (b.56a)
	$C_2 = -3.12081 \left(\frac{\beta_0}{\beta_1} \right)$ (b.57)	$C_1 = -2.12081 \beta_0$ (b.57a)

Cuadro b.6. Cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico

Modelo	Coeficientes para Variogramas con efecto pepita ($C_0 \neq 0$)	
	C_2 (Sill)	C_1 (Rango)
Exponencial	$C_0 = \beta_0 + \left(e - \frac{5}{2}\right) \left(\frac{\beta_1^2}{8\beta_2}\right)$ (b.58)	
	$C_2 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)$ (b.59)	$C_1 = -\frac{e}{8} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right)$ (b.59a)
Gaussiano	$C_0 = \beta_0 + \left(\frac{e-4}{16}\right) \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right)$ (b.60)	
	$C_2 = -\frac{1}{4} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)$ (b.61a)	$C_1 = -\frac{e}{16} \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right)$ (b.61b)

Cuadro b.7. Simplificación de cálculo de los coeficientes C_0 , C_1 y C_2 del variograma teórico

Modelo	Coeficientes para Variogramas con efecto pepita ($C_0 \neq 0$)	
	C_2 (Sill)	C_1 (Rango)
Exponencial	$C_0 = \beta_0 + 0.02729 \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right)$ (b.62)	
	$C_2 = -0.25 \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)$ (b.63)	$C_1 = -0.33979 \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right)$ (b.63a)
Gaussiano	$C_0 = \beta_0 - 0.08011 \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right)$ (b.64)	
	$C_2 = -0.25 \left(\frac{\beta_1}{\beta_2}\right)$ (b.65a)	$C_1 = -0.16989 \left(\frac{\beta_1^2}{\beta_2}\right)$ (b.65b)

C. ANTECEDENTES DE SOFTWARE ESPECIALIZADO EN LA NIVELACIÓN DE TIERRAS.

C.1. Programas de uso general	176
C.1.1. SURFER	176
C.1.2. AutoCAD Civil 3D	180
C.2. Software especializado en nivelación de tierras.....	182
C.2.1. GeoSection	182
C.2.2. N4E.....	184
C.2.3. SISTEMAT	185
C.2.4. NIVTERRA 1.0.....	187
C.2.5. SINIVET.....	189
C.2.6. TRIMBLE WM.....	194
C.2.7. Comparación entres programas de nivelación de tierras.....	195

C.1. Programas de uso general

Existe software de uso general que pudiera ser una herramienta poderosa en el apoyo para el diseño de la nivelación de tierras, dentro de esto podemos mencionar a SURFER, el cual permite al usuario realizar un proceso de nivelación en la Ingeniería Civil, cuyo concepto es un poco distinto al agrícola ya que para la construcción nivelar significa “pendiente cero”. Otro programa de apoyo para el análisis de la topografía y el trazo y cuantificación de volúmenes en AutoCAD Civil 3D, elaborado por la empresa Autodesk; un programa muy joven y con varias novedades en el trabajo del movimiento de tierras. A continuación se hablará acerca de estos con el fin de mostrar sus características particulares y potenciales que permitan el trabajo de proyectos de nivelación de tierras.

C.1.1. SURFER

Surfer, es un programa elaborado por la empresa Golden Software, especializado en la generación de Isolíneas (curvas que unen puntos de igual valor) mediante un proceso geoestadístico denominado interpolación espacial. El análisis de las isolineas se hace mediante una cuadrícula o retícula, de ahí que cuente con un módulo denominado GRID, que es el más importante, ya que en éste se realiza el proceso de interpolación y estimación de volúmenes.

En sus primeras versiones (hasta la versión 4.14) contaba con cuatro módulos: INPUT, GRID, TOPO y PLOT. Las nuevas versiones de Surfer para Windows cuenta con un ambiente de dibujo en el cual se han integrado y modernizado los módulos mencionados anteriormente y algunos otros para facilitarle al usuario la elaboración de los planos (Figura c.1).

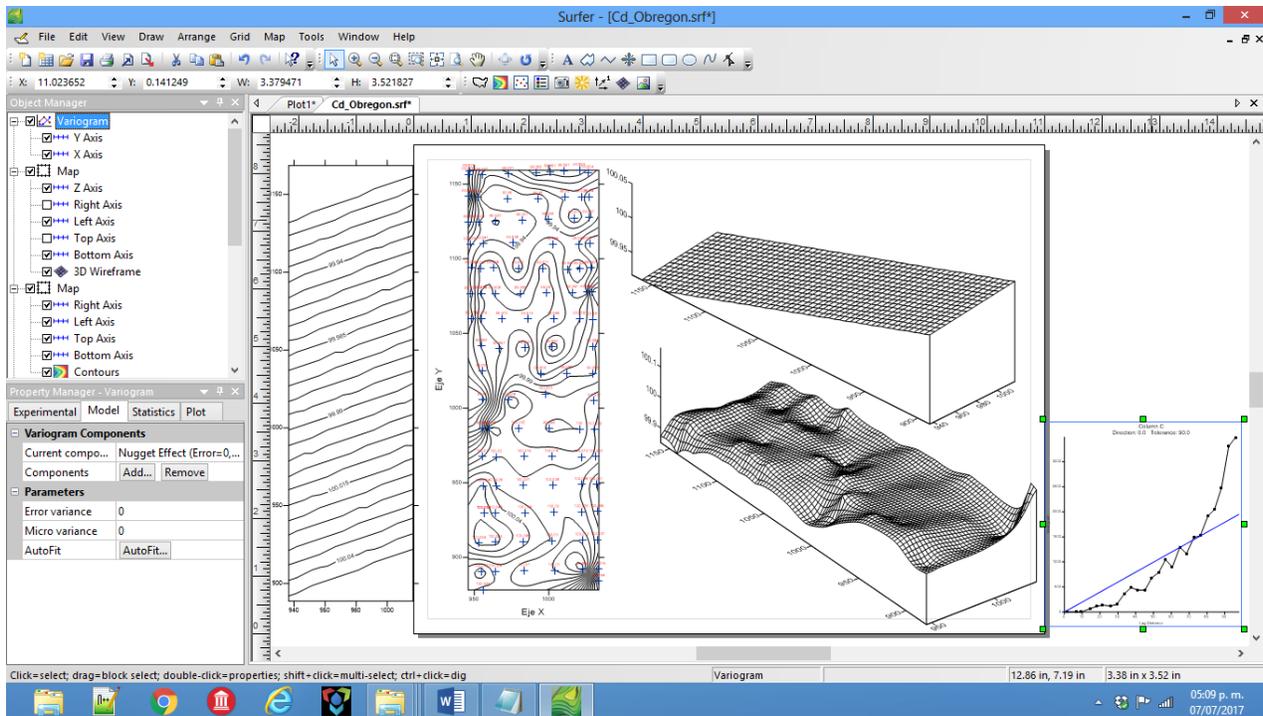


Figura c.1. El ambiente de SURFER

La entrada de datos se realiza a través de una hoja de trabajo parecida al ambiente de Excel; la interpolación se realiza con el módulo GRID mediante un archivo en código ASCII o en Excel con formato $(X_1, Y_1, Z_1; X_2, Y_2, Z_2; \dots; X_n, Y_n, Z_n)$. Hasta la versión 4.14 se contaba con 3 métodos para el cálculo de los pesos de la interpolación: ***Inverso de la Potencia de la Distancia, Kriging y Mínima Curvatura***; en las versiones posteriores (versiones 6, 7 y 8) se integraron seis métodos más: ***Método de Shepard Modificado, Vecinos Naturales, Vecinos Más Cercanos, Regresión Polinomial, Función de Base Radial, Triangulación con Interpolación Lineal***; En las versiones 9 y 10 se integran tres métodos más: ***Promedio Móvil, Datos Métricos y Polinomios locales*** (Figura c.2).

A diferencia de otros programas, Surfer permite realizar un tratamiento de la información de tal forma que permite importarla y exportarla en diversos formatos raster y vectoriales. En la ingeniería se ocupa mucho en la recreación de diversos mapas de isolneas, entre los cuales se puede mencionar mapas: topográficos, climáticos, isobatas, isohipsas, isobaras, isorendimiento, etc. y Modelos de Elevación Digital a través de una cuadrícula homogénea y su respectiva visualización es 3D.

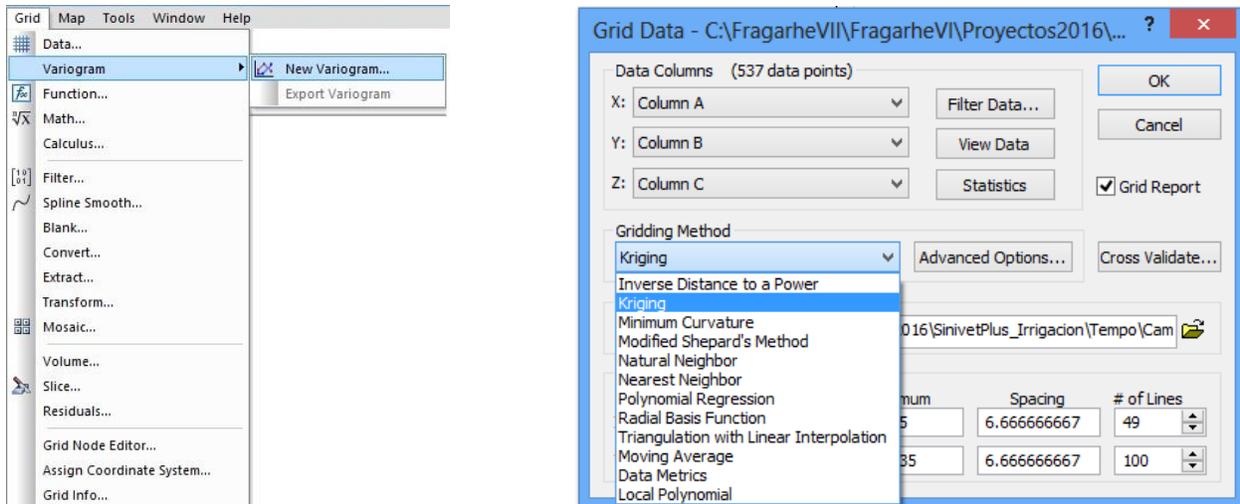


Figura c.2. Módulo GRID. Interpolación de datos, variogramas y cálculo de volúmenes

En estas últimas versiones se ha integrado el concepto de “Mapa Base”, a través del cual se integran al mapa las características de infraestructura más importantes.

El programa permite realizar cálculo de volúmenes de corte y relleno para nivelación, blanqueado de archivos, ajuste de funciones, así como el cálculo de Residuales.

Cuenta además, con un módulo independiente llamado “Scripter”, ambiente en el cual es posible diseñar un programa para automatizar el sistema para que realice rápidamente procesos largos y tediosos. El programa se debe desarrollar en un formato script de Visual Basic.

Para el caso específico de la *generación de la cuadrícula* cuando se elige la opción **Kriging** para el cálculo de los pesos de la interpolación, el programa cuenta con la opción de poder definir alguno de los 7 modelos para el ajuste del semivariograma experimental a un semivariograma teórico (Figura c.3). Una desventaja de esta ajuste es que inicialmente surfer considera que los modelos del semivariograma no tiene el Efecto de Pepita, es decir para el programa $C_0=0$. Inicialmente el cálculo se realiza con el modelo lineal y dependerá del usuario el cálculo del Rango (C_2) o Longitud (A); y por supuesto también de la escala (C), que en las expresiones anteriores se ha definido como C_1 .

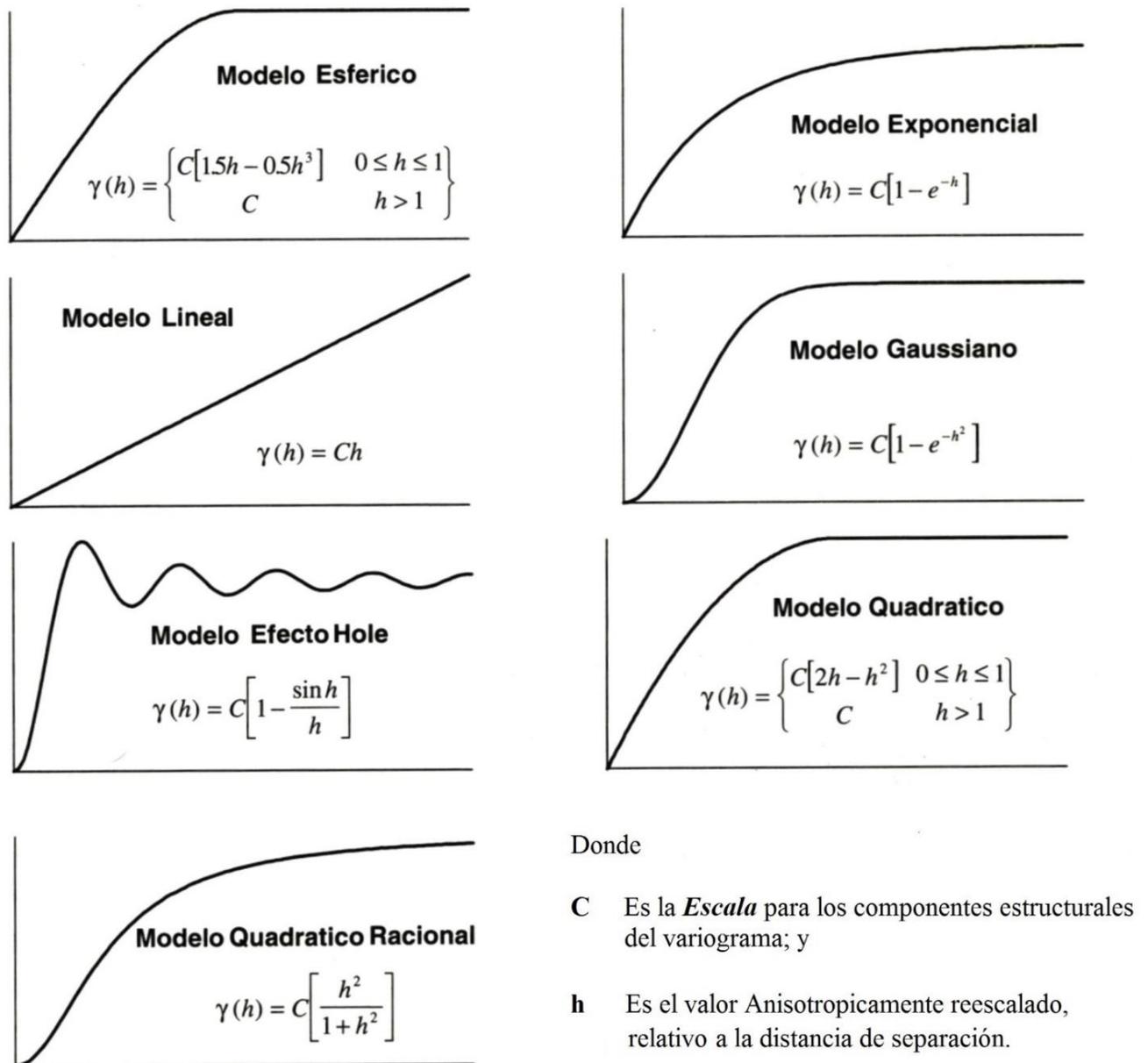


Figura c.3. Modelos de Variograma disponibles en SURFER

El cálculo del volumen se puede realizar combinando las opciones del menú **GRID: Volume...** y **Residuals...** (Figura c.2).

C.1.2. AutoCAD Civil 3D

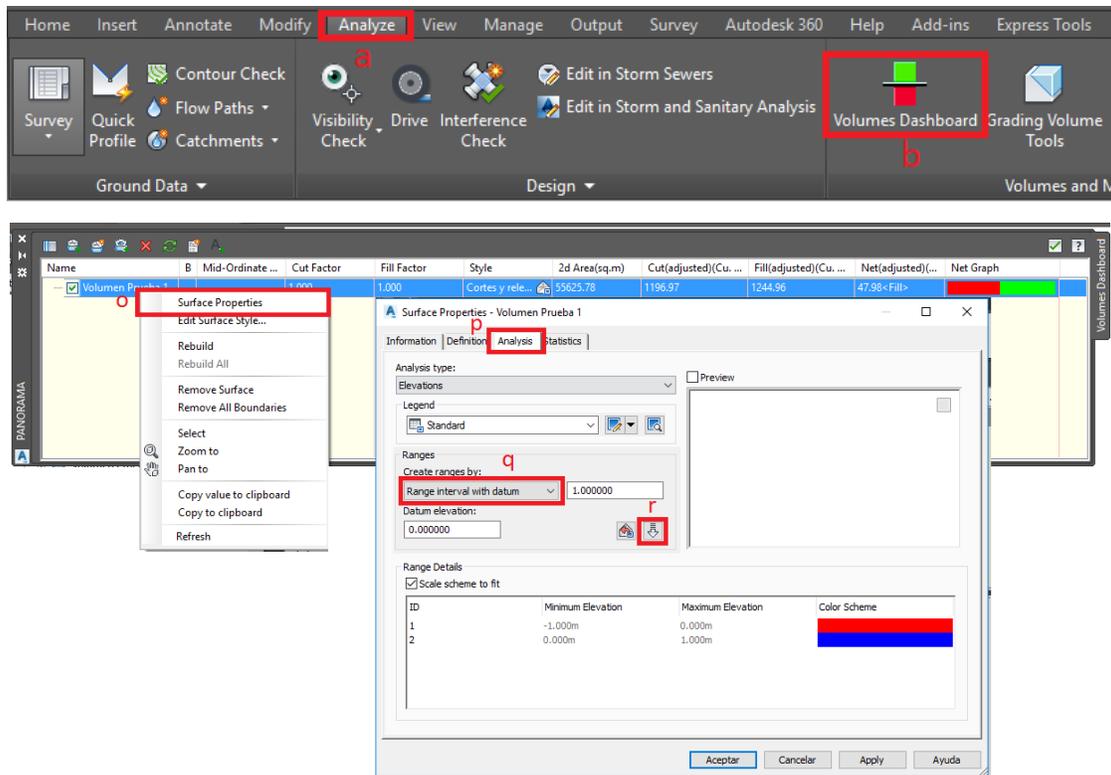


Figura c.4. Menú para el cálculo de volúmenes y superficies en AutoCAD Civil 3D

El AutoCAD Civil 3D es una herramienta de cálculo y diseño muy útil en el desarrollo de: diseño de sitio, diseño urbanístico, carreteras, **movimiento de tierras**, cálculo topográfico, replanteo de información, solución BIM (Building Information Modeling - Modelado con Información para la Construcción -). para ingeniería civil, etc. Es un programa creado por AutoDESK, que cuenta con comandos y funciones similares al AutoCAD, más otras funciones dedicadas específicamente a la infraestructura civil. Cuenta con herramientas específicas de diseño 3D, para el diseño de infraestructura; algunas de estas herramientas son la exportación y vínculo con otros software como google earth, que permite una fácil exportación de mapas y relieves por puntos de coordenadas (x,y,z). Es una ayuda a los equipos de trabajo para elaborar proyectos de transporte, urbanismo y medio ambiente en menos tiempo y con más calidad.

Una característica interesante es que los objetos al ser modificados, automáticamente regeneran el diseño y recalculan la información en tablas y perfiles, estas características ayudarán a hacer cambios en las propuestas sin tener que rehacer todo el proyecto de nuevo. Permite a los profesionales de la infraestructura ya sea ingenieros civiles, arquitectos, topógrafos, Ingenieros en Irrigación etc.; tener una actualización constante de información y mejor representación de diversos proyectos. Además cuenta con dibujos de señalización, estructuras previas, plantillas y sitios de trabajo precargados que son de gran ayuda a la experiencia del usuario. Para el caso de la Irrigación puede ayudar al diseño de obras hidráulicas como son, las presas, represas, diseño de sistemas de riego, nivelación de tierras, etc. Además del cálculo topográfico que todo esto conlleva.

En particular para proyectos de nivelación de tierras, el programa permite procesar datos de campo (x,y,z) tomados mediante un levantamiento topográfico y realizar un plano de curvas de nivel ya sea del terreno natural o del terreno nivelado si se cuenta con la ecuación del plano, así como, se puede obtener un plano de cortes y rellenos para el movimiento de tierras, mediante las herramientas de superficie disponibles en el sistema (Figura c.4 y c.5).

Una superficie en AutoCAD Civil3D se refiere a un conjunto de puntos en un espacio de tres dimensiones colocados dentro de un bloque. Cada punto de una superficie está definido por tres coordenadas: (x,y,z) . Una vez creada la superficie se habilitan varias opciones que se le pueden aplicar a la superficie, como copiarlas junto con todas sus propiedades o, hacer cálculo de volúmenes entre dos superficies para la nivelación de tierras (Figura c.4).

En resumen AutoCAD Civil 3D contiene un conjunto completo de herramientas que el usuario puede utilizar para descargar y procesar la información topográfica, para realizar ajustes a la red y para importar puntos de levantamiento a un dibujo 3D (AutoDESK, 2012).

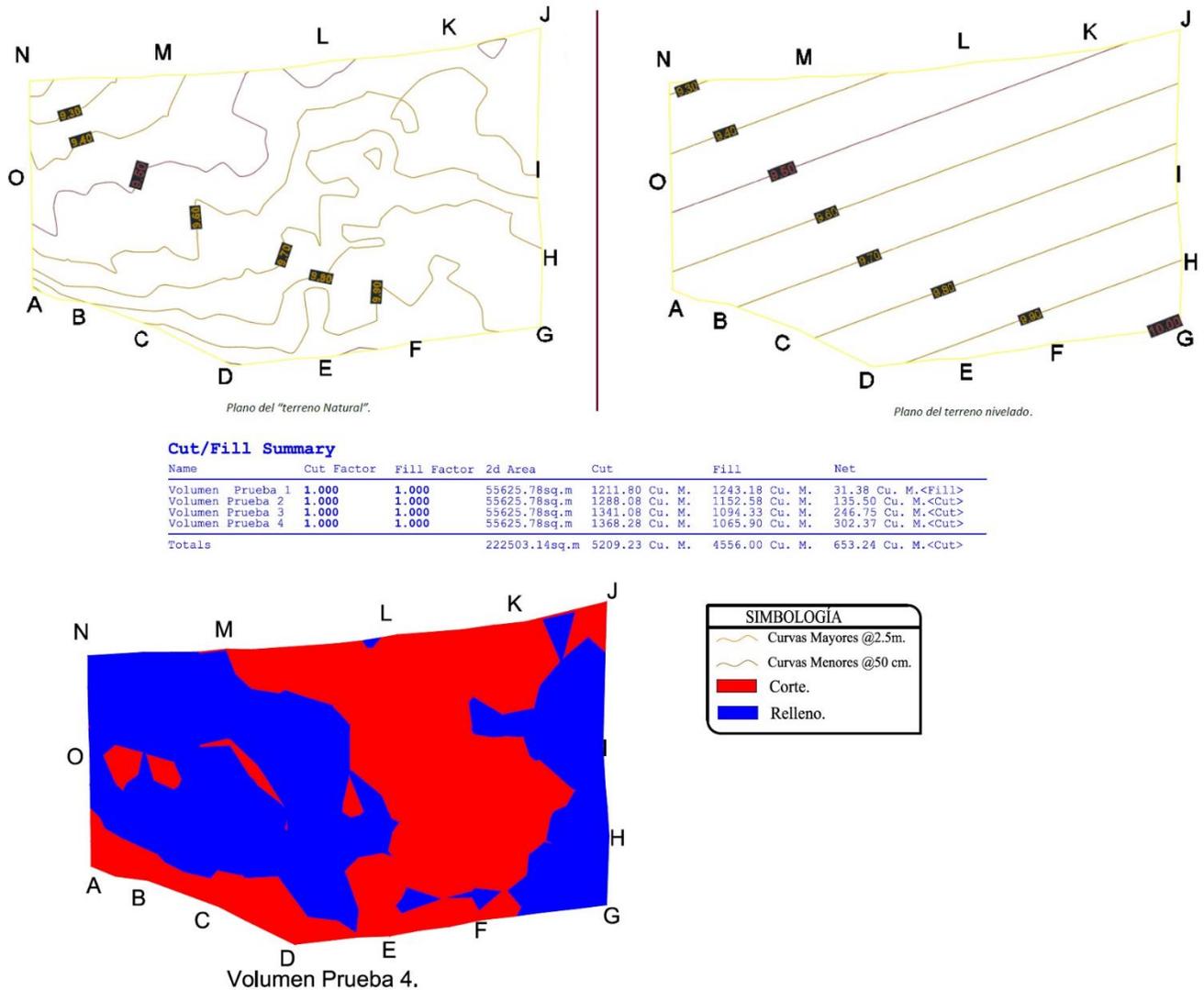


Figura c.5. Planos posibles de elaborar con las herramientas de AutoCAD Civil 3D

C.2. Software especializado en nivelación de tierras

C.2.1. GeoSection

GeoSection es un programa desarrollado por la empresa privada Topo Urba (Topografía Proyecto Urbano), es una aplicación gráfica, diseñada para ingeniería civil y topográfica, que está orientada al diseño de sitios de construcción y manejo topográfico general. La

versión “GeoSection AutoCAD” está diseñado para ser agregado, como complemento, a AutoCAD con una interfaz en español.

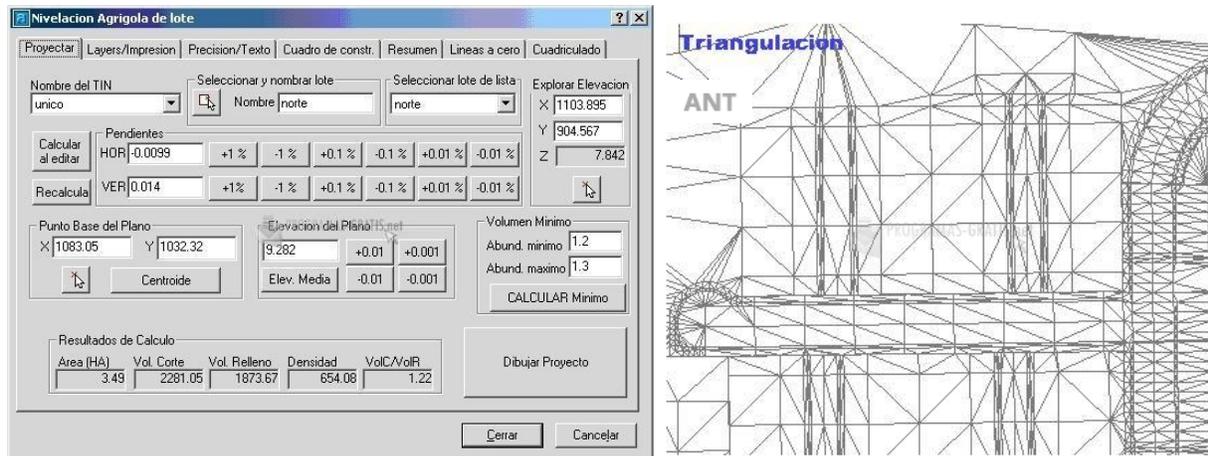


Figura c.6. El programa GeoSection AutoCAD. Empresa TopoUrban.

Con GeoSection para AutoCAD se puede llevar a cabo las siguientes acciones: administración de proyectos topográficos, diseño de puntos y vértices, control de trazos y poligonales, lotificaciones, diseño de curvas de nivel y modelos digitales del terreno, dibujo de secciones transversales topográficas con herramientas específicas, perfiles longitudinales, cálculo de volúmenes entre secciones transversales y entre mallas, proyectos de vías de comunicación o cualquier tipo de sección transversal, nivelación de tierras agrícolas, etcétera (Figura c.6).

El programa está orientado al tratamiento de topografías y a partir de ellas diseñar proyectos que involucran movimiento de tierras de cualquier tipo como su proyecto específicos de vías de comunicación, vialidades, obras hidroagrícolas y cualquier otro tipo de estructura de cortes y terraplenes. Dentro de sus características generales hace uso de una metodología propia de proyectos de cortes y rellenos, estableciendo y jerarquizando los procesos involucrados, haciendo un uso práctico de conceptos como conjunto de puntos, ejes, perfiles, secciones transversales, generación de triangulación y curvas de nivel, etc.

C.2.2. N4E

Es un programa especializado en los proyectos de nivelación de tierras, creado por la compañía de Leyca, dentro de las variantes interesantes que presenta N4E se tiene que puede realizar los proyectos en dos modalidades:

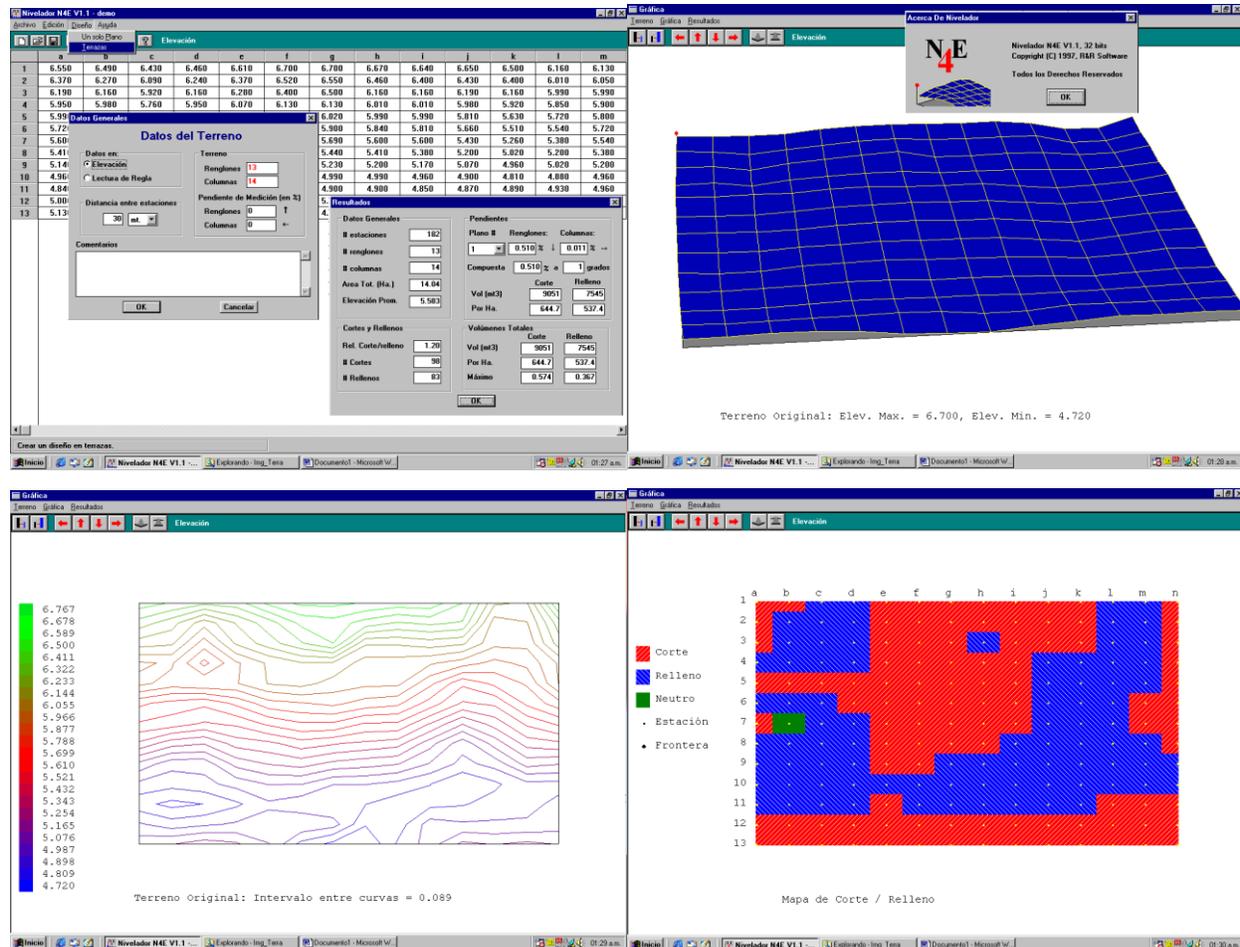


Figura c.7. Programa N4, LEICA, México. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula).

Un solo plano.- Ejecutando los cálculos y presentando en pantalla el diseño con los siguientes valores: Nombre del diseño, pendientes de mejor ajuste en renglones y columnas, volúmenes de mejor ajuste de corte y relleno, pendientes de diseño de cada plano, volúmenes de corte y relleno de cada plano y total, parámetros de diseño: Relación corte/relleno y volúmenes a importar y exportar.

Terrazas.- Permite optimizar el proceso de nivelación del terreno dividiéndolo en secciones llamadas terrazas, que se calcularán independientemente. Este proceso se lleva a cabo con un ciclo que consiste en hacer divisiones en el terreno, seleccionando las estacas que forman los límites entre ellas. Las restricciones para dichas divisiones son que deben iniciar en un límite del terreno o terraza y terminar en otro o el mismo límite (Figura c.7).

C.2.3. SISTEMAT

Es un programa desarrollado por *Leyca System Argentina*, es un software que no requiere de profundos conocimientos de topografía y computación, permitirá proyectar un sistema de riego por gravedad y estimar movimientos de tierra de manera muy sencilla.

Es un software para el diseño de proyectos y cálculo de movimiento de tierra con los datos de altura, ingresados en una hoja de trabajo, se podrá representar el relieve del terreno en tres dimensiones o curvas a nivel. Estos gráficos ayudarán a definir la localización de canales principales, acequias, drenes y límites de cada cuadro o área de riego.

Para cada cuadro, el sistema calculará las pendientes naturales que se podrán tomar como referencia para decidir la pendiente de riego y transversal más convenientes. En muchas ocasiones la cuadrícula del levamiento topográfico realizada en el campo no coincide con la orientación de los cuadros a diseñar, en particular en aquellos casos en que el proyecto debe adaptarse a una topografía accidentada o proyectos donde predomina los diseños en función de las curvas a nivel, como pueden ser sistemas de riego para el arroz, caña de azúcar, etc. SISTEMAT ofrece una herramienta capaz de proyectar formas de cuadros irregulares siguiendo el contorno de curvas a nivel o accidentes topográficos significativos (Figura c.8).

Incorpora como herramienta de cálculo del movimiento de suelo, un "*cuadrante*" que permite asignar el valor de la pendiente de riego y trasversal en cualquier sentido y dirección, girando este cuadrante se genera el ángulo de riego respecto de la cuadrícula

inicial de relevamiento, este procedimiento permite hallar el menor volumen de movimiento de tierra. El cálculo de movimiento de tierra depende de distintos parámetros, como pendientes proyecto, coeficiente de compactación, volumen de reserva para la construcción de terraplenes o caminos etc., a partir de estas variables el sistema calculará las cotas proyecto para el menor volumen de movimiento de tierra posible, compensando el volumen de corte y de relleno.

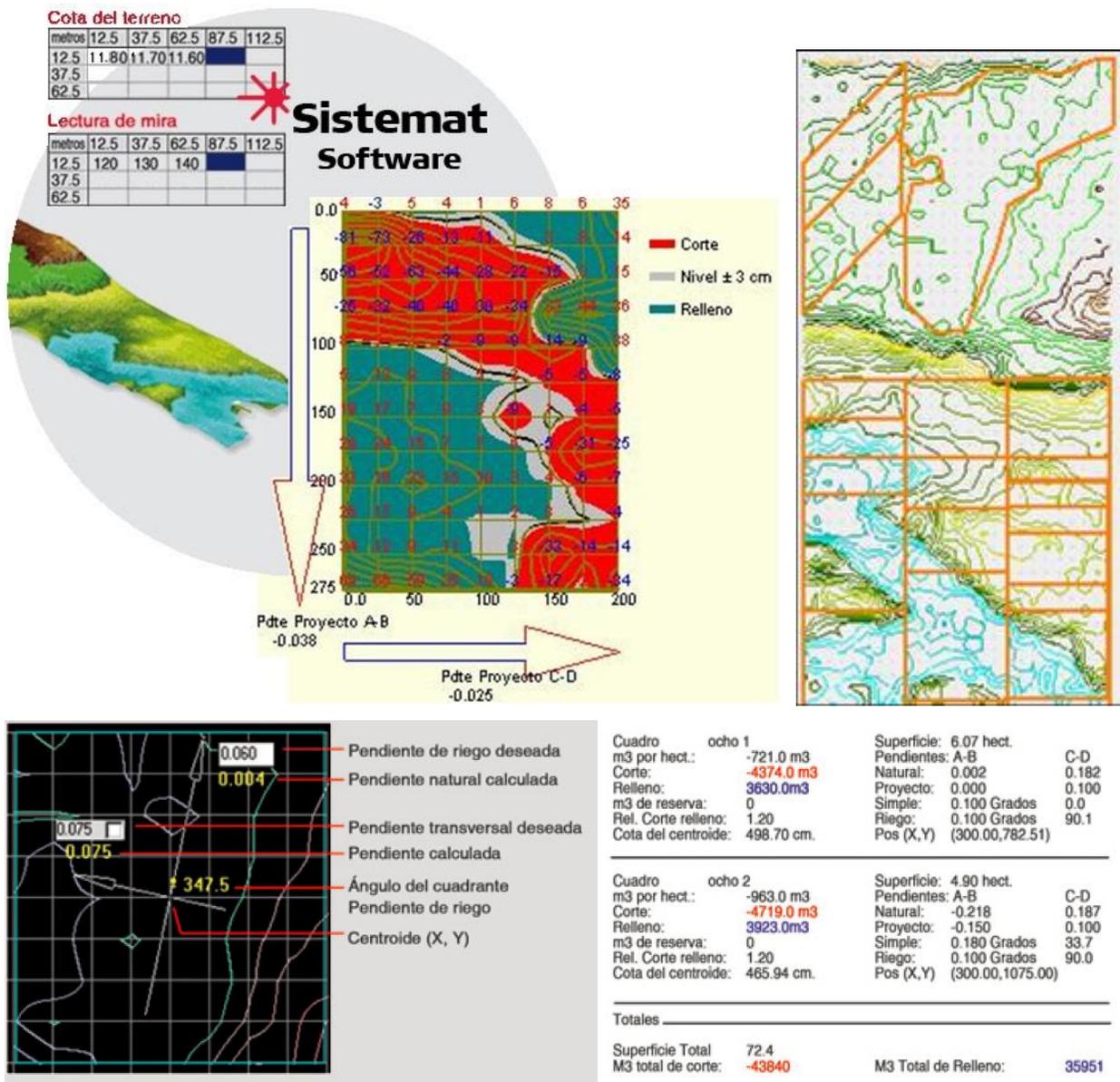


Figura c.8. Programa SISTEMAT, LEICA Argentina. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula)

Para un exhaustivo análisis de la profundidad de corte en cada estaca, el programa, gráfica sobre el cuadro en diseño círculos de color rojo proporcionales al mayor corte y azul para los rellenos. Este gráfico le permitirá analizar el corte exagerado del suelo, realizando un proyecto conservacionista.

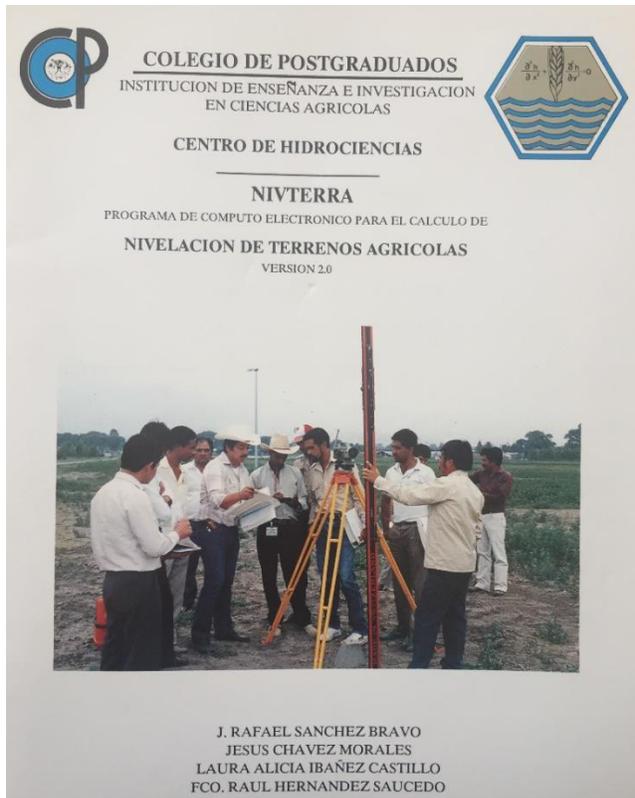
En diseños más complejos donde se requiere regar largas distancias, es necesario hacer terrazas para evitar mover el menor volumen de tierra, un gráfico de perfiles de los cuadros junto a la información de altura de cada lado en combinación con la herramienta "Cuadrante", le permitirá rápidamente generar las terrazas en cascadas, minimizando el tiempo de diseño. Con la información representada gráficamente le será muy fácil detectar posibles errores de diseño, podrá observar alturas relativas de un paño respecto de otro, pendientes confluentes entre paños que podrían ocasionar anegamiento por exceso de riego o lluvias. Podrá realizar su presupuesto de obra, con un completo informe de totales volúmenes de tierra a mover con detalles para cada cuadro. Para cada paño se podrán generar distintos gráficos de corte y relleno, que ayudaran al maquinista orientarse en la ejecución del proyecto.

C.2.4. NIVTERRA 1.0

Se han desarrollado muchos programas de computadora relativos al tema de la nivelación de terrenos agrícolas, buscando siempre ahorrar tiempo en el diseño y realizar los calculo óptimos con el menor costo posible: en 1968 Cobarrubias desarrolló un programa para una computadora CDC-3300, que permitía resolver un número determinado de alternativas, definidas en función de las pendientes deseadas y calculadas por el método de mínimos cuadrados aplicado a las pendientes promedio.

Chávez 1974, adaptó el programa anterior a una computadora IBM-370/145 originando el programa NIVTERRA, posteriormente Chávez e Ibañez (1988) desarrollaron el programa NIVTERRA versión 1.0, cuyas características principales fueron su factibilidad de interactuar al usuario; era amigable, se desarrolló para computadoras personales y fue

escrito en fortran 77 y al cual se le realizaron nuevas modificaciones, dando por resultado la versión 1.1 del mismo (Figura c.9).



J. RAFAEL SANCHEZ BRAVO
 JESUS CHAVEZ MORALES
 LAURA ALICIA IBAÑEZ CASTILLO
 FCO. RAUL HERNANDEZ SAUCEDO



Figura 4.2. Antecedentes del sistema NIVTERRA.

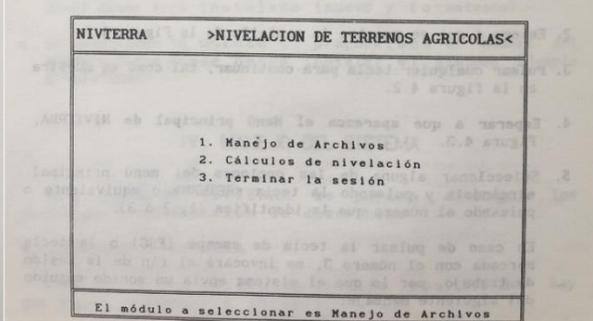


Figura 4.3. Menú principal del sistema NIVTERRA.

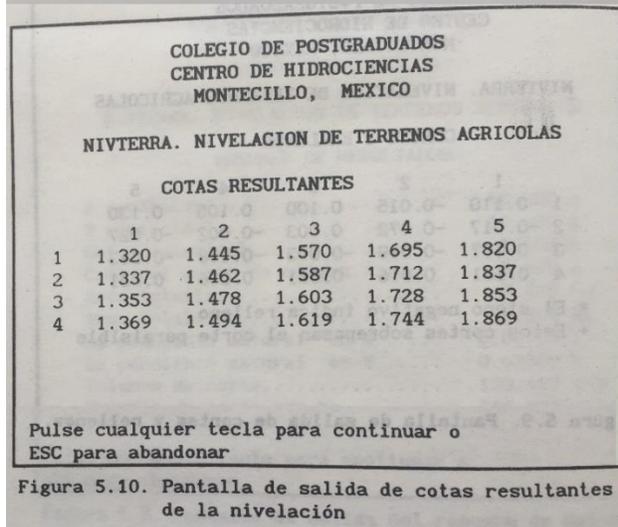


Figura 5.10. Pantalla de salida de cotas resultantes de la nivelación

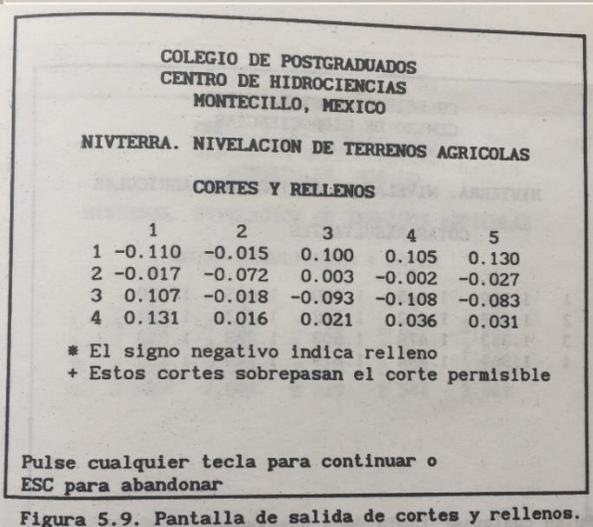


Figura 5.9. Pantalla de salida de cortes y rellenos.

Figura c.9. Programa NIVTERRA 2.0. Chavez M.J., Ibañez C.L.A, Sanchez B.J.R, Hernandez S.H.R. 1988. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula).

C.2.5. SINIVET

En 1991 Sánchez et. al., desarrollan el programa NIVTERRA 2.0 totalmente amigable al usuario escrito en lenguaje de programación Turbo Pascal versión 5.5. Esta fue la última versión de NIVTERRA, sin embargo, para Sánchez sería el inicio del desarrollo de varios programas relacionados con el tema de la nivelación de tierras.

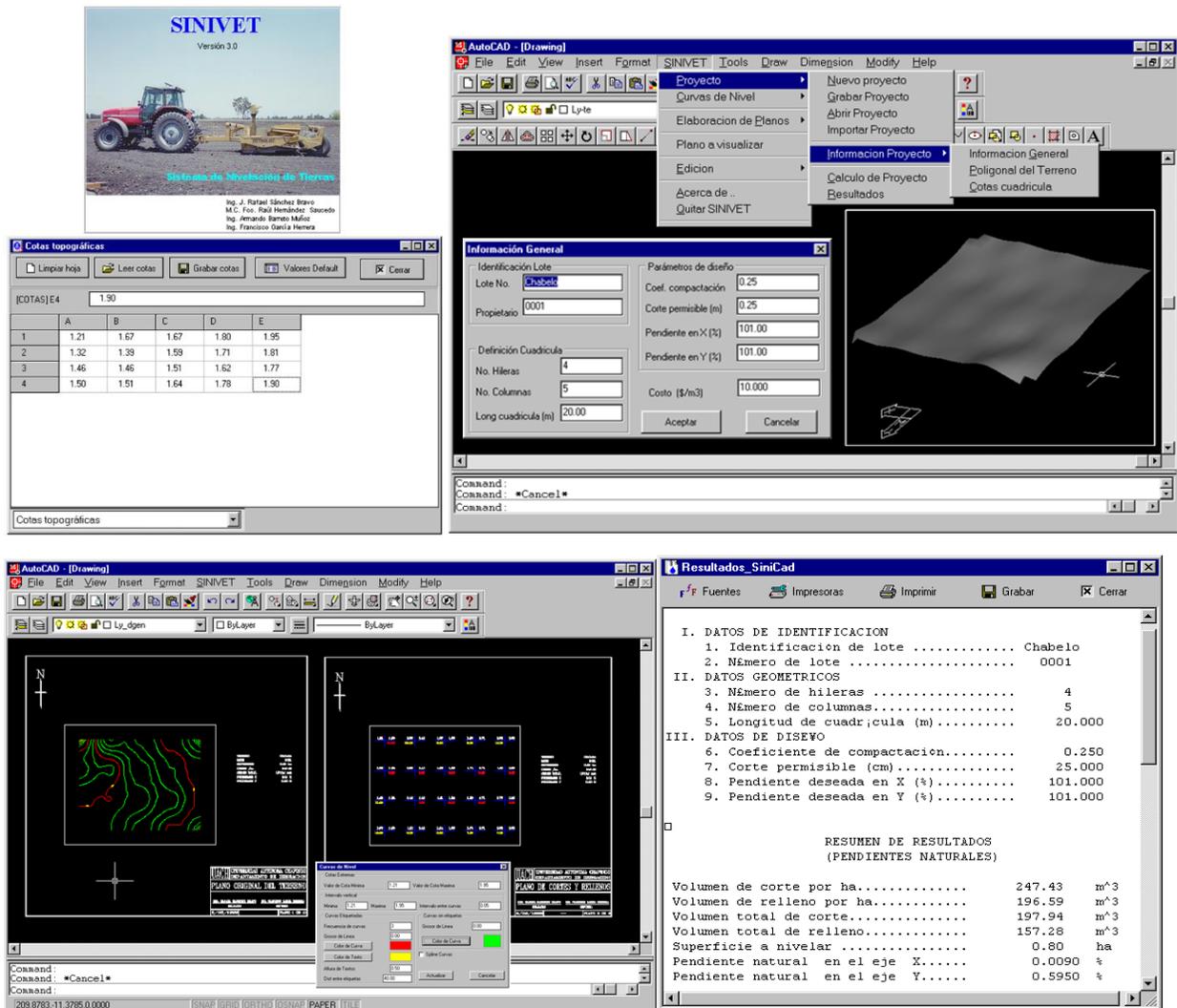


Figura c.10. SINIVET 3.1 para Windows y para AutoCAD, Barrero M.A., García H.F., Sánchez B.J.R y Hernández S.F.R, 2005. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula).

En 1992 Sánchez y Hernández presentan un programa que involucra criterios prácticos para el desarrollo de los proyectos de nivelación, SINIVET 1.0; el cual calculaba pendientes

del plano proyecto, a partir de cotas topográficas del terreno capturadas mediante una cuadrícula rectangular, utilizando el método general de mínimos cuadrados. Se podía aplicar en terrenos de cualquier forma geométrica y obteniendo datos de construcción, volúmenes de corte y costo del movimiento de tierras.

Sánchez, Hernández y García, en 1995 perfeccionan el programa SINIVET, de tal forma que la versión 2.0, fue diseñada con un mayor número de bondades; se desarrolló una interface que permitía utilizar el sistema SURFER para DOS, en la generación y edición de los planos topográficos y de cortes y rellenos; el programa comercial SURFER era ejecutado totalmente por SINIVET por lo que el usuario no se requería conocer su manejo.

Sin embargo, con la aparición del manejo de la información a 16 y 32-bits y la tendencia gráfica de los nuevos sistemas operativos como Windows, generalizó el uso de lenguajes de programación netamente gráficos denominados Visuales y de la misma forma se mejoraron enormemente las plataformas gráficas para el dibujo y diseño asistido por computados (los CAD, de los cuales el más popular es AutoCAD). A finales de los años 90's y a inicios del año 2000 se desarrolló por Sánchez, Hernández, García y Barreto SINIVET 3.0 y SINIVET 3.1 en dos modalidades:

La primera (SINIVET 3.0) desarrollada en un lenguaje Visual como Delphi, usando todas las ventajas del Sistema Gráfico con el cual la captura de información era de forma simple y amena para el usuario; se generaban planos topográficos y de cortes y rellenos utilizando el ambiente SURFER.

La segunda (SINIVET 3.1) se desarrolló usando los lenguajes de programación: AutoLISP, DIESEL, DCL y un módulo de programación de Objetos, era una versión que corría bajo la plataforma gráfica de AutoCAD, aprovechando todas sus bondades gráficas de los CAD, lo cual permitió crear planos topográficos de muy alta calidad, utilizando rutinas propias de SINIVET para el cálculo de las isolíneas y comandos de dibujo de AutoCAD para el dibujo de las mismas, así como planos de cortes y rellenos y vistas tridimensionales del terreno natural. Para esta versión se implementaron rutinas que permitieron el cálculo del

centroide del terreno mediante triangulación automática, característica que había que introducir manualmente en versiones anteriores. Las isolíneas se generaron mediante el mismo proceso de triangulación, lo que produjo un buen resultado en su cálculo y forma, además, se desarrollaron rutinas en AutoLISP para su modificación rápida en el ambiente gráfico de AutoCAD, como es: las etiquetas de las isolíneas, el cambiar el grosor a los componentes del plano en forma rápida, las escalas, capas, etc. Este sistema resultó ser un gran programa desde el punto de vista de la informática, pero debido a la necesidad de que el usuario debía saber AutoCAD para su uso, no fue muy popular (Figura c.10).

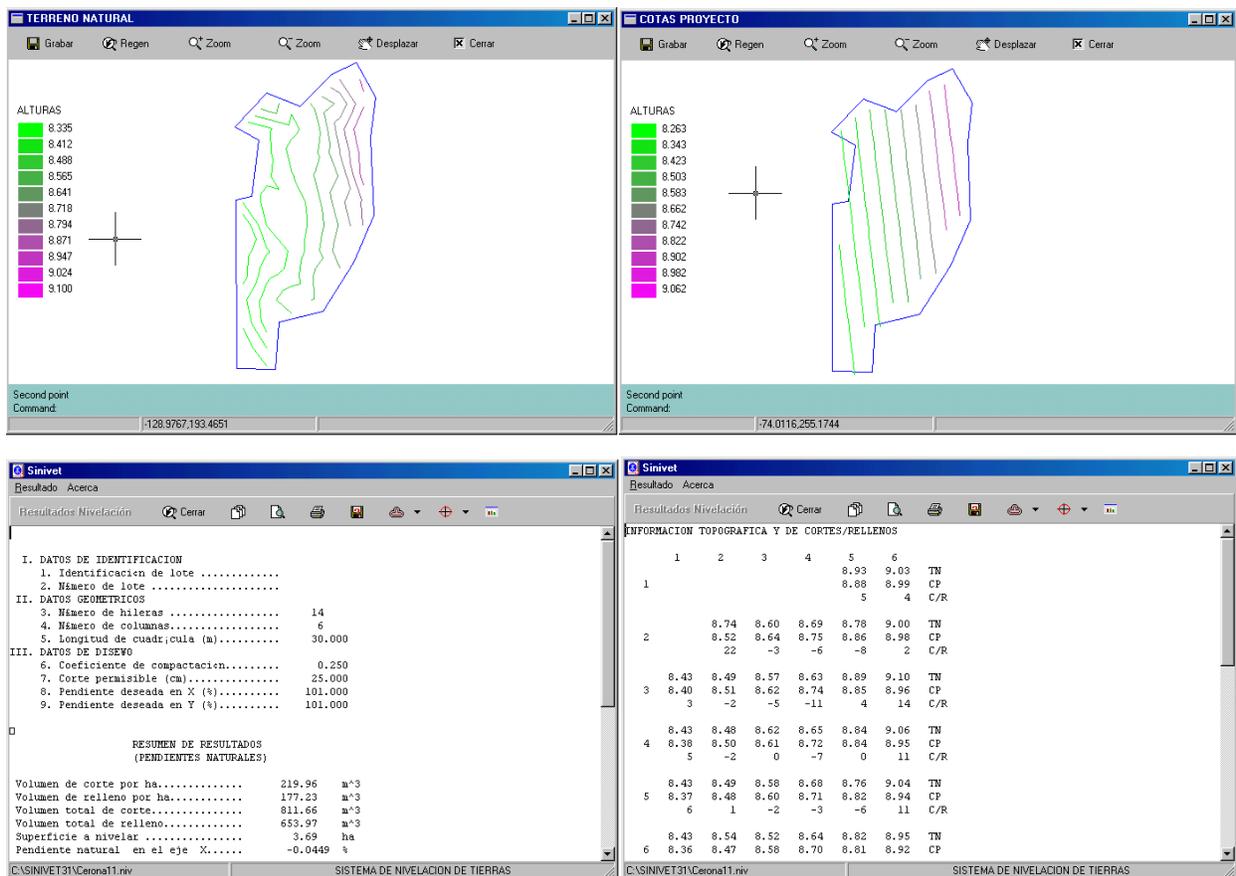


Figura c.11. SINIVET 3.2. García H.F, Barrero M.A., Sánchez B.J.R. y Hernández S.F.R, 2008 (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula)

En 2001 los mismos autores presentan SINIVET 3.2, en esta versión se realizaron algunas modificaciones de fondo, mientras que en las versiones anteriores el sistema dependía de programas comerciales como SURFER y AutoCAD según la versión utilizada, en este

última, el sistema era completamente independiente, se perfeccionaron las rutinas para la configuración del terreno, es decir, SINIVET contaba con rutinas propias para el cálculo de isolíneas y proporcionaba al usuario un plano alimétrico del proyecto antes y después de la nivelación. Lo anterior hizo posible que el usuario no dependiera para los proyectos de nivelación nada más que del sistema SINIVET 3.2 y de un equipo de cómputo capaz de soportar el sistema operativo Windows 95 o una versión mayor. Las curvas de nivel se creaban por el método de Triangulación de Delaunay, sin embargo, debido a la cantidad de puntos tomados en el levantamiento topográfico por cuadrícula, los planos topográficos no tenían la calidad de los antiguos planos creados con SURFER (Figura c.11).

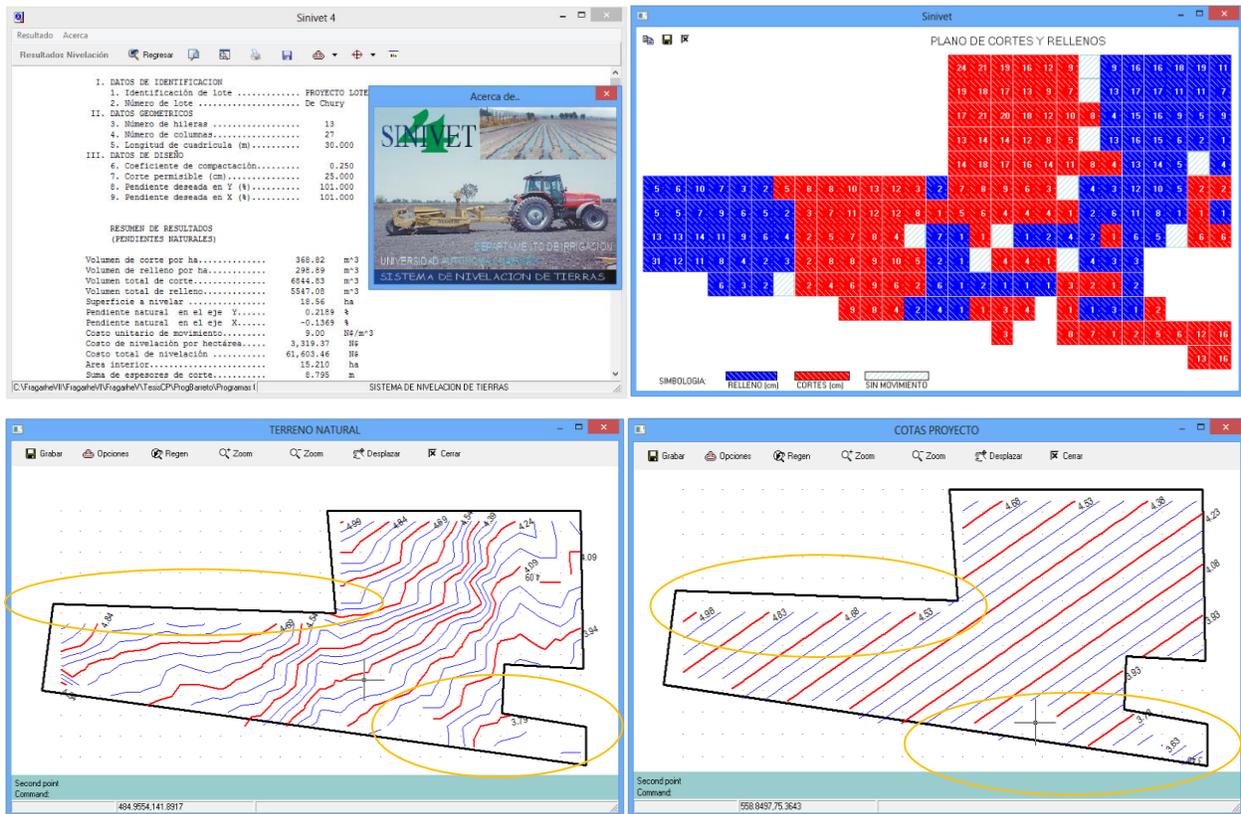


Figura c.12. SINIVET 4. García H.F, Barrero M.A., Sánchez B.J.R. y Hernández S.F.R, 2010 (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula).

En 2004 aparece SINIVET 4.0, esta versión del sistema se consideró una de las mejores versiones, se afinaron las rutinas básicas de cálculo y de la generación de planos topográficos, de terreno natural, terreno nivelado y cortes y rellenos. Se invirtieron los ejes del sistema de coordenadas para la entrada de datos, para que el usuario tuviera mayor

facilidad en la captura de la información. Una de las características más importantes de esta versión es que la realización de los cálculos se realiza en un corto tiempo de proceso (Figura c.12).

Después de casi 10 años (en 2013), se afinaron los algoritmos de SINIVET y se obtuvo la versión SINIVET plus 5.0/5.2 tomando como base el presente proyecto **TERRA 1.0** que dio inicio en el año 2011. El proyecto TERRA 1.0, nace con el objetivo de reemplazar y mejorar el funcionamiento de SINIVET, dado que, con el uso de los aparatos topográficos modernos, los levantamientos para la nivelación de tierra son cada día son más fáciles de hacer y el levantamiento en campo mediante una cuadrícula puede ser tedioso y tal vez en desuso. De esta manera cuando se hace un levantamiento en campo para la nivelación resulta mucho más práctico realizar radiaciones aleatorias y en su caso simular una cuadrícula para tranquilidad del proyectista, pero el número de puntos que se pueden tomar en campo superan por mucho los antiguos levantamientos con tránsito o nivel.

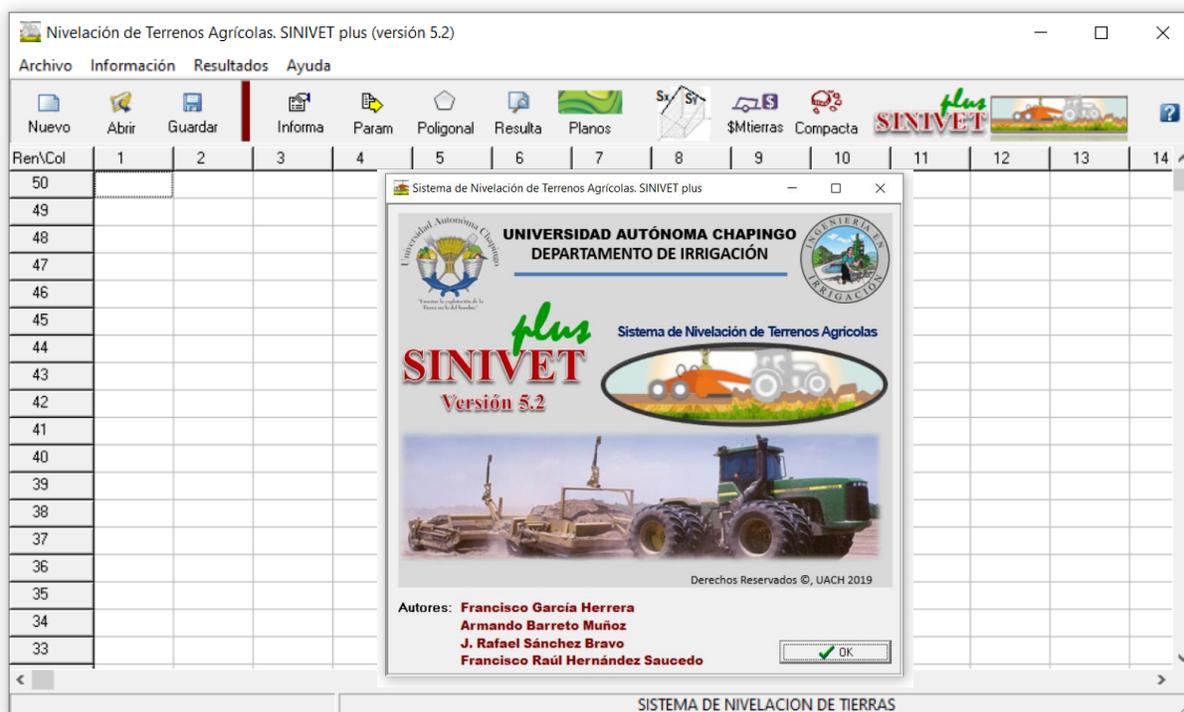


Figura c.13. SINIVET plus 5.0/5.2, 2013/2019. García H.F., Barreto M.A., Hernández S.F.R., Sánchez B.J.R. (Funcionamiento con datos topográficos levantados en cuadrícula y radiaciones, sin división en cuadros).

De esta manera TERRA ha ocupado a SINIVET plus 5.0/5.1 para probar y validar algunos de sus algoritmos, los cuales se han probado con éxito en el proyecto RIGRAT iniciado en el año 2013 en algunos de los distritos de riego del país con el fin de mejorar la eficiencia de riego de algunas zonas de gravedad (Figura c.13). A pesar de la gran trayectoria de SINIVET; TERRA 1.0 ha superado a las aplicaciones anteriores; es un programa con una gran solidez en sus algoritmos, y se ha buscado subsanar los problemas detectados en el software de aplicación relacionado con la nivelación de tierras en México.

C.2.6. TRIMBLE WM

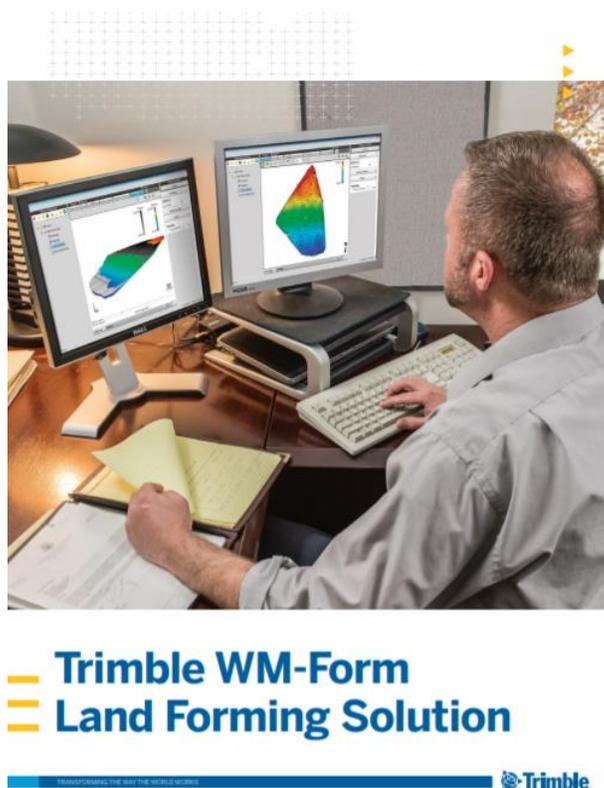


Figura c.14. Trimble WM-Form. Programa integrado a las niveladoras laser. Determinación de cortes y rellenos en tiempo real.

La empresa Trimble ha desarrollado un programa para realizar proyectos de nivelación en tiempo real, en combinación de los equipos de GPS diferencial que produce, de tal manera que con el programa Trimble MW, es posible ir elaborando el plano del terreno a medida que se avanza con el proceso de nivelación en tiempo real y al finalizar la nivelación se tiene los planos necesarios. Al iniciar la nivelación del predio el tractorista hace un recorrido

por la periferia del terreno para determinar las pendientes naturales del terreno y nivelar. Una vez definidas las pendientes se inicia con el proceso de nivelación y el sensor de la niveladora laser captará para cada cierto desplazamiento horizontal o vertical, si se ha rellenado o realizado un corte para plasmarlo en el plano (Figura c.14).

C.2.7. Comparación entres programas de nivelación de tierras

Para comparar a TERRA con otros programas se debería contar con parámetros similares. Los programas que existen en el mercado calculan las pendientes del terreno basados en el levantamiento en una cuadrícula. Esta opción la tiene también integrada el programa TERRA, pero no es el objeto a mostrar en este trabajo. Los programas actuales no permiten la captura de información que se obtiene en campo de un GPS o una estación total, que capturan coordenadas (Xr,Yr,Zr) de cada punto tomado (por ser puntos de radiaciones). Para que pueda hacer la corrida de estos datos en otro software tendría primero que generar la cuadrícula con TERRA y después esa información introducirla a los otros programas, pero como serían los mismos datos, se obtendrían resultados similares. Puede ser interesante correr el programa propuesto por Cano y Vázquez (1997) y compararlo con TERRA puesto que ocupan métodos de cuantificación de Volúmenes distintos, desafortunadamente el programa de Cano y Vázquez (1997) solo permite introducir información en cuadrícula no de una masa de puntos como lo hace TERRA 1.0. A pesar de que existen en la actualidad varios programas sobre el tema de nivelación de tierras; lo anterior permite concluir que no es procedente realizar la comparación cuantitativa de los diversos programas con TERRA. En el cuadro c.1 se realizó una comparación cualitativa de los aspectos generales que cubren los programas, pudiendo observar las similitudes y diferencias entre ellos. En la comparación cualitativa entre los programas existentes en el ámbito de la nivelación se checaron sus características generales, la forma en que se debe realizar el levantamiento topográfico para introducir la información al programa, los planos e informes que generan; si crean o no un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) para apoyarse en los cálculos de la nivelación, si realizan la división del terreno y si son independientes o dependen de alguna plataforma externa al programa.

Cuadro c.1. Comparación cualitativa de programas existentes en el área de nivelación de tierras.

Programa	Entrada Datos	Planos Generados	Informes	División (cuadros)	Independencia	Método MDE
NIVTERRA 1.0,2.0	Cuadrícula	Ninguno	+Resumen del Cálculo. +Tabla de CyR.	NO	SI	No Usa
GeoSection	----	Trazado Iterativo	+Información básica de Cortes, Rellenos y volúmenes totales	NO	NO, necesita AutoCAD	Triangulación
N4	Cuadrícula	TN, 3D, DB	+Información básica de Cortes, Rellenos y Volúmenes totales	SI	SI	No Usa
SISTEMAT	Cuadrícula	TN, Divisiones	+Información básica de Cortes, Rellenos y Volúmenes totales	SI	SI	No Usa
SINIVET 3.0	Cuadrícula	TN, TNIV, CyR	+Resumen de Calculo. +Tabla de CyR.	NO	SI (Win) NO (CAD)	Triangulación
SINIVET 3.2	Cuadrícula	TN, TNIV, DB	+Resumen de Calculo. +Tabla de CyR.	NO	SI	Triangulación
SINIVET 4.0	Cuadrícula	TN, TNIV, DB	+Resumen de Calculo. +Tabla de CyR.	NO	SI	Triangulación
SINIVET plus 5.0/5.1	Cuadrícula y Radiaciones	TN, TNIV, CyR, DB	+ Resumen de Calculo. + Memoria desglosada de cálculo para el expediente. + Tabla de CyR.	NO	SI	Kriging/ Ajuste a Variograma Lineal
TRIMBLE WM	Pixel del terreno	TN, 3D	+Información básica de Cortes, Rellenos y Volúmenes totales	SI	SI	----
Cano y Vázquez 1997	Cuadrícula	Ninguno	+Resumen de Calculo. +Tabla de CyR.	NO	SI	No Usa
TERRA 1.0	Cuadrícula y Radiaciones	TN, TNIV, CyR, DB	+ Resumen de Calculo. + Memoria desglosada de cálculo para el expediente. + Tabla de CyR. + Resumen por cuadro en caso de división. + Estimación de costos.	SI	SI	Kriging/ Varias opciones ajuste Variograma

TN = Plano del Terreno Natural;

TNIV = Plano del terreno nivelado

CyR = Plano de Cortes y Rellenos

DB = Diagrama de Bloques para cortes y rellenos

Tabla CyR = Tabla de cortes y Rellenos

MDE = Modelo Digital de Elevaciones del terreno

D. CÓDIGO EN DELPHI DE PROCEDIMIENTOS DE CALCULO DE TERRA

D.1. Definición de variables.	198
D.2. Cálculo del área y centroide.	199
D.3. Organización de los datos para el cálculo del plano proyecto.	200
D.4. Solución de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO) en forma matricial.	201
D.5. Ajuste a la ecuación del plano y generación de resultados.	206
D.6. Cálculo del centroide.	209
D.7. Cálculo de cortes y rellenos.	209
D.8. Determinación de si un punto está dentro o fuera de un polígono	213
D.9. Separación de las coordenadas de campo en cuadros para su análisis independiente.	214

D.1. Definición de variables.

A continuación se muestra la definición de algunos tipos de datos y variables usadas en los procedimientos y funciones para el cálculo de la nivelación. Se listan las definiciones y variables usadas en los módulos mostrados.

```

Const
  CoorMax   = 1000;      (* Pares maximos en las Coordenadas *)
  Nptos     = 2000;

Type
  // Tipos de datos para el manejo de la poligonal:
  TCoorXYZ = Record
    x,y,z   : Real;
  End;
  CoorXY   = Record
    x,y     : Real;
  End;
  Coor     = Record
    LetraVertice : String[2];
    Punto       : CoorXY;
  End;
  Polygon  = Record
    NoVertices   : Byte;
    Max,Min      : CoorXY;
    Vertice      : Array[0..50] of Coor;
  End;
  TCuadros = Record
    NoPolygon    : Byte;
    Cuadro       : Array[1..10] of Polygon;
    NoDatosCua   : Array[1..10] of SmallInt;
  End;

  NodArre = Array[1..125,1..125] of Real;
  Cuadri  = Record
    NoColumnas, NoReglones : Integer;
    Nodo              : NodArre;
  End;

  // Tipos de datos para la ecuacion general del plano:
  Matriz3x3 = Array[1..3,1..3] of Extended;
  Mat_A     = Record
    Nren      : SmallInt;
    Elemento  : Array[1..Nptos,1..3] of Real;
  End;
  Mat_At    = Record
    Mcol      : SmallInt;
    Elemento  : Array[1..3,1..Nptos] of Real;
  End;
  Vector_b  = Array[1..Nptos] of Real;
  Vector3x1 = Array[1..3] of Real;
  Coef_Plano = Record

```

```

    A,B,C    : Real;
End;

Var
  Poligono           : Polygon;
  A                  : Mat_A;
  At                 : Mat_At;
  b                  : Vector_b;
  Coeficiente,CAjustado,Original: Coef_Plano;
  Zproyecto,Zcoryrel : Array[1..100,1..100] of Real;
  MinCAM,MaxCAM,MinPRO,MaxPRO   : TCoorXYZ;
  Coordenada         : Array[1..CoorMax] of ^TCoorXYZ;
  Cuadrícula         : Cuadri;

```

D.2. Cálculo del área y centroide.

```

Function AreaCentroide(PolyUsado:Polygon; Var Area:Real) : CoorXY;
Var
  i,j           : Integer;
  Pol           : Polygon;
  Centroid     : CoorXY;
  SumaXY_x,SumaXY_y : Real;

Begin
  Pol:=PolyUsado;
  Inc(Pol.NoVertices);
  Pol.Vertice[Pol.NoVertices].Punto.x:=Pol.Vertice[1].Punto.x;
  Pol.Vertice[Pol.NoVertices].Punto.y:=Pol.Vertice[1].Punto.y;

  (* Se Calcula el Area *)
  SumaXY_x:=0;
  For i:=1 to Pol.NoVertices-1 do
    SumaXY_x:=SumaXY_x+
      ((Pol.Vertice[i].Punto.x*Pol.Vertice[i+1].Punto.y)-
      (Pol.Vertice[i+1].Punto.x*Pol.Vertice[i].Punto.y));

  Area:=Abs((1/2)*SumaXY_x);

  (* Se Calcula el Centroid *)
  SumaXY_x:=0;
  SumaXY_y:=0;
  For i:=1 to Pol.NoVertices-1 do
    Begin
      SumaXY_x:=SumaXY_x+
        ((Pol.Vertice[i].Punto.x+Pol.Vertice[i+1].Punto.x)*
        ((Pol.Vertice[i].Punto.x*Pol.Vertice[i+1].Punto.y)-
        (Pol.Vertice[i+1].Punto.x*Pol.Vertice[i].Punto.y)));

      SumaXY_y:=SumaXY_y+
        ((Pol.Vertice[i].Punto.y+Pol.Vertice[i+1].Punto.y)*
        ((Pol.Vertice[i].Punto.x*Pol.Vertice[i+1].Punto.y)-
        (Pol.Vertice[i+1].Punto.x*Pol.Vertice[i].Punto.y)));
    End;
  Centroid.x:=(1/(6*Area))*SumaXY_x;
  Centroid.y:=(1/(6*Area))*SumaXY_y;

```

```
AreaCentroide:=Centroide;  
End;
```

D.3. Organización de los datos para el cálculo del plano proyecto.

```
Procedure TFormNivela.CreaCoordenadasTMP (Var DatosOk:Boolean) ;  
Var  
  Archivo      : TextFile;  
  NombreArchivo : String;  
  NoDatos,i,j  : SmallInt;  
  
Begin  
  Case RadioGroup1.ItemIndex of  
    0 : Begin (* Cuadrícula *)  
      NoDatos:=0;  
      For i:=1 to StringGrid1.RowCount-1 do  
        For j:=1 to StringGrid1.ColCount-1 do  
          if StringGrid1.Cells[j,i]<>' ' Then Inc (NoDatos) ;  
        End;  
      End;  
    1 : Begin (* Distribución Aleatoria*)  
      NoDatos:=0;  
      Repeat  
        Inc (NoDatos) ;  
      Until ((StringGrid1.Cells[1,NoDatos]=' ') And  
             (StringGrid1.Cells[2,NoDatos]=' ') And  
             (StringGrid1.Cells[3,NoDatos]=' ')) Or  
             (NoDatos=StringGrid1.RowCount-1) ;  
      End;  
      End;  
  
  if (NoDatos>=4) Then DatosOk:=True  
  Else DatosOk:=False;  
  NombreArchivo:=RutaTerra+'Coo.Tmp';  
  AssignFile (Archivo,NombreArchivo) ;  
  Rewrite (Archivo) ;  
  Case RadioGroup1.ItemIndex of  
    0 : Begin (* Cuadrícula *)  
      Writeln (Archivo,NoDatos) ;  
      For i:=1 to StringGrid1.RowCount-1 do  
        For j:=1 to StringGrid1.ColCount-1 do  
          Begin  
            if StringGrid1.Cells[j,i]<>' ' Then  
              Writeln (Archivo,j,' ',StringGrid1.RowCount-i,  
                      ' ',StringGrid1.Cells[j,i]) ;  
          End;  
        End;  
      End;  
    1 : Begin (* Distribucion Aleatoria *)  
      For i:=1 to NoDatos do  
        Begin  
          if (StringGrid1.Cells[1,i]<>' ') And  
             (StringGrid1.Cells[2,i]<>' ') And  
             (StringGrid1.Cells[3,i]<>' ') Then  
            Writeln (Archivo,StringGrid1.Cells[1,i],' ',
```

```

                                StringGrid1.Cells[2,i], ' ',
                                StringGrid1.Cells[3,i]);
                                End;
                                End;
                                End;
                                CloseFile(Archivo);
End;

```

D.4. Solución de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO) en forma matricial.

```
(* SOLUCION POR MINIMOS CUADRADOS (At x A) B = (At x b) *)
```

Procedure InicializaMatrices;

```

Begin
  (* Se inicializan Todas las Matrices y Vectores del Programa *)
  FillChar(A, SizeOf(A),0);
  FillChar(At, SizeOf(At),0);
  FillChar(b, SizeOf(b),0);
End;

```

Procedure TFormResultados.CalculaCoeficientes (TipoCoordenadas, Vez:Byte) ;

```

Var
  NombreArchivo : String;
  Archivo       : TextFile;
  i,j           : SmallInt;

  (* Procedimientos para el Calculo de la Inversa *)

```

Procedure MuestraMatriz (Am:Matriz3x3; Mo,No:Integer) ;

```

Var
  RenStr  : String;
  i,j     : Integer;
Begin
  Mem1.Lines.Add('');
  For i:=1 to Mo do
    Begin
      RenStr:='';
      For j:=1 to No do
        RenStr:=RenStr+RealToStr (Am[i,j],15,5);
        Mem1.Lines.Add(RenStr);
      End;
      Mem1.Lines.Add('');
    End;
End;

```

Procedure MuestraVector (Vb:Vector3x1; No:Integer) ;

```

Var
  i : Integer;
Begin
  Mem1.Lines.Add('');
  For i:=1 to No do
    Mem1.Lines.Add(RealToStr (Vb[i],15,5));
  Mem1.Lines.Add('');
End;

```

```
(* Calculo de la Matriz Inversa. Metodo de Gauss-Jordan *)

Procedure InversaGauss(A:Matriz3x3; Var A_Inver:Matriz3x3);
Const
  Epsilon = 0.0001;
Var
  ICS,I_Columna,I_Renglon   : Integer;
  E_Max,X_Real,X_Inver     : Real;
  V_Renglon,V_Columna      : Array [1..20] of Byte;
  i,j,k,N                  : SmallInt;

Begin
  N:=3;

  { Se inicializa La Inversa: }
  FillChar(A_Inver, SizeOf(A_Inver),0);
  For i:=1 to N do
    For j:=1 to N do
      Begin
        IF j=i Then A_Inver[i,j]:=1.0;
      End;

  { 1.0 Se Inicializan los vectores con informacion de los renglones
        y columnas que han sido usados como elementos pivote. }
  For i:=1 to N do
    Begin
      V_Renglon[i]:=0;
      V_Columna[i]:=0;
    End;

  { 2.0 Algoritmo de SOLUCION. }
  ICS:=0;
  For k:=1 to N do
    Begin
      { 2.1 Se selecciona el elemento pivote. }
      I_Renglon:=0;
      I_Columna:=0;
      E_Max:=0.0;
      For i:=1 to N do
        IF V_Renglon[i]=0 Then
          For j:=1 to N do
            IF V_Columna[j]=0 Then
              IF Abs(A[i,j])>Abs(E_Max) Then
                Begin
                  I_Renglon:=i;
                  I_Columna:=j;
                  E_Max:=A[i,j];
                End;

      { 2.2 Se verifica que la matriz no sea "SINGULAR". }
      IF Abs(E_Max)<=Epsilon Then
        Begin
          ICS:=0;
          ShowMessage('La Matriz es Singular'+
            'Valor de E_Max: '+RealToStr(E_Max,16,8));
          Exit;
        End;
    End;
  End;
```

```

{ 2.3 Se ordenan las ecuaciones. }
IF I_Renglon<>I_Columna Then
  Begin
    For j:=1 to N do
      Begin
        X_Real:=A[I_Renglon,j];
        A[I_Renglon,j]:=A[I_Columna,j];
        A[I_Columna,j]:=X_Real;

        X_Inver:=A_Inver[I_Renglon,j];
        A_Inver[I_Renglon,j]:=A_Inver[I_Columna,j];
        A_Inver[I_Columna,j]:=X_Inver;
      End;
    End;

{ 2.4 Se Normaliza el renglon. }
For j:=1 to N do
  Begin
    A[I_Columna,j]:=A[I_Columna,j]/E_Max;
    A_Inver[I_Columna,j]:=A_Inver[I_Columna,j]/E_Max;
  End;

{ 2.5 Se eliminan los elementos diferentes a la diagonal principal }
For i:=1 to N do
  IF i<>I_Columna Then
    Begin
      X_Real:=A[i,I_Columna];
      For j:=1 to N do
        Begin
          A[i,j]:=A[i,j]-X_Real*A[I_Columna,j];
          A_Inver[i,j]:=A_Inver[i,j]-X_Real*A_Inver[I_Columna,j];
        End;
      End;

{ 2.6 Se marcan el renglon y columna usados como pivote }
V_Renglon[I_Columna]:=I_Columna;
V_Columna[I_Columna]:=I_Columna;
End;
End;

Procedure Multiplica3x3(A,B:Matriz3x3; Var C:Matriz3x3);
Var
  i,j,k : Integer;
Begin
  (* C=AxB : El Orden de la Nueva Matriz es 3x3 *)
  FillChar(C, SizeOf(C),0);
  For i:=1 to 3 do
    For j:=1 to 3 do
      Begin
        For k:=1 to 3 do
          C[i,j]:=C[i,j]+(A[i,k]*B[k,j]);
        End;
      End;
    End;
  End;

Procedure Multiplica_AtA(At:Mat_At;A:Mat_A; Var C:Matriz3x3);
Var
  i,j,k : Integer;

```

```

Begin
  (* C=AtxA : El Orden de la Nueva Matriz es 3x3 *)
  FillChar(C, SizeOf(C),0);
  For i:=1 to 3 do
    For j:=1 to 3 do
      Begin
        For k:=1 to A.Nren do
          C[i,j]:=C[i,j]+(At.Elemento[i,k]*A.Elemento[k,j]);
        End;
      End;
    End;
  End;

Procedure Multiplica_AtB(At:Mat_At;b:Vector_b; Var C:Vector3x1);
Var
  i,k : Integer;
Begin
  (* C=Atxb : El Orden de la Nueva Matriz es 3x3 *)
  FillChar(C, SizeOf(C),0);
  For i:=1 to 3 do
    Begin
      For k:=1 to At.Mcol do
        C[i]:=C[i]+(At.Elemento[i,k]*b[k]);
      End;
    End;
  End;

Procedure CalculoFinalCoeficientes(InAtA:Matriz3x3;Atb:Vector3x1;
Var C:Vector3x1);
Var
  i,k : Integer;
Begin
  (* Coeficientes=Inv(AtxA) x (Atxb) : El Orden Nuevo es 3x1 *)
  FillChar(C, SizeOf(C),0);
  For i:=1 to 3 do
    Begin
      For k:=1 to 3 do
        C[i]:=C[i]+(InAtA[i,k]*Atb[k]);
      End;
    End;
  End;

Begin
  Memol.Clear;
  Memol.Lines.Add('');
  Memol.Lines.Add('MEMORIA DE CALCULO DEL PROYECTO DE NIVELACIÓN DE TIERRAS
    (TERRA 1.0)');
  Case TipoCoordenadas of
    0: Memol.Lines.Add('L E V A N T A M I E N T O   P O R   C U A D R I C U L A');
    1: Memol.Lines.Add('L E V A N T A M I E N T O   P O R   R A D I A C I O N E S');
  End;
  Memol.Lines.Add('');
  Memol.Lines.Add('1. MÉTODO GENERAL DE MÍNIMOS CUADRADOS (CALCULO DE PENDIENTES
    NATURALES)');
  Memol.Lines.Add('');

  (* Recuerde la forma de almacenar del StringGrid.Cells[Columna,Renglon].
  Para nuestras definiciones Almacenamos en la Matriz A[Renglon,Columna]
  o B[Renglon,Columna]. i=1..N para renglones. j=1..M para Columnas.
  Asi que hay que intercambiarlos.  *)

```

```

(* 1. Definir Matriz A *)

Case Vez of
  1 : NombreArchivo:=RutaTerra+'Coo.Tmp';
  2 : NombreArchivo:=RutaTerra+'CooKriging.Tmp';
End;
AssignFile(Archivo,NombreArchivo);
Reset(Archivo);
if TipoCoordenadas=0 Then Readln(Archivo,A.Nren)
Else A.NRen:=FormNivela.StringGrid1.RowCount-1;
For i:=1 to A.Nren do
  Begin
    A.Elemento[i,1]:=1.0;
    Readln(Archivo,A.Elemento[i,2],A.Elemento[i,3],b[i]);
  End;
CloseFile(Archivo);

(* 2. Definir la Transpuesta de A: At*)
At.Mcol:=A.Nren;
For i:=1 to A.Nren do
  For j:=1 to 3 do
    At.Elemento[j,i]:=A.Elemento[i,j];

(* 3. Multiplicar: At x A *)
Multiplica_AtA(At,A,AtxA);
Memol.Lines.Add('Matriz (3x3) At x A:');
MuestraMatriz(AtxA,3,3);

(* 4. Multiplicar: At x b *)
Multiplica_AtB(At,b,AtxB);
Memol.Lines.Add('Vector (3x1) At x b:');
MuestraVector(AtxB,3);

(* 5. Calcular Inversa: (AtxA)^-1 *)
InversaGauss(AtxA,Inv_AtxA);
Memol.Lines.Add('Inversa (At x A)^-1:');
MuestraMatriz(Inv_AtxA,3,3);

(* 6. Calcular Vector de Coeficientes(A,B,C) multiplicando:
   (At x A)^-1 x (At x b) *)
CalculoFinalCoeficientes(Inv_AtxA,AtxB,InAtAxAtb);
Memol.Lines.Add('Vector Solucion (At x A)^-1 x (At x b):');
MuestraVector(InAtAxAtb,3);

Case TipoCoordenadas of
  0 : Begin (* Cuadrícula *)
      (* 7. Dividir Coeficientes entre Longitud de Cuadrícula : *)
      Coeficiente.A:=InAtAxAtb[1];
      Coeficiente.B:=InAtAxAtb[2]/LonCuadrícula;
      Coeficiente.C:=InAtAxAtb[3]/LonCuadrícula;
    End;
  1 : Begin (* Distribucion Aleatoria *)
      Coeficiente.A:=InAtAxAtb[1];
      Coeficiente.B:=InAtAxAtb[2];
      Coeficiente.C:=InAtAxAtb[3];
    End;
End;

```

```

if (Vez=1) Then
  Begin
    Mem01.Lines.Add('Parámetros del Plano Cálculados: ');
    Mem01.Lines.Add('');

    Original:=Coeficiente; // Se almacena el coeficiente original

    Mem01.Lines.Add('Cota al Origen: '+RealToStr(Original.A,10,8));
    Mem01.Lines.Add('Pendiente X: '+RealToStr(Original.B,10,8)+
      ' = '+RealToStr(Original.B*100,0,6)+' %');
    Mem01.Lines.Add('Pendiente Y: '+RealToStr(Original.C,10,8)+
      ' = '+RealToStr(Original.C*100,0,6)+' %');
    Mem01.Lines.Add('');
  End;
End;

```

D.5. Ajuste a la ecuación del plano y generación de resultados.

Procedure TFormResCuadros.AjusteEcPlanoyResultados;

```

Var
  k           : SmallInt;
  NoValores   : Integer;
  AreaTotal, CostoTotal,
  VcorteT, VrellenoT : Real;

// Calculo de la Zcentroidal (Dcuadrícula sintética):
Function Zc_cuadrícula : Double;
Var
  i, j, NoD   : SmallInt;
  SumaZ, Zcentro : Double;
Begin
  NoD:=0;
  SumaZ:=0;
  For i:=1 to Cuadrícula.NoRenglones do
    For j:=1 to Cuadrícula.NoColumnas do
      Begin
        if Cuadrícula.Nodo[j,i]<>SinDato Then
          Begin
            Inc(NoD);
            SumaZ:=SumaZ+Cuadrícula.Nodo[j,i];
          End;
        End;
      Zcentro:=SumaZ/NoD;
      Zc_cuadrícula:=Zcentro;
    End;

```

Function Zc_Dcampo(NoA:SmallInt) : Double;

```

Var
  j           : SmallInt;
  Zc, SumaZc : Real;
Begin
  SumaZc:=0;

```

```

For j:=1 to PolyTerra.NoDatosCua[NoA] do
  Begin
    SumaZc:=SumaZc+Coordenada[j]^z;
  End;
Zc:=SumaZc/PolyTerra.NoDatosCua[NoA];
End;

Begin
  NoMallaX:=25;
  NoMallaY:=25;
  Mem1.Lines.Add('');
  Mem1.Lines.Add(MargenStr+'B. MÉTODO GENERAL DE MÍNIMOS CUADRADOS
                  (CALCULO DE PENDIENTES NATURALES):');
  For k:=1 to PolyTerra.NoPolygon do
  Begin
    // 1.- Definicion de la Cuadrícula para el Calculo
    LeeArchivo_DAT(RutaTerra+'Coo'+IntToStr(k)+'.Tmp');

    // 2.- Calculo de la Zcentroidal (Dcuadrícula sintética):
    CZcen[k]:=Zc_cuadrícula;

    // 3.- Interpolación
    FormInterpol.Semivariograma(NoCoor,'SemiC'+IntToStr(k)+'.var');
    AjusteSemivariograma(NoModelo,Origen,RutaTerra+'SemiC'+
                        IntToStr(k)+'.Var');
    MaxMinPoly(PolyTerra.Cuadro[k],PolyTerra.Cuadro[k].Max,
              PolyTerra.Cuadro[k].Min);

    NoMallaX:=Trunc((PolyTerra.Cuadro[k].Max.x-
                    PolyTerra.Cuadro[k].Min.x)/LonCuadrícula);
    Cuadrícula.NoColumnas:=NoMallaX;
    NoMallaY:=Trunc((PolyTerra.Cuadro[k].Max.y-
                    PolyTerra.Cuadro[k].Min.y)/LonCuadrícula);
    Cuadrícula.NoRenglones:=NoMallaY;

    (* Se recalculan coordenadas extremas de cuadrícula según LonCuadrícula *)
    Minimo.x:=PolyTerra.Cuadro[k].Min.x+(LonCuadrícula/2);
    Minimo.y:=PolyTerra.Cuadro[k].Min.y+(LonCuadrícula/2);
    Maximo.x:=Minimo.x+(NoMallaX-1)*LonCuadrícula;
    Maximo.y:=Minimo.y+(NoMallaY-1)*LonCuadrícula;
    FormInterpol.Kriging(NoMallaX,NoMallaY,Maximo,Minimo,RutaTerra+
                        'Tempo\CuaTerraK.MLL');
    BlanqueoALE(RutaTerra+'Tempo\CuaTerraK.MLL',RutaTerra+
                'Tempo\CuaTerraK_B.MLL',PolyTerra.Cuadro[k],
                LonCuadrícula,NoValores);
    AsignaNodos(RutaTerra+'Tempo\CuaTerraK_B.MLL',NoValores);

    CoeficientesCuadros(0,2,k);

    if (FormParam.ComboBox1.Text='Natural_X') And
        (FormParam.ComboBox2.Text='Natural_Y') Then CCuaAjus[k]:=CoefCuadro[k]
    Else
      Begin
        if (FormParam.ComboBox1.Text='Natural_X') Then
          CCuaAjus[k].B:=CoefCuadro[k].B
        Else
          CCuaAjus[k].B:=StrToReal(FormParam.ComboBox1.Text)/100;
        End;
      End;
    End;
  End;
End;

```

```

    if (FormParam.ComboBox2.Text='Natural_Y') Then
        CCuaAjus[k].C:=CoefCuadro[k].C
    Else
        CCuaAjus[k].C:=StrToReal(FormParam.ComboBox2.Text)/100;
        CCuaAjus[k].A:=CZcen[k]-((CCuaAjus[k].B*CCentroide[k].x)
            +(CCuaAjus[k].C*CCentroide[k].y));
    End;
    Ajusta_A(k);
    Memol.Lines.Add('');
    Memol.Lines.Add(MargenStr+'RESUMEN CUADRO No.'+IntToStr(k)+
        '-----');
    Memol.Lines.Add('');
    Memol.Lines.Add(MargenStr+'PLANO INICIAL:');
    Memol.Lines.Add(MargenStr+'Ec.Calculada del Plano: Z = A + Bx + Cy..... '+
        'Z = '+RealToStr(CoefCuadro[k].A,0,5)+' + '+
        RealToStr(CoefCuadro[k].B,0,8)+' x + '+
        RealToStr(CoefCuadro[k].C,0,8)+' y');
    Memol.Lines.Add('');
    Memol.Lines.Add(MargenStr+'R = Vcorte/Vrelleno = '+
        RealToStr(Vcorte,0,4)+'/'+RealToStr(Vrelleno,0,4)+
        '= '+RealToStr(R,0,4));
    Memol.Lines.Add('');
    Memol.Lines.Add(MargenStr+'PLANO AJUSTADO:');
    Memol.Lines.Add(MargenStr+'Plano Proyecto: Z = A" + Bx + Cy..... '+
        'Z = '+RealToStr(CCuaAjus[k].A,0,5)+' + '+
        RealToStr(CCuaAjus[k].B,0,8)+' x + '+
        RealToStr(CCuaAjus[k].C,0,8)+' y');
    Memol.Lines.Add('');

    CostosNivelacionCuadros(CArea[k]);
    ResultadosCuadros(k);
    FormResultados.CoryRel('P','CORTES/RELLENOS DEL PROYECTO. CUADRO No. '+
        IntToStr(k)+' ');

End;
Memol.Lines.Add('');
Memol.Lines.Add(MargenStr+'F. RESUMEN GENERAL DE LOS CUADROS: ');

Memol.Lines.Add(MargenStr+'-----');
Memol.Lines.Add(MargenStr+
'          Volumen/ha (m^3)   Volumen Total(m^3)           Costo($)');
Memol.Lines.Add(MargenStr+
' Cuadro  Area(ha)  Corte  Relleno   Corte  Relleno  Por Ha   Total ');
Memol.Lines.Add(MargenStr+'-----');
AreaTotal:=0;
CostoTotal:=0;
VcorteT:=0;
VrellenoT:=0;
For k:=1 to PolyTerra.NoPolygon do
Begin
    Memol.Lines.Add(MargenStr+RealToStr(k,5,0)+
        RealToStr(CArea[k]/10000,14,3)+RealToStr(CVcortexha[k],10,3)+
        RealToStr(CVrellenoxha[k],10,3)+RealToStr(CVCorte[k],10,3)+
        RealToStr(CVrelleno[k],10,3)+ RealToStr(CCostoxha[k],11,3)+
        RealToStr(CCostoT[k],12,3));
    AreaTotal:=AreaTotal+CArea[k];
    CostoTotal:=CostoTotal+CCostoT[k];
    VcorteT:=VcorteT+CVcorte[k];

```

```

    VrellenoT:=VrellenoT+CVrelleno[k];
End;
Mem1.Lines.Add(MargenStr+'-----');
Mem1.Lines.Add(MargenStr+' TOTAL: '+RealToStr(AreaTotal/10000,10,3)+
               RealToStr(VcorteT,30,3)+RealToStr(VrellenoT,10,3)+
               RealToStr(CostoTotal,23,3));
Mem1.Lines.Add(MargenStr+'_____');
End;

```

D.6. Cálculo del centroide.

```
// Calculo de la Zcentroidal (Datos cuadrícula):
```

```
Function Zc_cuadrícula : Double;
```

```
Var
```

```
  i,j,NoD      : SmallInt;
```

```
  SumaZ,Zcentro : Double;
```

```
Begin
```

```
  NoD:=0;
```

```
  SumaZ:=0;
```

```
  For i:=1 to Cuadrícula.NoRenglones do
```

```
    For j:=1 to Cuadrícula.NoColumnas do
```

```
      Begin
```

```
        if Cuadrícula.Nodo[j,i]<>SinDato Then
```

```
          Begin
```

```
            Inc(NoD);
```

```
            SumaZ:=SumaZ+Cuadrícula.Nodo[j,i];
```

```
          End;
```

```
      End;
```

```
  Zcentro:=SumaZ/NoD;
```

```
  Zc_cuadrícula:=Zcentro;
```

```
End;
```

```
// Calculo de la Zcentroidal (Dcampo):
```

```
Function Zc_Dcampo(NoA:SmallInt) : Double;
```

```
Var
```

```
  j      : SmallInt;
```

```
  Zc,SumaZc : Real;
```

```
Begin
```

```
  SumaZc:=0;
```

```
  For j:=1 to PolyTerra.NoDatosCua[NoA] do
```

```
    Begin
```

```
      SumaZc:=SumaZc+Coordenada[j]^z;
```

```
    End;
```

```
  Zc:=SumaZc/PolyTerra.NoDatosCua[NoA];
```

```
End;
```

D.7. Cálculo de cortes y rellenos.

```
// Calculo de Cortes y Rellenos y Ajuste Elevacion (A) de la Ec. del Plano
```

```
Procedure CortesyRellenos(NoA:SmallInt);
```

```
Var
```

```
  i,j      : SmallInt;
```

```
  Zcampo : Real;
```

```
Begin
  For i:=1 to Cuadricula.NoRenglones do
    Begin
      For j:=1 to Cuadricula.NoColumnas do
        Begin
          if Cuadricula.Nodo[j,i]<>SinDato Then
            Begin
              Zcampo:=Cuadricula.Nodo[j,i];
              Zproyecto[j,i]:=CCuaAjus[NoA].A+
                (CCuaAjus[NoA].B*(j*LonCuadricula))+
                (CCuaAjus[NoA].C*(i*LonCuadricula));
              Zcoryrel[j,i]:=Round(100*(Zcampo-Zproyecto[j,i]));
            End;
          End;
        End;
      End;
    End;
  End;
```

Procedure CostosNivelacionCuadros (Area:Real) ;

```
Begin
  CostoTotalNiv:=CMoTierras*Vtotal_Corte;
  CostoXHaNiv:=CostoTotalNiv/(Area/10000);
end;
```

Function Relacion_CortesRellenos (Area:Real) : Extended;

```
Var
  i,j,k,NoCuadritos      : SmallInt;
  Vertice                 : Array[1..4] of Real;
  Cortecito,Rellenito,
  Vcortecito,Vrellenito,
  Acuadruto               : Real;
```

Procedure NoCortesyRellenos;

```
Var
  i,j : SmallInt;
Begin
  Corte:=0.0;
  Relleno:=0.0;
  NoCortes:=0;
  NoRellenos:=0;
  NoPuntosNulos:=0;
  NoCortes5cm:=0;
  For i:=1 to Cuadricula.NoRenglones do
    For j:=1 to Cuadricula.NoColumnas do
      Begin
        if Cuadricula.Nodo[j,i]<>SinDato Then
          Begin
            if Zcoryrel[j,i]>0 Then (* Cortes *)
              Begin
                Inc(NoCortes);
                Corte:=Corte+(Zcoryrel[j,i]/100);
                if Zcoryrel[j,i]<5 Then Inc(NoCortes5cm);
              End
            Else
              if Zcoryrel[j,i]<0 Then (* Rellenos *)
                Begin
                  Inc(NoRellenos);
                  Relleno:=Relleno+(Zcoryrel[j,i]/100);
                End
            End
          End
        End
      End
    End
  End;
```

```

        End
      Else
        Begin
          Inc(NoPuntosNulos);
        End;
      End;
    End;
  End;
End;

Begin
  NoCortesyRellenos;
  Vcorte:=0.0;
  Vrelleno:=0.0;
  NoCuadritos:=0;
  Acuadruto:=sqr(LonCuadricula);
  For i:=1 to Cuadricula.NoReglones-1 do
    For j:=1 to Cuadricula.NoColumnas-1 do
      Begin
        if (Cuadricula.Nodo[j,i]<>SinDato) And
          (Cuadricula.Nodo[j+1,i]<>SinDato) And
          (Cuadricula.Nodo[j,i+1]<>SinDato) And
          (Cuadricula.Nodo[j+1,i+1]<>SinDato) Then
          Begin
            Vertice[1]:=Zcoryrel[j,i]/100;
            Vertice[2]:=Zcoryrel[j+1,i]/100;
            Vertice[3]:=Zcoryrel[j,i+1]/100;
            Vertice[4]:=Zcoryrel[j+1,i+1]/100;
            Cortecito:= 0.0;
            Rellenito:= 0.0;
            NoCuadritos:=NoCuadritos+1;
            For k:=1 to 4 do
              Begin
                if Vertice[k]>=0 Then Cortecito:=Cortecito+Vertice[k]
                else Rellenito:=Rellenito+Vertice[k];
              End;
            if (Abs(Rellenito)+Abs(Cortecito))=0 Then Vcortecito:=0
            else
              Vcortecito:=(sqr(Cortecito)/(Abs(Rellenito)+Abs(Cortecito)))*
                (Acuadruto/4);
            VCorte:=VCorte+Vcortecito;

            if (Abs(Rellenito)+Abs(Cortecito))=0 Then Vrellenito:=0
            else
              Vrellenito:=(sqr(Rellenito)/(Abs(Rellenito)+Abs(Cortecito)))*
                (Acuadruto/4);
            Vrelleno:=Vrelleno+Vrellenito;
          End;
        End;
      End;
    Ainterior:=(NoCuadritos*Acuadruto)/10000;
    if Ainterior<>0 Then
      Begin
        Vcortexha:=Vcorte/Ainterior;
        Vrellenoxha:=Vrelleno/Ainterior;
        Vtotal_corte:=Vcortexha*(Area/10000);
        Vtotal_relleno:=Vrellenoxha*(Area/10000);
      End;
    End;
  End;
End;

```

```
if Vrelleno=0 Then Relacion_CortesRellenos:=1000
Else
  Relacion_CortesRellenos:=Vcorte/Abs(Vrelleno);
End;

Procedure Ajusta_A(NoA:SmallInt);
Const
  NoIterMax = 250;
Var
  Delta,CAbundamiento      : Extended;
  NoIter,i                 : SmallInt;
  Rante,Rmasante          : Extended;
  Movimiento               : String;

Begin
  CortesyRellenos(NoA);
  Rinicial:=Relacion_CortesRellenos(CArea[NoA]);
  CAbundamiento:=1+CoeCompacta;
  NoIter:=0;
  R:=Rinicial;
  Rante:=1;
  Rmasante:=0;
  Delta:=0.01;
  NoIter:=0;
  Repeat
    Inc(NoIter);
    if (R=Rante) Or (R=Rmasante) Then Delta:=Delta/2;
    if (R-CAbundamiento)<0 then
      Begin (* Baja *)
        CCuaAjus[NoA].A:=CCuaAjus[NoA].A-Delta;
        Movimiento:='  Baja (-)';
      End
    else
      Begin (* Sube *)
        CCuaAjus[NoA].A:=CCuaAjus[NoA].A+Delta;
        Movimiento:='  Sube (+)';
      End;
    Rmasante:=Rante;
    Rante:=R;
    CortesyRellenos(NoA);
    R:=Relacion_CortesRellenos(CArea[NoA]);
  Until ((R>=(0.99*CAbundamiento)) and (R<=(1.01*CAbundamiento))) Or
    (Delta<0.001) Or (NoIter>=NoIterMax);
  if NoIter=NoIterMax Then
    Begin
      ShowMessage('Error en Coef. Compactación o en Pendientes Obligadas');
      Exit;
    End
  else
    Begin
      CortesyRellenos_Finales(NoA);
      AlCorteProm:=Corte/NoCortes;
    End;
  End;
End;
```

D.8. Determinación de si un punto está dentro o fuera de un polígono

```

Function Min(x,y : Double) : Double;
Begin
  if x<y Then Min:=x
  else Min:=y;
End;

Function Max(x,y : Double) : Double;
Begin
  if x>y Then Max:=x
  else Max:=y;
End;

Function DentroPoligono(Poligono:Polygon; p:CoorXY) : Integer;
Var
  Intersecciones,i : Integer;
  Xinters           : Double;
  p1,p2            : CoorXY;
Begin
  Intersecciones:=0;

  // Se asigna a la posicion 0, la ULTIMA Coordenada del Poligono:
  Poligono.Vertice[0]:=Poligono.Vertice[Poligono.Novertices];
  p1:= Poligono.Vertice[0].Punto;
  For i:=1 to Poligono.NoVertices do
  Begin
    p2 := Poligono.Vertice[i mod Poligono.NoVertices].Punto;
    if (p.y > Min(p1.y,p2.y)) Then
      Begin
        if (p.y <= Max(p1.y,p2.y)) Then
          Begin
            if (p.x <= Max(p1.x,p2.x)) Then
              Begin
                if (p1.y <> p2.y) Then
                  Begin
                    Xinters := (p.y-p1.y)*(p2.x-p1.x)/(p2.y-p1.y)+p1.x;
                    if (p1.x = p2.x) or (p.x <= Xinters) Then
                      Inc(Intersecciones);
                  End;
                End;
              End;
            End;
          End;
        p1:= p2;
      End;
    End;

  if (Intersecciones Mod 2 = 0) Then
    DentroPoligono:=Fuera
  else
    DentroPoligono:=Dentro;
  End;

```

D.9. Separación de las coordenadas de campo en cuadros para su análisis independiente.

```
Procedure TFormResCuadros.SeparaDatosCuadros (Sender: TObject; NoDatosT: Integer);
```

```
var
```

```
  i,j           : Integer;
  Archivo       : TextFile;
  NombreArchivo : String;
  Pto           : CoorXY;
  z             : Real;
  CExtendido    : Array[1..2] of Polygon;
```

```
// Se determinan Cuadros Extendidos: Solo para el caso de DOS POLIGONOS:
```

```
Procedure CuadrosAmpliados;
```

```
Var
```

```
  MinExten,MaxExten : CoorXY;
```

```
Begin
```

```
  MinExten.x:=MinCAM.x-LonCuadricula;
  MinExten.y:=MinCAM.y-LonCuadricula;
  MaxExten.x:=MaxCAM.x+LonCuadricula;
  MaxExten.y:=MaxCAM.y+LonCuadricula;
  With CExtendido[1] do
  Begin
    NoVertices:=4;
    Vertice[1].Punto.x:=MinExten.x;
    Vertice[1].Punto.y:=MaxExten.y;
    Vertice[2].Punto.x:=MaxExten.x;
    Vertice[2].Punto.y:=MaxExten.y;
    Vertice[3].Punto.x:=MaxExten.x;
    Vertice[3].Punto.y:=RectaDivision.ParamRecta.m*(MaxExten.x)+
      RectaDivision.ParamRecta.b;
    Vertice[4].Punto.x:=MinExten.x;
    Vertice[4].Punto.y:=RectaDivision.ParamRecta.m*(MinExten.x)+
      RectaDivision.ParamRecta.b;
  End;
```

```
  With CExtendido[2] do
```

```
  Begin
```

```
    NoVertices:=4;
    Vertice[1].Punto.x:=MinExten.x;
    Vertice[1].Punto.y:=RectaDivision.ParamRecta.m*(MinExten.x)+
      RectaDivision.ParamRecta.b;
    Vertice[2].Punto.x:=MaxExten.x;
    Vertice[2].Punto.y:=RectaDivision.ParamRecta.m*(MaxExten.x)+
      RectaDivision.ParamRecta.b;
    Vertice[3].Punto.x:=MaxExten.x;
    Vertice[3].Punto.y:=MinExten.y;
    Vertice[4].Punto.x:=MinExten.x;
    Vertice[4].Punto.y:=MinExten.y;
```

```
  End;
```

```
End;
```

```
Procedure CreaArchivosTemporales;
```

```
Var
```

```
  k,w : Integer;
```

```
Begin
```

```

For k:=1 to PolyTerra.NoPolygon do
Begin
  NombreArchivo:=RutaTerra+'Coo'+IntToStr(k)+'.Tmp';
  AssignFile(Archivo,NombreArchivo);
  Rewrite(Archivo);
  For w:=1 to FormNivela.StringGrid1.RowCount do
  Begin
    if (FormNivela.StringGrid1.Cells[4,w]='1') And (k=1) Then
      Writeln(Archivo,FormNivela.StringGrid1.Cells[1,w], ' ',
              FormNivela.StringGrid1.Cells[2,w], ' ',
              FormNivela.StringGrid1.Cells[3,w]);
    if (FormNivela.StringGrid1.Cells[4,w]='2') And (k=2) Then
      Writeln(Archivo,FormNivela.StringGrid1.Cells[1,w], ' ',
              FormNivela.StringGrid1.Cells[2,w], ' ',
              FormNivela.StringGrid1.Cells[3,w]);
  End;
  CloseFile(Archivo);
End;
End;
End;

Begin
  Memol.Lines.Add('');
  Memol.Lines.Add('Parametros de la linea Divisoria: ');
  Memol.Lines.Add('m: '+RealToStr(RectaDivision.ParamRecta.m,0,3));
  Memol.Lines.Add('b: '+RealToStr(RectaDivision.ParamRecta.b,0,3));
  Memol.Lines.Add('Puntos de Interseccion: ');
  Memol.Lines.Add('Pinicial: '+RealToStr(RectaDivision.Pinicial.x,0,3)+' ','+
                  RealToStr(RectaDivision.Pinicial.y,0,3));
  Memol.Lines.Add('Pfinal : '+RealToStr(RectaDivision.Pfinal.x,0,3)+' ','+
                  RealToStr(RectaDivision.Pfinal.y,0,3));
  Memol.Lines.Add('');
  Memol.Lines.Add('Max/Min de los datos: ');
  Memol.Lines.Add('Max: '+RealToStr(MaxCAM.x,0,3)+' ','+RealToStr(MaxCAM.y,0,3)+
                  ','+RealToStr(MaxCAM.z,0,3));
  Memol.Lines.Add('Min: '+RealToStr(MinCAM.x,0,3)+
                  ','+ RealToStr(MinCAM.y,0,3)+' ','+RealToStr(MinCAM.z,0,3));
  Memol.Lines.Add('MaxPRO: '+RealToStr(MaxPRO.x,0,3)+
                  ','+RealToStr(MaxPRO.y,0,3)+' ','+RealToStr(MaxPRO.z,0,3));
  Memol.Lines.Add('MinPRO: '+RealToStr(MinPRO.x,0,3)+
                  ','+RealToStr(MinPRO.y,0,3)+' ','+RealToStr(MinPRO.z,0,3));

  CuadrosAmpliados;

  Memol.Lines.Add('');
  Memol.Lines.Add('Max/Min Extendidos: ');
  For j:=1 to 2 do
  Begin
    Memol.Lines.Add('Poligono No. '+IntToStr(j));
    For i:=1 to CExtendido[j].NoVertices do
    Begin
      Memol.Lines.Add(FloatToStr(CExtendido[j].Vertice[i].Punto.x)+' ','+
                      FloatToStr(CExtendido[j].Vertice[i].Punto.y));
    End;
    Memol.Lines.Add('');
  End;
End;

```

```

if PolyTerra.NoPolygon=2 Then
  Begin
    PolyTerra.NoDatosCua[1]:=0;
    PolyTerra.NoDatosCua[2]:=0;
    For j:=1 to PolyTerra.NoPolygon do
      Begin
        For i:=1 to NoDatosT do
          Begin
            Pto.x:=StrToReal(FormNivela.StringGrid1.Cells[1,i]);
            Pto.y:=StrToReal(FormNivela.StringGrid1.Cells[2,i]);
            z:=StrToReal(FormNivela.StringGrid1.Cells[3,i]);
            if DentroPoligono(CExtendido[j],Pto)=Dentro Then
              Begin
                FormNivela.StringGrid1.Cells[4,i]:=IntToStr(j);
                // Memol.Lines.Add('P'+IntToStr(i)+' Dentro');
                Inc(PolyTerra.NoDatosCua[j]);
              End
            Else
              Begin
                // FormNivela.StringGrid1.Cells[4,i]:='1000';
                // Memol.Lines.Add('P'+IntToStr(i)+' SD...');
              End;
            End;
          End;
        End;
      End
    else
      Begin // NoPolygon>2
        // Falta implementar el proceso para mas de dos poligonos
      End;

    Memol.Lines.Add('');
    Memol.Lines.Add('Cuadro No.1: '+IntToStr(PolyTerra.NoDatosCua[1]));
    Memol.Lines.Add('Cuadro No.2: '+IntToStr(PolyTerra.NoDatosCua[2]));

    // Se crea el Archivo Temporal:
    NombreArchivo:=RutaTerra+'CooCuadros.Tmp';
    AssignFile(Archivo,NombreArchivo);
    Rewrite(Archivo);
    Writeln(Archivo,NoDatosT);
    Writeln(Archivo,PolyTerra.NoPolygon);
    Writeln(Archivo,PolyTerra.NoDatosCua[1]);
    Writeln(Archivo,PolyTerra.NoDatosCua[2]);
    CloseFile(Archivo);
    CreaArchivosTemporales;
  End;

```

E. MANUAL DE USUARIO

E.1. El sistema TERRA versión 1.0	218
E.2. Instalación de TERRA versión 1.0.....	219
E.2.1. Requerimientos en su PC	219
E.2.2. Proceso de Instalación	219
E.3. Descripción del programa.....	221
E.3.1. Archivo	222
E.3.2. Nivelación	224
E.3.3. Mapas y Resultados	236
E.3.4. Topo	238
E.3.5. Ayuda	239

E.1. El sistema TERRA versión 1.0

TERRA es una herramienta informática desarrollada con el propósito de auxiliar al técnico proyectista de nivelación de tierras, de los largos y tediosos (aunque simples) cálculos manuales. Contar con una herramienta como ésta, es de primera importancia debido a que los proyectos de nivelación de terrenos agrícolas requieren de un análisis adecuado que implica calcular varias posibilidades.

“La nivelación de terrenos agrícolas es una práctica de acondicionamiento físico, que consiste en la remoción de tierras de las partes altas y su acarreo y depósito en las bajas, a fin de dejar una superficie plana que se ajuste, hasta donde sea posible, a las pendientes naturales del terreno y que facilite las labores agrícolas, especialmente la aplicación del agua de riego” (Hernández, 2013).

El proyectista debe tomar en cuenta, además del método de riego y las pendientes naturales del terreno, otros factores como el espesor de suelo disponible, las intensidades de lluvia que podrían causar erosión y la posición y elevación de canales y drenes. Todos estos factores introducen restricciones que no deben tomarse a la ligera, a riesgo de llevar al fracaso el proyecto.

El principal inconveniente de la nivelación es su alto costo, por lo que la decisión de recomendar su ejecución siempre debe ir precedida de una valoración o revaloración de la adaptabilidad del terreno y otras condiciones para el riego superficial, complementándolo con un análisis económico que justifique la rentabilidad del proyecto.

TERRA es un programa elaborado en el lenguaje de programación DELPHI (Pascal) en un ambiente visual de Desarrollo Rápido de Aplicaciones (RAD); debe su nombre al objeto principal de estudio: “La tierra”.

E.2. Instalación de TERRA versión 1.0

La instalación del sistema es un aspecto muy importante para su buen funcionamiento, a continuación se describen los pasos a seguir para su instalación.

E.2.1. Requerimientos en su PC

El sistema fue diseñado para usarse en equipos de configuración ordinaria. Para que funcione adecuadamente se requiere de una computadora con sistema operativo Windows XP/Vista/7/8/10; una memoria mínima de 1GB, un disco duro con un espacio disponible para la operación del sistema de al menos 5 GB; un procesador con una velocidad mínima de 1Ghz; y algún puerto para impresión.

El programa está diseñado para realizar la mayor parte de sus operaciones en disco, por lo que se debe contar con al menos 5 GB de espacio libre en el disco donde esté instalado el sistema.

E.2.2. Proceso de Instalación

TERRA, utiliza las rutinas de instalación de Windows, por lo que este proceso resulta familiar y fácil para aquellos usuarios que estén habituados con este sistema operativo. Para quien no haya realizado alguna vez operaciones de instalación de programas, se describen a continuación los pasos que deben realizarse.

- 1) Insertar el disco de TERRA en la unidad de CD-ROM de la computadora, memoria USB o la unidad externa correspondiente.
- 2) Seleccionar la carpeta donde se tenga almacenado el programa instalador con el explorador de Windows. Identificar el archivo InstaladorTERRA, ubicado en la carpeta y ejecutar dando doble "click" sobre el nombre; con lo cual se iniciará el proceso de instalación mediante un cuadro de diálogo.

3) Al iniciar la instalación desplegará un cuadro de diálogo del programa “InstallShield Wizard”, indicando el avance de la instalación y donde debe presionar el icono “Next” para continuar con la instalación (Figura e.1).

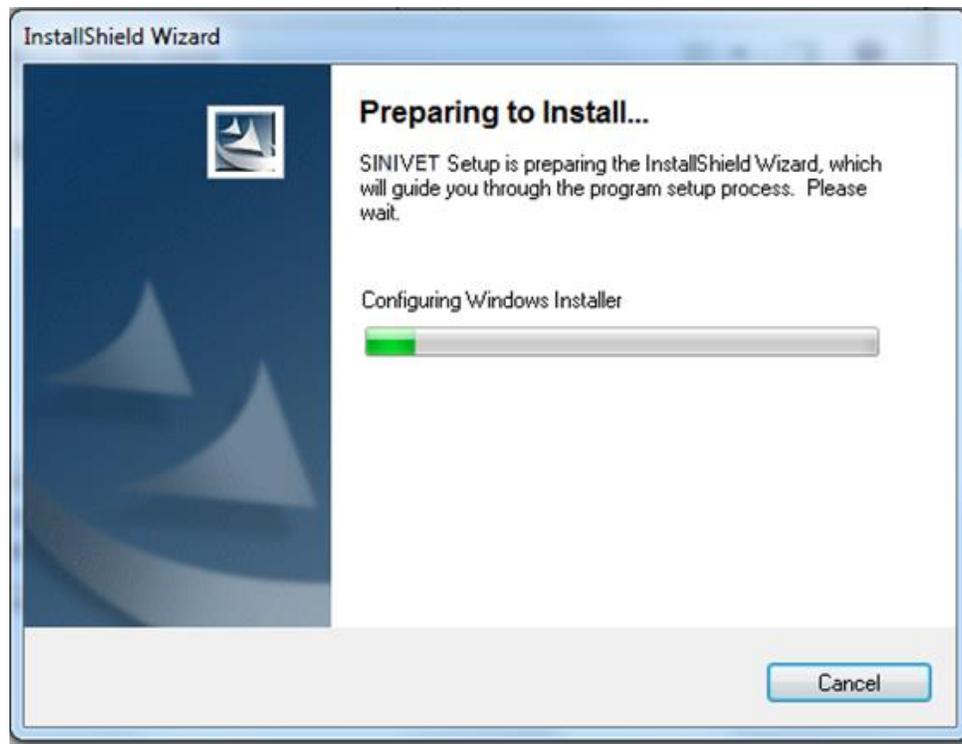


Figura e.1. Ejecución del programa Wizard para la instalación de TERRA

4) A continuación aparecerá un cuadro de diálogo en el que se solicita la ruta del directorio en el que se desea instalar el nuevo Sistema TERRA. Si presiona “Next” el Sistema se instalará automáticamente en el directorio especificado del disco duro (Por lo general el directorio por defecto se encuentra ubicado en Archivos de Programas o Program Files). Si se desea instalar en un directorio diferente, simplemente se presiona el botón “Browse” para seleccionarlo. Aparecerá la lista de directorios (Carpetas) que contiene la unidad de la PC, en donde se puede seleccionar un directorio ya creado anteriormente en esta unidad.

5) Al completarse la instalación presionar “Finish”.

6) Para ejecutar TERRA, seleccione la opción Inicio de su computadora, la que desplegará una pantalla que incluye la opción “Todos los programas”, seleccione y elija la carpeta TERRA y posteriormente el ejecutable TERRA. Si el sistema operativo es window

10, teclee la palabra TERRA en el buscador y de click al icono correspondiente cuando lo muestre.



E.3. Descripción del programa

TERRA ha sido diseñado para realizar proyectos ejecutivos de Nivelación de Tierras de una forma sencilla y práctica, para usuarios que no tengan amplios conocimientos tanto en el área de nivelación de tierras como de la informática. Es por lo tanto amigable y ayuda al usuario a minimizar los errores humanos que tienden a presentarse con mayor frecuencia.

La ventana principal de TERRA cuenta con un menú desplegable o menú principal y una sección con una barra de herramientas. En el menú principal se encuentran las opciones para el desarrollo del proyecto de nivelación; ésta primera sección está integrada por 5 menús desplegables: Archivo, Nivelación, Mapas y Resultados, Topo y Ayuda (figura e.2).

La segunda sección está compuesta por un conjunto de herramientas que simplifican el acceso a los menús más usados en la elaboración del proyecto de nivelación, dentro estas barras se han colocado los iconos para la entrada, proceso y salida de la información.



Figura e.2. Ventana principal de TERRA

E.3.1. Archivo

Las opciones que componen el menú archivo (figura e.5) permite al usuario realizar las operaciones necesarias para manipular la información y obtener un proyecto completo de nivelación de tierras. A continuación se describen cada una de ellas:

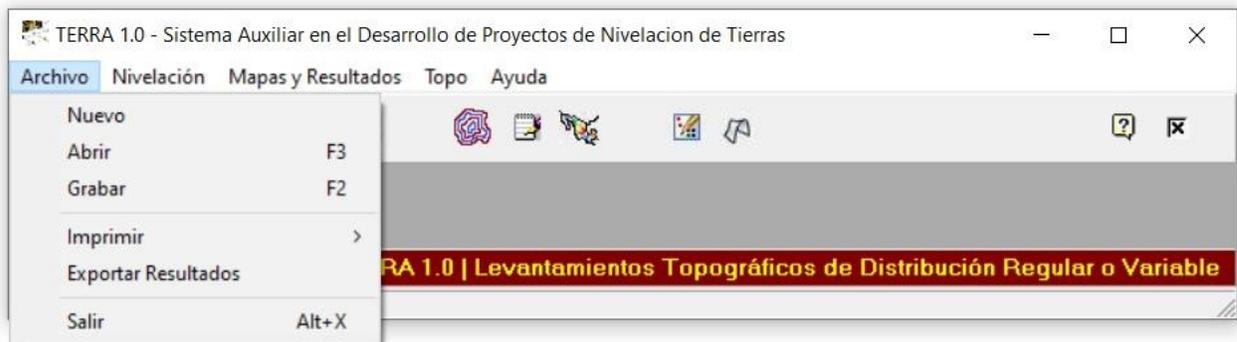


Figura e.3. Opciones del menú Archivo

a). Nuevo: Permite limpiar los cuadros de diálogo de todas las opciones del sistema, así como, el área de captura de datos de campo y con esto realizar un Nuevo Proyecto de Nivelación de Tierras. El acceso a esta opción implica que todos los datos activos en la memoria de la computadora se eliminen, el programa realiza una advertencia del proceso que se realizará. **NOTA:** Será importante para el usuario grabar antes de realizar un nuevo proyecto.

b). Abrir: Esta opción permite leer de disco un archivo creado anteriormente con el sistema TERRA 1.0. Los tipos de archivos que se pueden leer con esta opción tienen extensión [.TER] en caso de haber sido creado con esta versión o bien [.NIV] si se desea procesar un archivo realizado con versiones anteriores de NIVTERRA.

Al ejecutar esta opción el sistema muestra un cuadro de diálogo y por defecto muestra los archivos existentes, almacenados en la carpeta DATOS del directorio de instalación del sistema. Para cargar en memoria un archivo bastara seleccionar de la lista el nombre del archivo y dar clic al botón abrir. (Figura e.4).

c). Grabar Datos TERRA como ...

Esta opción almacena en el disco duro o en cualquier unidad de almacenamiento la información que se encuentre en memoria del programa. Los archivos generados por TERRA son grabados en código ASCII, por lo cual pueden ser editados en caso de ser necesario, por cualquier editor de texto. Los archivos que genera el programa tienen extensión TER, extensión que será asignada automáticamente por el sistema.

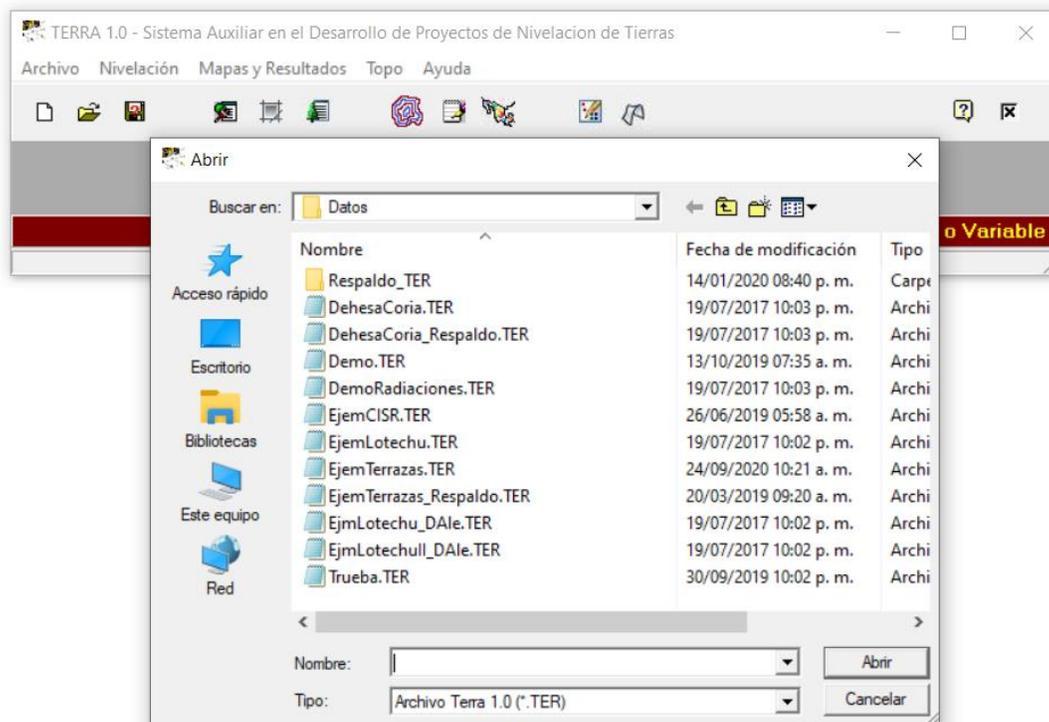


Figura e.4. Cuadro de diálogo Abrir archivo

Para guardar el archivo en uso se debe proporcionar el nombre en la línea que lo solicita o seleccionar de la lista algún nombre en caso de querer sobre escribir algún archivo existente. En caso de que se decida sobre escribir un archivo existente, el usuario deberá cerciorarse de que el archivo por reemplazar ya no es útil, pues después de hacerlo ya no será posible reconstruir al archivo anterior de ninguna forma.

El cuadro de dialogo permite navegar por los directorios del disco duro y de las unidades de memoria externa con que cuente la computadora y poder grabar la información en el lugar que el usuario decida.

d). Imprimir reporte de resultados: Esta opción permite enviar a la impresora los reportes de cálculo realizados por el sistema. Para que el procedimiento de impresión sea adecuado, corroborar que el nombre de la impresora que aparece en el cuadro de diálogo, corresponda con la impresora que se encuentre en línea. De lo contrario buscar en la lista la que corresponda o dar desde Windows o mediante el disco de instalación la impresora requerida.

Si por error se envía la información a otra impresora, ir al administrador de impresoras y eliminar de la cola de impresión el documento en uso; de lo contrario puede ocasionar problemas para las impresiones posteriores.

e). Salir de TERRA: Esta opción abandona el trabajo con TERRA, antes de cerrar la ventana principal el sistema solicita la confirmación (Figura e.5). Será importante que antes de salir del sistema que el usuario almacene la información que se encuentra en memoria, de lo contrario se perderá toda la información que tenga en este momento el programa.

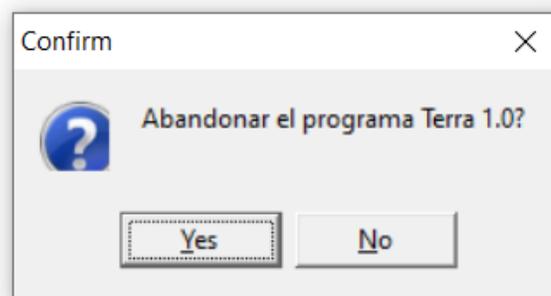


Figura e.5. Confirmación para abandonar TERRA

E.3.2. Nivelación

TERRA es un programa desarrollado bajo la filosofía clásica de programación, en la cual se definen claramente 3 procesos para un programa de cómputo: Entrada de Datos, Procesamiento de la Información y Salida de Resultados.



Figura e.6. Opciones del menú Nivelación

La entrada de información al sistema se realiza a través de los menús: Datos del Proyecto y Diseño, Datos de la Poligonal del Terreno y Cálculo del Centroide; y Definición de Terrazas o Cuadros. (Figura e.6). Los menús de procesamiento de la información corresponden a: Plano inicial del Terreno Natural y Calculo de la Nivelación.

a). Datos del proyecto y del diseño.

La información general a considerar y que caracteriza a un proyecto para TERRA son los Datos del proyecto y los parámetros del diseño. Su captura se puede ver en el cuadro de diálogo mostrado en la figura e.8.

Identificación del lote:

Se debe proporcionar un nombre que permita identificar de manera general y rápida a quién pertenece el terreno que se pretende nivelar. El programa espera leer letras y/o números.

Número de Lote:

TERRA espera leer en esta línea el número que ocupa el lote dentro del área donde se encuentra ubicado. Este dato permite al proyectista reforzar los datos de identificación de un terreno por proyectar. Este identificador acepta que se le proporcionen letras, números, símbolos o una combinación de ellos.

Observaciones:

Introduzca alguna seña que permita caracterizar el predio. Este campo es opcional.

b). Parámetros del Diseño:

Los parámetros de diseño a considerar son: Coeficiente de compactación, Corte permisible, Pendiente en X, Pendiente en Y, Costo de movimiento, su captura se realiza en el cuadro de diálogo correspondiente mostrado en la figura e.8.

Coeficiente de Compactación:

Para dejar plano un terreno basta con cortar las partes altas y depositar esta tierra en las partes bajas. Esto significa que la misma cantidad de tierra que se corta se requiere para rellenar (coeficiente de compactación = 0).

Sin embargo, un terreno que ha sido nivelado tiende a compactarse por el paso de la maquinaria. Esta compactación es mayor en las áreas de relleno debido a que las partículas de suelo son reacomodadas. La consecuencia de todo esto es que siempre faltará tierra, cuando se proyecta sobre la base de igualar los volúmenes de corte y relleno. Surge así la necesidad de incrementar los volúmenes de corte en relación con los de relleno para garantizar una buena nivelación.

El valor del coeficiente de compactación está en función de la textura del suelo, principalmente, y puede variar de 0.1 a 0.4, salvo en caso de suelos muy especiales. El coeficiente de compactación es la parte fraccionaria de la relación Volumen de Corte /Volumen de Relleno. El coeficiente de compactación es la parte decimal resultan de dicha relación. Por ejemplo, si la relación corte relleno deseada es de 1.3, significa que se tiene un coeficiente de compactación de 0.3. El valor de 0.25 es asignado por defecto por el programa TERRA.

Corte permisible:

La altura de corte permisible, se refiere a la profundidad máxima que se permite cortar al terreno, sin tener efectos negativos tanto de fertilidad de suelos como económicos.

La profundidad de corte que se permita, va a depender del espesor del estrato fértil y del costo máximo a aceptar por concepto de movimiento de tierra. El aspecto económico es determinante, pues esto podría hacer no rentable la producción de un terreno.

TERRA obtiene planos de proyecto sin importar la profundidad de corte que se haya definido; sin embargo, marca todos los puntos en los que se haya rebasado esta profundidad para que el proyectista decida si es conveniente o no proceder a realizar la nivelación del terreno.

Este parámetro se define a juicio del proyectista, sin embargo, debe considerarse que a mayor profundidad de corte es mayor el volumen de movimientos de tierras y por tanto es más caro el costo de la nivelación.

Pendiente en X:

Se refiere a la pendiente que se desea tenga el plano proyecto en dirección horizontal (en dirección de las columnas). Las pendientes deseables en un terreno de uso agrícola, en general son pequeñas, sin embargo para fines de otras aplicaciones, el programa permite obtener planos con pendientes desde -100% (-45°) a 100% (45°) de inclinación del plano. El plano que menor movimiento de tierra requiere, es aquel obtenido por mínimos cuadrados, cuyas pendientes corresponden a las pendientes naturales del terreno. El sistema tiene dos opciones para proyectar terrenos a nivelar. Estas son:

❖ Obtener un plano proyecto usando la pendiente natural del terreno.

Con esta opción el sistema obtiene el plano proyecto con menor movimiento de tierra, debido a que respeta la pendiente natural y solo calcula los cortes de las partes altas para depositarlas en las partes más bajas del terreno natural. Este cálculo se hace usando el método de mínimos cuadrados. Para que el sistema realice este tipo de cálculo, se debe elegir la opción Natural_X.

❖ Obligar el plano proyecto a una pendiente deseada.

Con esta opción el sistema calcula los movimientos de tierra que debe realizar para obligar a que el plano proyecto tenga una pendiente igual a la que el proyectista solicita. Las pendientes a las que se puede obligar un plano están dentro del rango -100% (-45°) a 100% (45°).

Si se proporciona un valor de pendiente, el programa asumirá que el usuario desea obligar la pendiente del plano proyecto, a este valor suministrado. En este caso, en la salida de resultados se indicará que el plano proyecto se ajustó a las pendientes obligadas por el usuario, y no al plano de mínimo movimiento de tierra (mínimos cuadrados).

Pendiente en Y:

Se refiere a la pendiente que se desea que tenga el plano proyecto en dirección vertical (en dirección de las filas o renglones). El valor esperado en ésta variable debe cumplir los mismos requisitos que el explicado para las pendientes del eje X.

El sistema tiene dos opciones para proyectar terrenos a nivelar. Estas son:

❖ *Obtener un plano proyecto usando la pendiente natural del terreno.*

Con esta opción el sistema obtiene el plano proyecto con menor movimiento de tierra debido a que respeta la pendiente natural y solo calcula los cortes de las partes altas para depositarlas en las partes más bajas del terreno natural.

Este caso se hace usando el método de mínimos cuadrados. Para que el sistema realice este tipo de cálculo, se debe proporcionar la opción Natural_Y.

❖ *Obligar el plano proyecto a una pendiente deseada.*

Con esta opción el sistema calcula los movimientos de tierra que debe realizar para obligar a que el plano proyecto tenga una pendiente igual a la que el proyectista solicita. Las pendientes a las que se pueden obligar un plano están dentro del rango -100% a 100%.

Nota: Las pendientes deben proporcionarse en %

En una primera corrida del programa, siempre es conveniente elegir el cálculo por mínimos cuadrados y analizar el valor de las pendientes resultantes. Si éstas son adecuadas para el método de riego que se quiere establecer, se considerará que es la mejor solución. En

caso contrario, pueden proponerse valores de pendiente obligada, tomando como referencia, las obtenidas por mínimos cuadrados.

En este momento es conveniente aclarar que el signo que se obtenga en las pendientes proyecto está relacionado con la ubicación de los ejes convenidos por el programa. Una pendiente positiva, en X o en Y, significará que el terreno sube en el mismo sentido que el eje correspondiente. Si la pendiente es negativa, significa que el terreno desciende en la dirección del eje correspondiente.

Costo de Movimiento:

Introduzca el costo por metro cúbico de corte. En caso de que no lo haya estimado se sugiere cotizar en un dólar cada metro cúbico.

b). Datos de la poligonal del terreno y cálculo del centroide.

Esta opción permite la lectura de las coordenadas de los vértices de poligonal. La definición del orden de los vértices debe regirse por lo siguiente:

- ❖ El vértice inicial puede ser cualquiera del terreno.
- ❖ Los vértices posteriores deben ser siempre en el mismo sentido y de preferencia en sentido anti-horario.

La superficie total a nivelar es calculada con estos vértices. Si se desea visualizar la forma geométrica del terreno, pulsar el botón Poligonal, el cual desplegará la figura del terreno.

La poligonal del terreno podrá ser leída desde un archivo de disco; de la misma forma la información introducida podrá ser grabada en un archivo en código ASCII mediante el menú localizado en la parte superior del cuadro de diálogo (Figura e.7).

En caso de que el terreno mostrado en la región gráfica sea el correcto elegir la opción Aceptar para continuar con el proyecto de nivelación.

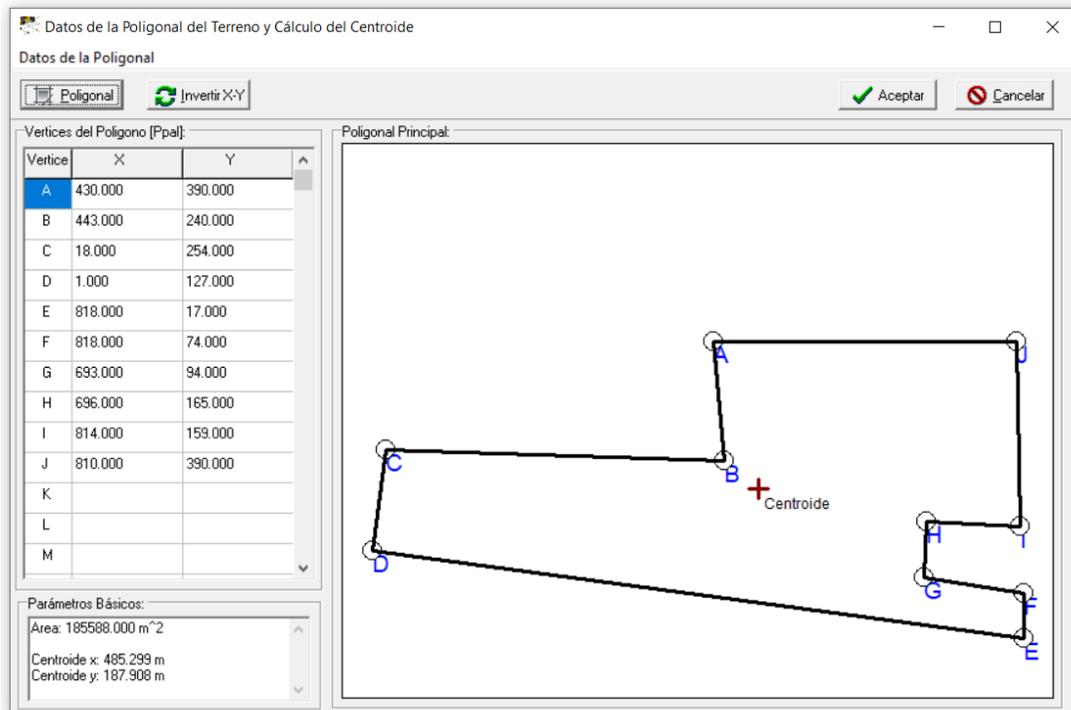


Figura e.7. Poligonal y centroide del terreno

c). Datos del Levantamiento para la Nivelación. TERRA permite realizar levantamientos topográficos de dos formas distintas: a través de una cuadrícula (método tradicional) o mediante radiaciones de distribución variable. El programa tiene por defecto activada la opción de Cuadrícula, sin embargo en caso de ocupar la opción radiaciones la hoja de captura cambiará a tres columnas (X,Y,Z).

c.1. Cuadrícula

La información topográfica levantada en campo se introduce al programa en una hoja de captura referenciada en hileras y columnas.

El número de renglones, se refiere al número de puntos que hay en el sentido vertical en el mapa del terreno por proyectar. Se considera un renglón aun cuando solo contenga algunos puntos.

El número de hileras o columnas se refiere al número de puntos que haya en el sentido horizontal en el mapa del terreno por proyectar. Se considera una columna aun cuando

solo contenga algunos puntos. El número máximo de hileras o filas y columnas que soporta el programa es de 50.

c.2. Radiaciones.

En caso de seleccionar esta opción el programa solicita para cada punto se introduzcan las coordenadas X,Y,Z (Figura e.8). Esta información podrá ser integrada al sistema directamente desde un archivo en código ASCII con la información respectiva. En este caso el valor de longitud de cuadrícula será el tamaño con el cual se estimará una la nueva cuadrícula para el cálculo de volúmenes de cortes y rellenos según lo especifica el USDA.

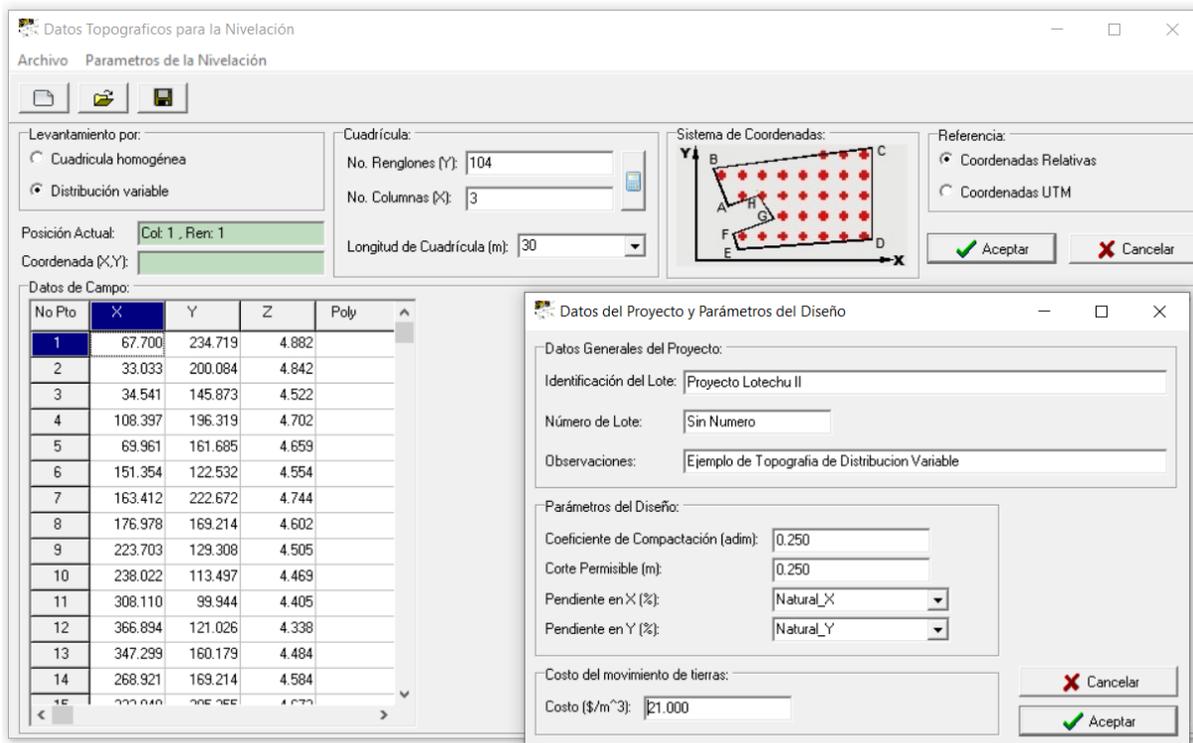


Figura e.8. Captura de la información. Levantamiento topográfico por radiaciones.

Longitud de Cuadrícula:

Se refiere a la distancia que separa a dos puntos adyacentes de la cuadrícula, ya sea en dirección horizontal o en dirección vertical en el mapa del terreno a nivelar. Las longitudes de cuadrícula más usados en nivelación de tierras son 20, 25 o 30 m.

El programa puede proyectar para cualquier longitud proporcionada por el proyectista. Por defecto el programa asigna un valor de 20m, debido a que es la longitud más usual en trabajos de nivelación.

En caso de que el valor del nodo de la cuadrícula no tenga valor o salgan del lindero del terreno, estos puntos serán considerados por TERRA como puntos falsos de cuadrícula (cotas ficticias), a las que el sistema asigna automáticamente el valor de cero. Esto no significa que esa sea la cota que le corresponda, sino que es la manera en que el programa reconoce que están fuera del límite del proyecto, para que no sean consideradas en el cálculo. Usted no tiene que preocuparse por escribir los ceros (cotas ficticias), el programa los asigna automáticamente.

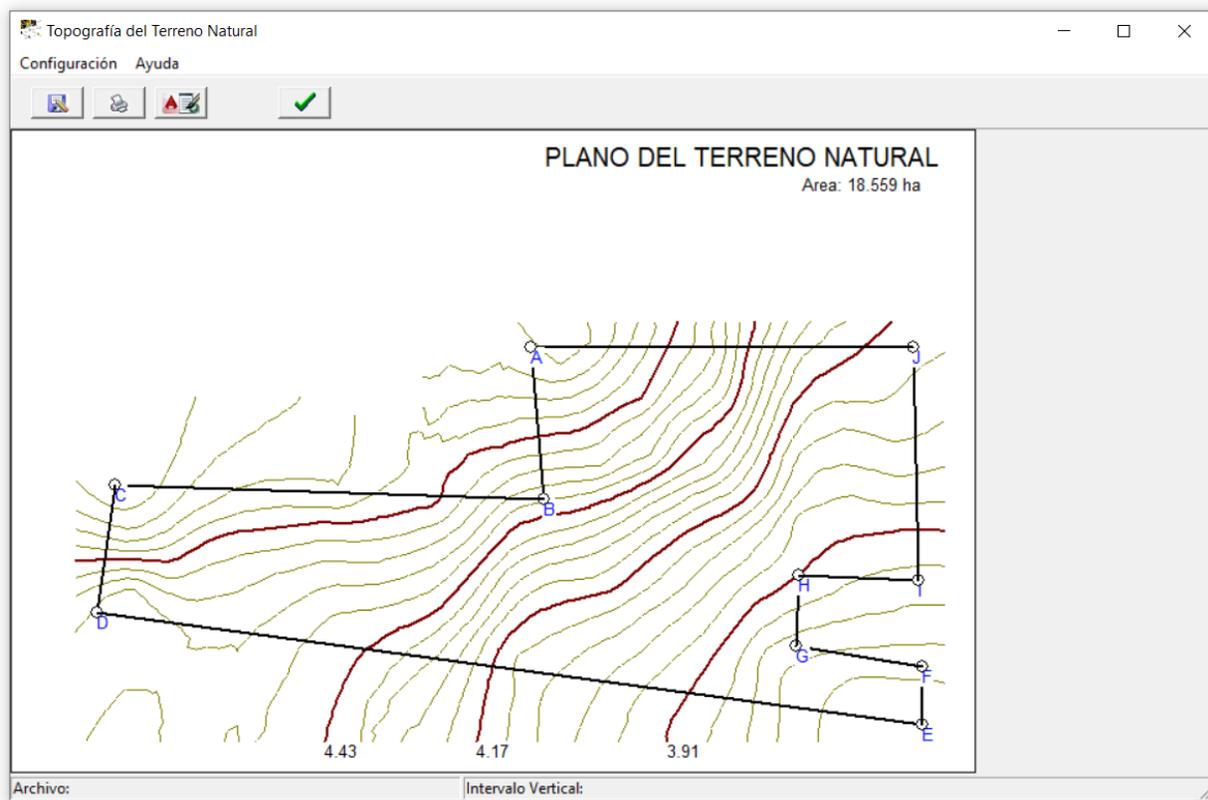


Figura e.9. Plano del terreno natural, antes de la nivelación.

La ubicación de los ejes coordenados es tal que la cota inferior izquierda (sea cota real o ficticia), tenga coordenadas $X=20$, $Y=20$. Esto es una conversión automática que realiza

el sistema. Es decir que el sistema coordinado para el cálculo interno del proyecto será el sistema cartesiano natural $X(+)$ a la derecha y $Y(+)$ hacia arriba, teniendo como origen el nodo de la cuadrícula ubicado en la esquina inferior izquierda (Figura e.8).

d). Plano Inicial del Terreno natural.

Con la información general y del levantamiento topográfico se recomienda ejecutar ésta opción que calculará y desplegará el plano topográfico de curvas de nivel del predio, utilizando un proceso geoestadístico para su determinación y el Método de Kiriging para la estimación de los pesos o factores de ponderación (Figura e.9). En el menú configuración de este cuadro de diálogo será posible configurar las características de las curvas de nivel.

e). Definición de Terrazas o Cuadros.

En caso de que la topografía lo permita, es posible dividir el predio en cuadros o terrazas para su análisis independiente. En la figura e.10 se puede ver el resultado de aplicar la herramienta de división donde manualmente el usuario puede definir una línea divisoria del predio y seccionar el terreno para un análisis independiente y por su puesto para reducir pendientes y bajar costos.

f). Cálculo de la nivelación.

Con esta opción TERRA ejecuta el módulo de procesamiento o de cálculo, propio del sistema. En este módulo se realizan los cálculos de la ecuación del plano proyecto, cotas proyecto, alturas de corte y relleno, volúmenes de corte y relleno y se realizan los planos correspondientes a cada proyecto.

Para poder realizar cálculos de nivelación de tierras es necesario contar de antemano con los datos del terreno en memoria del programa; los cuales pudieron cargarse desde disco o bien introduciendo la información manualmente. Los resultados pueden observarse en las figuras (e.11), (e.12) y (e.13).

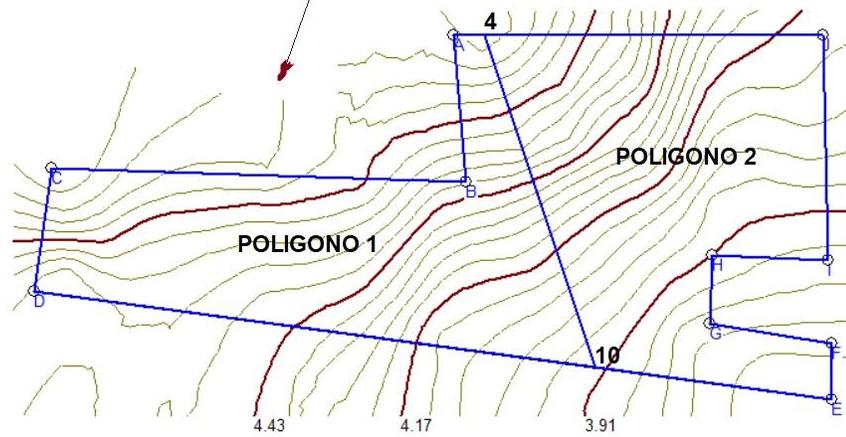
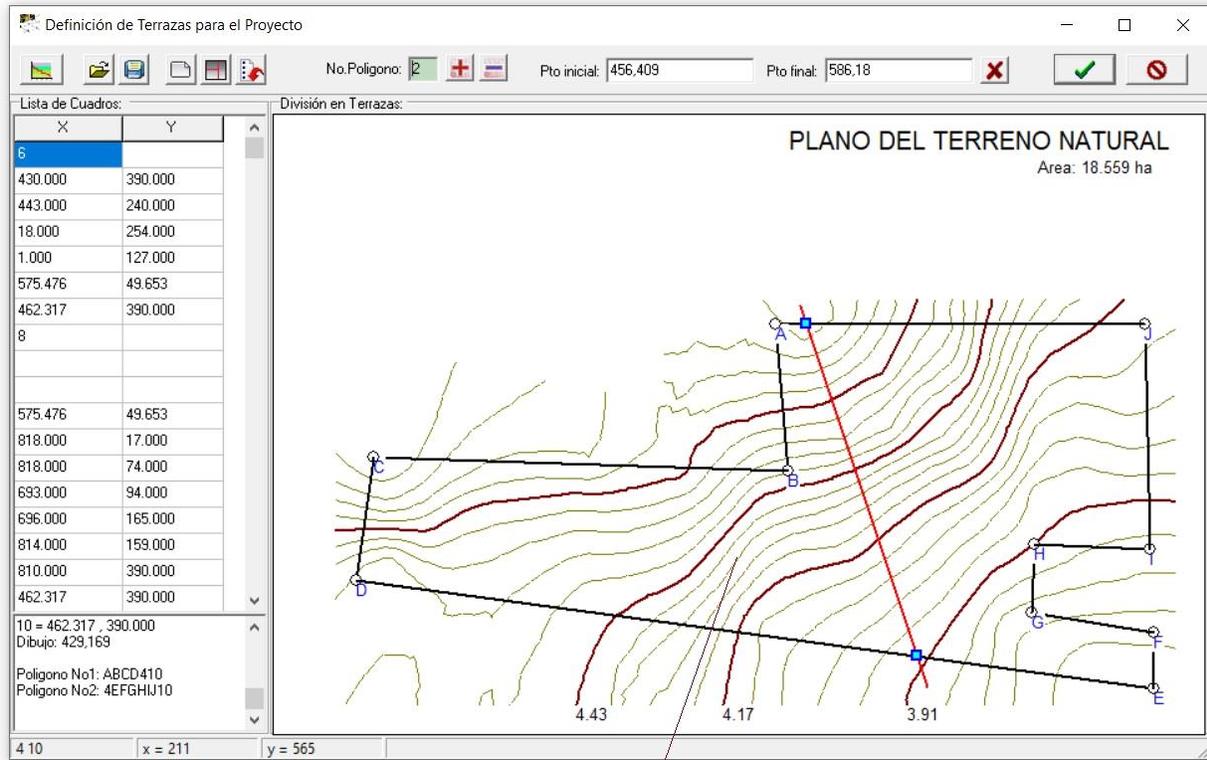


Figura e.10. División del predio en cuadros o terrazas.

Resultados de la Nivelación

Mostrar Ayuda

Resultados Nivelación | Cortes y Rellenos | Reporte del Cálculo

NoIter	Delta	Sentido	R=Vc/Vr	Aorigen	
0	0.00000000	-----	0.88692	4.48543	Inicial
1	0.01000000	Baja (-)	1.22196	4.47543	
2	0.01000000	Baja (-)	1.68626	4.46543	
3	0.01000000	Sube (+)	1.22196	4.47543	
4	0.00500000	Baja (-)	1.45590	4.47043	
5	0.00500000	Sube (+)	1.22196	4.47543	
6	0.00250000	Baja (-)	1.33550	4.47293	
7	0.00250000	Sube (+)	1.22196	4.47543	
8	0.00125000	Baja (-)	1.27770	4.47418	
9	0.00125000	Sube (+)	1.22196	4.47543	
10	0.00062500	Baja (-)	1.24503	4.47480	

NoIteraciones: 10
Cota al origen Ajustada: 4.4748

7. RESUMEN:

PLANO INICIAL:
Ec.Calculada del Plano: $Z = A + Bx + Cy$ $Z = 4.48543 + -0.00126718 x + 0.00219212 y$

PLANO AJUSTADO:
Plano Proyecto: $Z = A'' + Bx + Cy$ $Z = 4.47480 + -0.00126718 x + 0.00219212 y$

(*) Se rebasó el corte permisible

Figura e.11. Reporte de cálculo de la nivelación.

Resultados de la Nivelación

Mostrar Ayuda

Resultados Nivelación | Cortes y Rellenos | Reporte del Cálculo

IV. RESULTADOS DE LA NIVELACIÓN:
(PENDIENTES NATURALES)

GENERALES:

Superficie a nivelar 18.5588 ha
Ec.Calculada del Plano: $Z = A + Bx + Cy$ $Z = 4.48543 + -0.00127 x + 0.00219 y$
Pendiente natural en el eje X -0.12672 %
Pendiente natural en el eje Y 0.21921 %

AJUSTE AL PLANO:

X centroidal 486.2986 m
Y centroidal 204.9075 m
Cota(Z) centroidal 4.3323 m
Cota del punto de origen 4.4748 m
Plano Proyecto: $Z = A'' + Bx + Cy$ $Z = 4.4748 + -0.00127 x + 0.00219 y$

CORTES Y RELLENOS:

Área interior 14.130 ha
Suma de espesores de corte 7.540 m
Suma de espesores de relleno 5.740 m
Coeficiente de compactación 0.250 m
Volumen de corte en área interior 4893.1913 m³
Volumen de relleno en área interior 3930.1913 m³
Relación Vol. Corte/Vol. Relleno 1.245
Número de puntos de Corte 103
Número de puntos de Relleno 89
Número de puntos Nulos 9
Altura de corte promedio 7.32 cm
Num. de puntos con corte < 5 cm 38

(*) Se rebasó el corte permisible

Figura e.12. Resultados de la nivelación (Resumen)

Resultados de la Nivelación

Mostrar Ayuda

Resultados Nivelación | Cortes y Rellenos | Reporte del Cálculo

Ren\Col	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	TN CP Co/Re															4. 4. .
2	TN CP Co/Re															4. 4. .
3	TN CP Co/Re															
4	TN CP Co/Re															
5	TN CP Co/Re		4.92 4.95 -2	4.88 4.91 -3	4.83 4.87 -4	4.80 4.83 -4	4.79 4.76 -1	4.78 4.72 2	4.79 4.72 7	4.77 4.68 9	4.74 4.64 10	4.72 4.60 12	4.68 4.57 11	4.62 4.53 9		
6	TN CP Co/Re	4.86 4.92 -6	4.86 4.88 -2	4.81 4.84 -3	4.76 4.81 -5	4.73 4.77 -4	4.71 4.73 -2	4.71 4.69 1	4.70 4.65 4	4.70 4.62 8	4.68 4.58 10	4.66 4.54 12	4.63 4.50 12	4.55 4.46 8	4.46 4.43 3	4. 4. 4.
7	TN CP Co/Re	4.73 4.85 -12	4.74 4.82 -8	4.72 4.78 -6	4.67 4.74 -7	4.65 4.70 -5	4.64 4.66 -2	4.62 4.63 0	4.61 4.59 2	4.61 4.55 6	4.60 4.51 9	4.58 4.47 11	4.54 4.44 11	4.46 4.40 6	4.37 4.36 1	4. 4. 4.
8	TN CP Co/Re	4.58 4.79 -21	4.58 4.75 -17	4.62 4.71 -9	4.61 4.67 -6	4.60 4.64 -3	4.58 4.60 -1	4.56 4.56 0	4.54 4.52 2	4.54 4.48 6	4.53 4.45 9	4.51 4.41 10	4.46 4.37 10	4.38 4.33 5	4.29 4.29 -1	4. 4. 4.
9	TN CP Co/Re		4.52 4.68 -17	4.55 4.65 -9	4.57 4.61 -4	4.56 4.57 -1	4.55 4.53 1	4.52 4.49 3	4.49 4.46 4	4.48 4.42 6	4.47 4.38 9	4.47 4.34 9	4.45 4.30 9	4.39 4.30 4	4.31 4.27 4	4. 4. -1
	TAL															

(*) Se rebasó el corte permisible

Figura e.13. Resultados de cortes y rellenos.

E.3.3. Mapas y Resultados

TERRA 1.0 - Sistema Auxiliar en el Desarrollo de Proyectos de Nivelación de Tierras

Archivo Nivelación Mapas y Resultados Topo Ayuda

Resultados por Cuadros para la División del Terreno

Número de puntos Nulos..... 61
 Altura de corte promedio 1.00 cm
 Num. de puntos con corte < 5 cm..... 13

VOLUMENES:
 Volumen de corte por ha..... 15.6863 m³
 Volumen de relleno por ha..... 15.3186 m³
 Volumen total de corte..... 148.5992 m³
 Volumen total de relleno..... 145.1164 m³

COSTOS:
 Costo unitario de movimiento..... 21.000 \$/m³
 Costo total de nivelación 3120.584 \$
 Costo de nivelación por hectárea..... 329.412 \$

F. RESUMEN GENERAL DE LOS CUADROS:

Cuadro	Area (ha)	Volumen/ha (m ³)		Volumen Total (m ³)		Costo (\$)	
		Corte	Relleno	Corte	Relleno	Por Ha	Total
1	9.086	31.308	32.350	284.451	293.915	657.465	5973.466
2	9.473	15.686	15.319	148.599	145.116	329.412	3120.584
TOTAL:	18.559			433.050	439.031		9094.050

Figura e.14. Reporte por cuadros independientes.

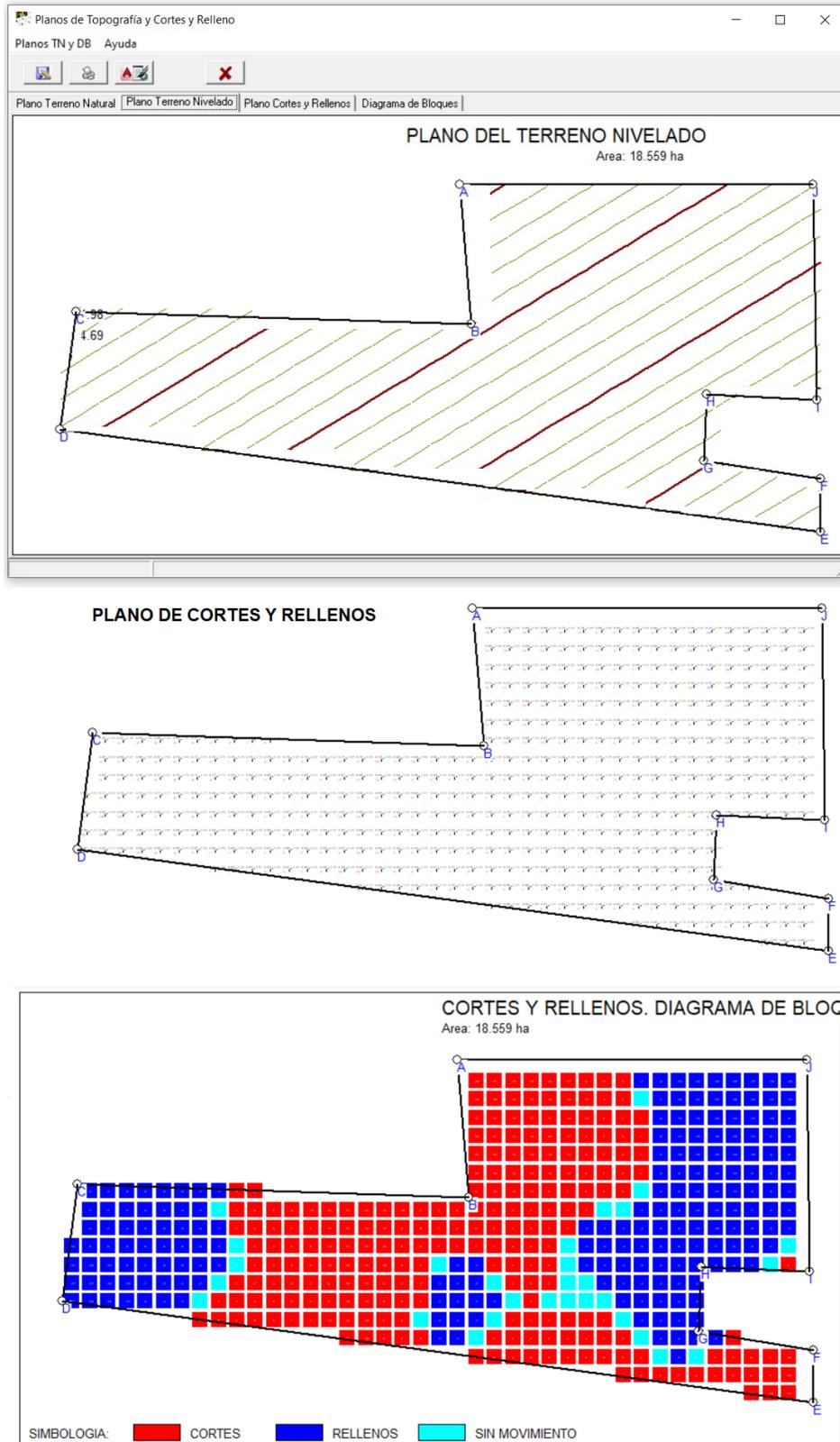


Figura e.15. Planos del terreno nivelado, cortes y rellenos y diagrama de bloques.

En esta sección se tendrá el reporte de cálculo de la nivelación en caso de cerrarse las ventanas que se abren en el momento de ejecutar la nivelación. Se puede acceder en primer término al reporte de cálculo o bien a los resultados obtenidos por cuadros independientes en caso de haber realizado la división del terreno (figura e.14).

De igual manera se podrán desplegar los planos del proceso de nivelación: Plano del terreno natural, plano del terreno nivelado, plano con valores de cortes y rellenos por cada punto de la cuadrícula y planos de diagrama de bloques (figura e.15).

Para observar con claridad el plano de valores de cortes y rellenos se ha implementado una opción para ampliar el plano hasta en un 400%. Para activar esta opción pulsar el botón izquierdo en cualquier parte del plano. Los planos podrán ser grabados en formato JPG, o bien podrán ser exportados a AutoCAD para proporcionar un mejor terminado en caso de requerirse.

E.3.4. Topo

En caso de que el plano topográfico no satisfaga las expectativas del usuario se ha implementado el menú Topo, con el objetivo de poder configurar en forma manual el plano topográfico. En el cuadro mostrado en la figura e.16 se puede ver que será posible introducir el archivo de datos de campo, definir los variogramas a utilizar en el caso del método de Kriging; redefinir nuevos límites para el plano y checar en forma manual el comportamiento del variograma y su ajuste al modelo elegido. Por defecto el programa tiene el ajuste a un variograma lineal, pero será posible elegir otros como son: esférico, cuadrático, cúbico, exponencial o gaussiano.

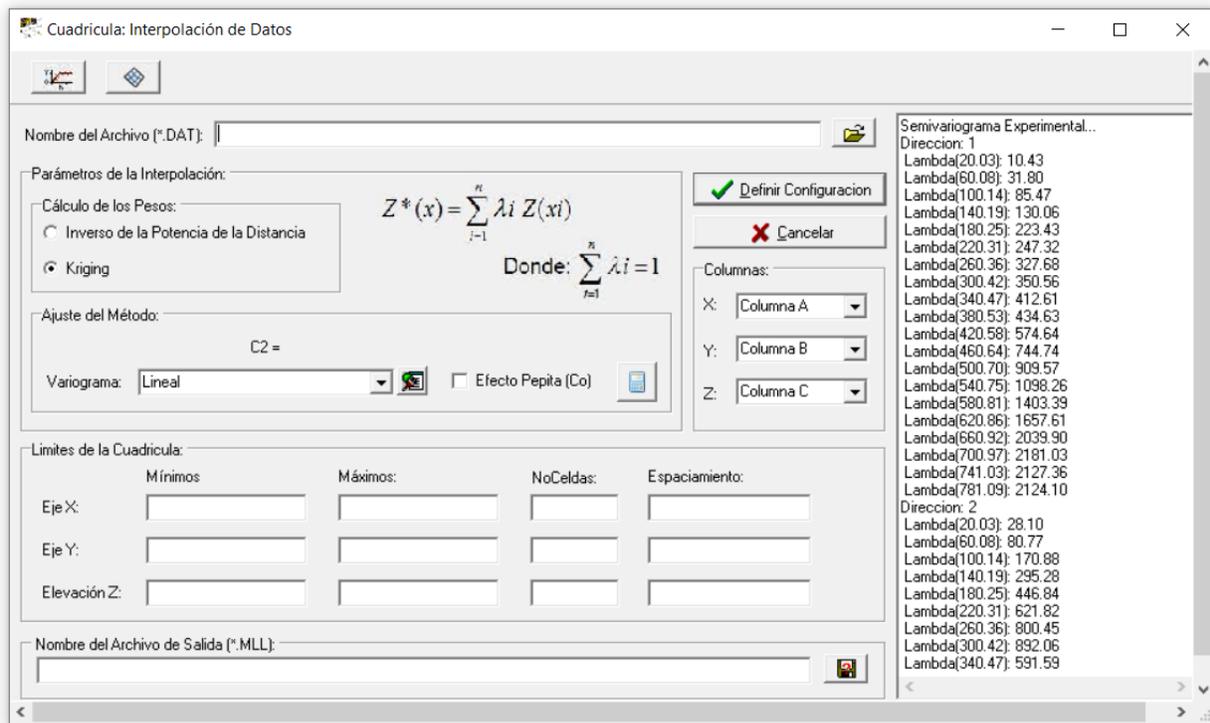


Figura e.16. Cuadro de diálogo para la interpolación manual.

E.3.5. Ayuda

El menú ayuda contiene tres opciones: la Ayuda General del Sistema, un glosario de términos relacionados con la nivelación de tierras y la información acerca del sistema y autores del programa. Revise la ayuda, puede tener más información que este pequeño manual de usuario.

F. PLANOS DEL EJEMPLO 1