

GB1250
M37.

APLICACIÓN DE INDICADORES DE LÓGICA DIFUSA A LA ESTIMACIÓN DE
PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS.
APLICACIÓN AL ACUÍFERO DE LA PLANICIE ALUVIAL DEL RÍO MOTATÁN.

Por
Fanny Coromoto Martínez Briceño

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster Scientiae en Recursos Hidráulicos

Asesor Principal:

www.bdigital.ula.ve

Dr. Hervé J. Jégat

MSc. Luis E. Mora

S E R B I U L A
Tulio Febres Cordero

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y TERRITORIAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
Mérida, Venezuela
2003.

DONACION

C.C. Reconocimiento

ÍNDICE

	Página
AGRADECIMIENTO.....	IX
LISTA DE TABLAS.....	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVII
RESUMEN.....	XXIII
Capítulos	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Geoestadística.....	3
2.1.1. Conceptos básicos de Geoestadística.....	3
Variable regionalizada.....	3
Objeto de la teoría de las variables regionalizadas.....	4
2.1.2. Momentos considerados en Geoestadística Lineal.....	5
Momentos de primer orden o esperanza matemática.....	5
Momentos de segundo orden.....	5
2.1.3. Inferencia estadística y funciones estacionarias.....	6
Hipótesis de estacionariedad.....	6
2.1.4. Hipótesis intrínseca.....	7
2.1.5. Análisis estructural. Medida de variabilidad espacial.....	7
Variograma. Comportamiento.....	7
Parámetros del variograma.....	11
Variograma teórico.....	12
2.2. Krigado.....	18

2.2.1. Krigado ordinario.....	18
2.3. Lógica Difusa.....	20
2.3.1. Los subconjuntos difusos.....	20
Características de un subconjunto difuso.....	21
Operaciones con subconjuntos difusos.....	22
Comparación entre grado de pertenencia y probabilidad.....	24
2.3.2. Las cantidades difusas. Definición.....	24
Intervalo difuso.....	25
Número difuso.....	25
2.3.3. Razonamiento en Lógica Difusa.....	26
Variable lingüística.....	26
Proposiciones difusas.....	26
Razonamiento aproximado.....	27
2.3.4. Krigado con variogramas imprecisos.....	27
Parámetros de variogramas difusos.....	29
3. METODOLOGÍA APLICADA EN EL ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO....	31
3.1. Información básica relacionada con el área en estudio.....	31
3.1.1. Ubicación.....	31
3.1.2. Geología.....	32
3.1.3. Climatología.....	32
3.1.4. Topografía.....	33
3.1.5. Hidrografía.....	33
3.2. Recolección y procesamiento de la información básica existente.....	33
3.2.1. Variables utilizadas.....	34
3.2.2. Prueba de hipótesis de normalidad.....	39
3.3. Definición de casos.....	40
3.3.1. Caso I.....	40
3.3.2. Caso II.....	41
3.3.3. Caso III.....	41
3.4. Análisis geoestadístico de los parámetros transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento para calcular el abatimiento.....	41
3.4.1. Análisis geoestadístico de la transmisividad.....	41
Estimación de los parámetros del variograma.....	41
Estimación por krigado.....	43
3.4.2. Determinación del abatimiento calculado.....	44

Intervalo para el abatimiento calculado	45
Función de pertenencia para el abatimiento calculado	48
Imprecisión relativa del intervalo del abatimiento calculado ..	51
3.4.3. Análisis geoestadístico para el caudal	52
3.4.4. Determinación del abatimiento calculado	54
Intervalo para el abatimiento calculado	55
Función de pertenencia para el abatimiento calculado	57
Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado ..	59
3.4.5. Análisis geoestadístico para el coeficiente de almacenamiento	60
Determinación del abatimiento calculado	62
Intervalo para el abatimiento calculado	64
Función de pertenencia e imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado	65
3.5. Comparación entre las funciones de pertenencia de abatimiento calculado	68
4. RESULTADOS	73
4.1. Estimación del abatimiento para el caso I	73
4.1.1. Estimación del intervalo de transmisividad	73
4.1.2. Intervalo de abatimiento con transmisividad estimada	76
4.1.3. Función de pertenencia del intervalo de abatimiento	78
4.1.4. Imprecisión en la estimación del intervalo de abatimiento	82
4.1.5. Comparación entre los resultados de los intervalos de abatimiento estimado	84
4.2. Estimación del abatimiento para el caso II	84
4.2.1. Estimación del intervalo de caudal	85
4.2.2. Intervalo de abatimiento con transmisividad y caudal estimados	87
4.2.3. Función de pertenencia del intervalo de abatimiento	89
4.2.4. Imprecisión en la estimación del abatimiento	93
4.2.5. Comparación entre los resultados de los intervalos de abatimiento calculado y los intervalos de abatimiento estimado	95
4.3. Estimación del abatimiento para el caso III	96
4.3.1. Estimación del intervalo de coeficiente de almacenamiento ..	96
4.3.2. Intervalo de abatimiento con transmisividad, caudal y	

	coeficiente de almacenamiento estimados	98
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
	Conclusiones	101
	Recomendaciones.....	103
	LITERATURA CITADA.....	105
	ANEXO I. Anexo correspondiente al capítulo 3	109
	ANEXO II. Anexo correspondiente al capítulo 4.....	137
	APÉNDICE A. Conceptos estadísticos básicos	153

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
3.1	Valores de prueba de bombeo, transmisividad y capacidad específica.....	36
3.2	Análisis de regresión para el caso en estudio.....	36
3.3	Resumen estadístico de la transmisividad.....	39
3.4	Resumen estadístico del abatimiento calculado	45
3.5	Resumen estadístico del abatimiento calculado con transmisividad y caudal estimado.....	55
3.6	Resumen estadístico del abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento.....	62

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. Relación existente entre el variograma y la covarianza.....	8
2.2. Comportamiento parabólico en el origen de un variograma.....	8
2.3. Comportamiento lineal en el origen	9
2.4. Comportamiento del variograma con discontinuidad en el origen.....	9
2.5. Efecto de pepita puro	10
2.6. Parámetros del variograma	12
2.7. Variograma teóricos mas utilizados (tomado de Samper y Carrera, 1990).....	17
2.8. Intersección de dos subconjuntos difusos.....	23
2.9. Unión de dos subconjuntos difusos.....	23
2.10. Intervalo difuso y sus características.....	25
2.11. Triángulo	25
2.12. Semifallo	25
2.13. Forma L.R.	25
2.14. Variograma Experimental con un “fácil ajuste”	28
2.15. Variograma experimental con “difícil” ajuste	28
3.1. Ubicación geográfica de la planicie del Motatán	31
3.2. Regresión lineal para generar transmisividad.....	37
3.3. Ajuste a una distribución normal para los valores de transmisividad	39

3.4. Variograma experimental y teórico del ln de transmisividad	41
3.5. Mapa de transmisividad difusa.....	43
3.6. Mapa de abatimiento calculado con transmisividad difusa	44
3.7. Mapa de abatimiento máximo calculado con transmisividad difusa.....	46
3.8. Mapa de abatimiento mínimo calculado con transmisividad difusa.....	47
3.9. Forma general del número difuso abatimiento calculado	48
3.10. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento calculado en la coordenada 276500-1042000.....	49
3.11. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento calculado en la coordenada 282500-1052500.....	49
3.12. Mapa de imprecisión en el abatimiento calculado	51
3.13. Variograma experimental y teórico para los valores del ln de caudal.	52
3.14. Mapa de caudal estimado	53
3.15. Mapa de abatimiento calculado con transmisividad y caudal difusos.....	54
3.16. Mapa de abatimiento máximo calculado con transmisividad y caudal difusos.....	55
3.17. Mapa de abatimiento mínimo calculado con transmisividad y caudal difusos	56
3.18. Función de pertenencia para abatimiento calculado coordenada 276500-1042000.....	57
3.19. Función de pertenencia para abatimiento calculado coordenada 282500-1052500.....	57
3.20. Mapa de imprecisión del intervalo de abatimiento calculado con transmisividad y caudal difusos.....	58
3.21. Variograma experimental y teórico para los valores de coeficiente de almacenamiento.....	60

3.22. Mapa de coeficiente de almacenamiento estimado.....	61
3.23. Mapa de abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.....	62
3.24. Mapa de abatimiento máximo calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.....	63
3.25. Mapa de abatimiento mínimo calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.....	64
3.26. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento calculado en la coordenada 276500-1042000	65
3.27. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento calculado en la coordenada 282500-1052500	66
3.28. Mapa de imprecisión del intervalo de abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente almacenamiento difusos.....	67
3.29. Función de pertenencia adimensional del abatimiento calculado con transmisividad difusa en la coordenada 276500-1042000	68
3.30. Función de pertenencia adimensional del abatimiento calculado con transmisividad y caudal estimado en la coordenada 276500-1042000.....	68
3.31. Función de pertenencia adimensional del abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos en la coordenada 276500-1042000	69
4.1. Mapa de transmisividad máxima estimada.....	72
4.2. Mapa de transmisividad mínima estimada	73
4.3. Mapa de errores en la transmisividad estimada.....	74
4.4. Mapa de abatimiento máximo calculado con transmisividad difusa.....	75
4.5. Mapa de abatimiento mínimo calculado con transmisividad difusa.....	76
4.6. Forma general de la función de pertenencia para el intervalo de	

abatimiento estimado.....	77
4.7. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento estimado en la coordenada 276500-1042000	78
4.8. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento estimado en la coordenada 282500-1052500	78
4.9. Función de pertenencia adimensional coordenada 276500-1042000	79
4.10. Función de pertenencia adimensional coordenada 282500-1052500	80
4.11. Mapa de imprecisión en el intervalo de abatimiento estimado con transmisividad estimada.....	81
4.12. Mapa de caudal máximo estimado	83
4.13. Mapa de caudal mínimo estimado	84
4.14. Mapa de errores en el caudal estimado	85
4.15. Mapa del abatimiento 4 estimado.....	86
4.16. Función de pertenencia para $[s_4-s_1]$ con transmisividad y caudal difusos en la coordenada 276500-1042000	87
4.17. Función de pertenencia para $[s_4-s_1]$ con transmisividad y caudal difusos en la coordenada 282500-1052500	88
4.18. Función de pertenencia para $[s_4-s_3]$ con transmisividad y caudal difusos en la coordenada 276500-1042000	88
4.19. Función de pertenencia para $[s_4-s_3]$ con transmisividad y caudal difusos en la coordenada 282500-1052500	89
4.20. Función de pertenencia adimensional para el intervalo $[s_4-s_1]$ en la coordenada 276500-1042000	89
4.21. Función de pertenencia adimensional para el intervalo $[s_4-s_1]$ en la coordenada 282500-1052500	90

4.22. Función de pertenencia adimensional para el intervalo $[s_4-s_3]$ en la coordenada 276500-1042000.....	90
4.23. Función de pertenencia adimensional para el intervalo $[s_4-s_3]$ en la coordenada 282500-1052500.....	91
4.24. Mapa de imprecisión del intervalo de abatimiento $[s_4-s_1]$ estimado con transmisividad y caudal difusos.....	92
4.25. Mapa de imprecisión del intervalo de abatimiento $[s_4-s_3]$ estimado con transmisividad y caudal difusos.....	93
4.26. Mapa de coeficiente de almacenamiento máximo estimado	95
4.27. mapa de coeficiente de almacenamiento mínimo estimado.....	96
4.28. Mapa de abatimiento 3 estimado con transmisividad caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.....	97
4.29. Mapa de abatimiento 6 estimado con transmisividad caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.....	98

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE SÍMBOLOS

$Z_{(x)}$:	Valor supuesto real de una variable aleatoria
$Z^*_{(x)}$:	Valor estimado de una variable aleatoria
$Z^*_{(xi)}$:	Valor puntual de una variable aleatoria
h :	Distancia entre dos puntos x_i y x_{i+h}
$E_{(x)}$:	Esperanza matemática de primer orden o media
$m_{(x)}$:	Deriva
$\sigma^2_{(x)}$:	Varianza de x o momento de segundo orden
$C_{(xi,xj)}$:	Covarianza de dos variables aleatorias $Z_{(xi)}$, $Z_{(xj)}$
$\gamma(h)$:	Variograma teórico
$N(h)$:	Número de pares de puntos separados a una distancia h , utilizados para el cálculo del variograma.
$\sum_{i=1}^n$:	Función de error
$Var[Z_{(x)}]$:	Varianza de la variable aleatoria $Z_{(x)}$.
$\mathcal{E}_{(x)}$:	Función de error
λ_i :	Valor de peso que corresponde a cada punto i , en el kriging
h :	Distancia entre dos puntos
a :	Alcance
θ :	Azimut o dirección de cálculo del variograma experimental
k :	Pendiente en el origen

$L_{(\lambda, \mu)}$:	Lagrangiano de una función
μ :	Multiplicadores de Lagrange
U :	Conjunto universal
Λ :	Subconjunto difuso de U
$f_{(a)}$:	Función de pertenencia del grado en que x pertenece a Λ
$Apoyo_{(A)}$:	Amplitud o soporte de un subconjunto difuso Λ .
$h_{(a)}$:	Altura de un subconjunto difuso Λ .
$Centro_{(A)}$:	Centro del subconjunto difuso Λ .
$Card_{(A)}$:	Cardinal de un subconjunto difuso Λ .
A_α :	Corte de nivel α
α :	Valores comprendidos en el intervalo $[0, 1]$
\in :	Pertenece
\cap :	Intersección
\cup :	Unión.
$F_a^c(x)$:	Complemento de un subconjunto difuso Λ .
ϕ :	Conjunto vacío.
V :	Nombre de la variable.
Ev :	Conjunto finito o no de los valores lingüísticos de la variable V .
p, q :	Proposiciones de lógica clásica

p_k :	Parámetros del variograma
TR :	Estado donde se encuentran ubicados los pozos, Trujillo.
NP :	Nivel piezométrico.
CT :	Cota de terreno.
H :	Distancia vertical medida desde la superficie del terreno hasta el nivel del agua.
s :	Abatimiento o depresión
NE :	Nivel estático
ND :	Nivel dinámico
CE :	Capacidad específica
Q :	Caudal extraído
R^2 :	Coefficiente de correlación
S :	Coefficiente de almacenamiento
d_1 :	Distancia desde la superficie del terreno hasta el fondo de la capa permeable.
d_2 :	Distancia desde la superficie del terreno hasta la parte superior de la capa permeable.
$Var(y^*-y)$:	Varianza del krigado
$Var(Z^*-Z)$:	Varianza de estimación
y^* :	Valor estimado por krigado del logaritmo natural de la variable original.
T :	Transmisividad.
t :	Tiempo de bombeo
r :	Radio

σ :	Desviación estándar
<i>s</i> calculado:	Abatimiento calculado
<i>s</i> máx calculado:	Abatimiento máximo calculado
<i>s</i> mín calculado:	Abatimiento mínimo calculado
<i>T</i> mín:	Transmisividad mínima estimada
<i>T</i> máx:	Transmisividad máxima estimada
δ :	Desviación estándar de la estimación del krigado
<i>s</i> máx:	Abatimiento máximo estimado
<i>s</i> mín:	Abatimiento mínimo estimado
<i>Q</i> máx:	Caudal máximo estimado
<i>Q</i> mín:	Caudal mínimo estimado
<i>s</i> ₁ :	Abatimiento 1
<i>s</i> ₃ :	Abatimiento 3
<i>S</i> máx:	Coefficiente de almacenamiento máximo estimado
<i>S</i> mín:	Coefficiente de almacenamiento mínimo estimado.
<i>m</i> :	Metros
<i>m</i> ² :	Metros cuadrados
<i>m</i> ³ :	Metros cúbicos
<i>d</i> :	Día
<i>Km</i> ² :	Kilómetros cuadrados
°:	Grados

XX

$^{\circ}\text{C}$:	Grados centígrados
<i>mm</i> :	Milímetros
<i>l/s</i> :	Litros por segundo
<i>l/s.m</i> :	Litros por Segundo por metros

www.bdigital.ula.ve

RESUMEN

Normalmente en geoestadística aplicada, solo una cantidad pequeña de datos medidos son aprovechables y así surgen las dificultades al estimar los parámetros que definen el comportamiento y la vulnerabilidad de sistemas acuíferos. Como resultado de esta necesidad práctica surge la lógica difusa, cuya meta general es manejar diferentes tipos de información cierta, incierta e imprecisa.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento espacial de algunos parámetros hidrogeológicos para evaluar los recursos de agua subterránea, aplicando la teoría de lógica difusa se toma como caso de estudio el acuífero de la planicie del Motatán, conocido por su importancia regional en el ámbito agrícola.

A partir del muestreo de un determinado número de pozos en la zona de estudio, se estimaron los parámetros hidrogeológicos: transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento a los cuales se les analizó el comportamiento estructural, realizando la estimación del variograma y aplicando la técnica del krigeado para parámetro, determinando así, con la combinación de parámetros difusos y constantes, el abatimiento. Tomando en cuenta las características estadísticas de la distribución, se determinó el intervalo de abatimiento, o sea definiendo el apoyo de la función de pertenencia.

Para realizar comparaciones, se estimó el abatimiento con la combinación de parámetros difusos y constantes, generando el intervalo de abatimiento estimado con la varianza del krigeado de los parámetros estudiados, o sea que los límites de la función de pertenencia son estimados.

Este método permite confirmar la importancia de tomar en cuenta la imprecisión de los parámetros en el cálculo de abatimiento.

Palabras claves: *lógica difusa, transmisividad, caudal, coeficiente de almacenamiento, parámetros difusos, intervalo de abatimiento, función de pertenencia, imprecisión de parámetros.*

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La presentación de los datos a través de mapas ofrece una idea generalizada de la variabilidad espacial de un parámetro determinado; sin embargo cuando la cantidad de datos observados es insuficiente, el mapa originado estará sujeto a una interpretación errónea del fenómeno en referencia, ya que se corre el riesgo de ignorar total o parcialmente la subjetividad que puede estar presente en la interpretación de los datos de los diferentes sectores del mapa; por lo tanto los resultados presentados estarán desfasados de la precisión real que pueda tener la estimación de algún parámetro.

Se desarrollará una metodología basada en la teoría de la lógica difusa, la cual ha sido el resultado de una necesidad práctica de realizar la predicción espacial del parámetro a estudiar cuando los datos disponibles no son suficientes, dicha metodología se aplicará en la predicción de varios parámetros entre ellos la transmisividad y el abatimiento.

La teoría difusa mantiene una rica base matemática que comprende los problemas de decisión y la construcción de reglas de decisión con criterios de evaluación y combinación.

La relación de la lógica difusa de probabilidad tiene importancia especial, ya que hasta donde puede determinarse este es el primer papel para combinar geoestadística y la teoría de la lógica difusa.

La idea común en todos estos métodos es utilizar toda la información adicional disponible cierta, incierta o probabilística y la imprecisa o vaga. La información cierta se refiere a la información obtenida de situaciones observadas, y la información probabilística corresponde a la información difusa. La diferencia entre estas dos categorías se relaciona con el tipo de información difusa; la información incierta es la probabilidad de ocurrencia o no y la información imprecisa no es o no puede ser caracterizada a través de probabilidades; sin embargo por razonamiento cualitativo u otras formas de inexactitud, se utiliza en la formulación difusa.

La meta general para introducir métodos de conjuntos difusos es manejar diferentes tipos de información incierta en modelos geoestadísticos. Para la información inexacta o imprecisa, que es el resultado de las valoraciones subjetivas, puede usarse una aproximación no frecuente. Se usa la teoría de la lógica difusa como un método no frecuente en el manejo de la incertidumbre.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar una metodología basada en la teoría difusa que permita la evaluación de los recursos de agua subterránea en función de datos hidrogeológicos imprecisos.

Objetivos específicos

- Cartografiar la distribución espacial de la transmisividad
- Aplicar la teoría de la lógica difusa para la imprecisión relativa de los parámetros hidrogeológicos estudiados.
- Evaluar los resultados obtenidos para la valoración del acuífero de la planicie del Motatán.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. GEOESTADÍSTICA

La geoestadística es una técnica desarrollada a principios de los años sesenta que ofrece un conjunto de herramientas con las que se puede abordar el análisis de los componentes de variabilidad aleatoria (Samper, 1994). Según definición de Matheron, 1962, citado por Samper y Carrera (1990); es la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales, y la concibe como la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas a la estimación de procesos o fenómenos geológicos en el espacio, también se puede definir como la rama de la estadística dedicada al estudio de los fenómenos espacialmente distribuidos (Journel, 1979, citado por Mora, (1996)).

Las dos aplicaciones principales de la geoestadística en la hidrogeología son:

- La estimación espacial de parámetros hidrogeológicos a partir de un conjunto de valores medidos en forma puntal. La innovación de la geoestadística, en este caso, es que permite obtener no sólo la estimación sino también una medida de la incertidumbre de dicha estimación.
- Al proporcionar las medidas sobre la incertidumbre de la estimación, la geoestadística constituye una poderosa herramienta para la selección de puntos de muestreo de forma tal que minimice esa incertidumbre de estimación (Ben-Jemaa et al, 1994, citado por Miyashiro, (1996)).

2.1.1. Conceptos básicos de Geoestadística

- ***Variable regionalizada***

El término de variable regionalizada fue propuesto por Matheron para calificar un fenómeno que se desarrolla tanto en el espacio y/o en el tiempo y manifiesta una cierta estructura (Mora, 1996). Por otro lado, Miyashiro (1996) la define como una variable distribuida en el espacio; utilizada para representar un fenómeno natural.

Desde el punto de vista matemático, una variable regionalizada es simplemente una función aleatoria. Toda variable regionalizada posee una estructura de variabilidad particular:

Las variables medidas en dos puntos separados por una distancia h , están correlacionadas; y bajo la hipótesis de estacionaridad el grado de dependencia o autocorrelación de éstas es sólo función de las características propias de la variable considerada, del módulo y dirección del vector h , que separa los dos puntos, pero no de la localización específica de ambos puntos ni del valor medido en ellos (Mora, 1996)

Lo característico de una función aleatoria es que se puede concebir como la suma de una componente estructurada y otra aparentemente errática o aleatoria. La componente estructurada es la que permite asegurar que, si en una zona se dispone de varias medidas de valores altos, lo más probable es que en otros puntos de medidas adicionales a los valores también sean altos. La componente aleatoria, sin embargo, impide predecir con exactitud el valor de dichas hipotéticas medidas (Samper, 1994).

Objeto de la teoría de las variables regionalizadas. Mora (1996) resume estos objetivos en:

- Establecer las bases teóricas que permiten tomar en cuenta las características estructurales de los fenómenos naturales.
- Proporcionar los medios prácticos para resolver los diversos problemas de estimación espacial de parámetros que se presentan a partir de una muestra fragmentada.

- *Función aleatoria.* Una función aleatoria es un conjunto de variables aleatorias, $Z(x)$, donde x es la ubicación que pertenece al área investigada, cuya dependencia de uno con respecto al otro se especifica por unos mecanismos probabilísticos (Miyashiro, 1996).

La función aleatoria expresa el aspecto aleatorio y estructural de un fenómeno natural de la manera siguiente:

- Localmente, el valor puntal $Z(X_i)$ se considera como una variable aleatoria.
- Este valor puntal $Z(X)$ es también una función aleatoria en el sentido de que por cada par de puntos $Z(X_i)$ y $X_i + h$ las variables aleatorias correspondientes $Z(X_i)$ y $Z(X_i + h)$ no son independientes pero se relacionan por una correlación que expresa la estructura del fenómeno.

La variable regionalizada representa al fenómeno, (el conjunto de todos sus posibles valores distribuidos en el espacio), considerada como una realización particular de la función aleatoria construida sobre éste fenómeno (el conjunto de una infinidad de variables aleatorias que representan los valores del fenómeno en cada punto del espacio).

2.1.2. Momentos considerados en Geoestadística Lineal

En la geoestadística lineal son suficientes los primeros momentos de una función aleatoria $Z(x)$. De hecho en la mayoría de las aplicaciones prácticas la información disponible no permite inferir momentos de mayor orden. (Samper y Carrera, 1990, citado por Miyashiro (1996)).

- **Momento de primer orden o esperanza matemática**

El momento de primer orden es la esperanza matemática denominada también como media, es una medida de tendencia central definida como:

$$E[Z(x)] = m(x) \quad (2.1)$$

La función $m(x)$ es conocida como deriva y tendencia, aunque algunos autores prefieren usar el término de deriva.

Momentos de segundo orden. Los tres momentos de segundo orden considerados en geoestadística son los siguientes:

a.- La varianza o momento de segundo orden de $Z(x)$ respecto a $m(x)$:

$$\sigma^2 = Var[Z(x)] = E\{[Z(x) - m(x)]^2\} \quad (2.2)$$

La varianza es generalmente una función de x .

b.- La covarianza de dos variables aleatoria $Z(x_i)$ y $Z(x_j)$, $C(x_i, x_j)$ definida como:

$$C(x_i, x_j) = E\{[Z(x_i) - m(x_i)][Z(x_j) - m(x_j)]\} \quad (2.3)$$

Es una función de dos puntos x_i y x_j . Esta función es denominada a veces como función de autocovarianza.

c.- El variograma es definido como:

$$\gamma(x_i, x_j) = \frac{1}{2} E\{[Z(x_i) - Z(x_j)]^2\} \quad (2.4)$$

De la definición de los momentos de una función aleatoria se puede observar que tanto la varianza como el variograma son siempre positivos mientras que la covarianza puede adoptar valores negativos.

2.1.3. Inferencia estadística y funciones estacionarias

Algunos conceptos estadísticos básicos que servirán de referencia para el desarrollo del presente trabajo, son revisados en el Apéndice A.

- **Hipótesis de estacionariedad**

Una función aleatoria es estacionaria siempre y cuando la ley de probabilidad de los valores que toma esta función en n puntos arbitrarios no varíe por la traslación del conjunto de esos puntos. Es decir, un fenómeno es llamado estacionario si posee una cierta homogeneidad espacial de naturaleza estadística que hace que se pueda repetir en cualquier punto del espacio (Mora, 1996).

Una función aleatoria es estrictamente estacionaria si su función de distribución es invariable respecto a cualquier variación del vector h , es decir la función de distribución del vector aleatorio $[Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)]$ es idéntica a la del $[Z(x_1 + h), Z(x_2 + h), \dots, Z(x_n + h)]$ para cualquier h (Samper y Carrera, 1990, citado por Miyashiro 1996).

Se puede suponer entonces que cada realización particular es satisfactoria para tomar en cuenta el conjunto de realizaciones eventuales por lo que la inferencia estadística puede realizarse reemplazando los valores medios del conjunto de realizaciones posibles por medias espaciales sobre una única realización (Mora, 1996).

La geoestadística lineal está limitada a suponer la hipótesis de estacionariedad de los dos primeros momentos de la función aleatoria. Una función es estacionaria de orden dos cuando:

a.- $E[Z(x)]$ existe y no depende de x , es decir

$$E[Z(x)] = m \text{ para todo } x. \quad (2.5)$$

Si m depende de x , se dice que existe deriva o tendencia.

b.- Para cualquier pareja de variables aleatorias $\{Z(x+h), Z(x)\}$ su covarianza existe y no depende del vector de separación h , es decir:

$$C(x+h, x) = E[Z(x+h)Z(x)] - m^2 = C(h) \quad (2.6)$$

2.1.4. Hipótesis intrínseca

Una función aleatoria $Z(x)$ es intrínseca cuando:

No está definida la varianza pero sí la de sus incrementos, es decir: $[Z(x+h) - Z(x)]$ tiene una varianza y esperanza matemática definidas e independientes de x para todo vector h .

$$Var[Z(x+h) - Z(x)] = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h) \text{ para todo } x \quad (2.7)$$

La hipótesis intrínseca puede ser vista como una limitación de la estacionariedad de segundo orden en el incremento de la función aleatoria $Z(x)$.

La función $\gamma(h)$ se denomina semivariograma, pero en geoestadística se le llama variograma, dichos términos son usados indistintamente.

2.1.5. Análisis estructural. Medida de variabilidad espacial

- **Variograma. Comportamiento**

El variograma se estima directamente mediante la siguiente expresión:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i + h) - Z(x_i))^2 \quad (2.8)$$

donde:

$\gamma(h)$ = Variograma experimental

$Z(x_i)$ = Valores experimentales en los puntos x_i , en los que se tiene datos tanto en x_i como en $x_i + h$

$N(h)$ = es el número de pares de puntos separados por una distancia h .

El variograma mide la variabilidad espacial de un fenómeno de la misma forma en que lo realiza la covarianza. Cuando la función aleatoria es estacionaria, la relación entre el variograma y la función aleatoria es estacionaria, la relación entre el variograma y la covarianza es directa, como se muestra en la Figura 2.1. Se observa que el variograma crece con la distancia h hasta hacerse constante, la covarianza decrece desde el valor de la varianza hasta anularse a una cierta distancia conocida como alcance. Esta distancia señala la zona de influencia en torno a un punto, más allá de la cual la correlación espacial es nula.

La relación entre la varianza y la covarianza se expresa por medio de la ecuación:

$$\gamma(h) = Var(Z) - C(h) \quad (2.9)$$

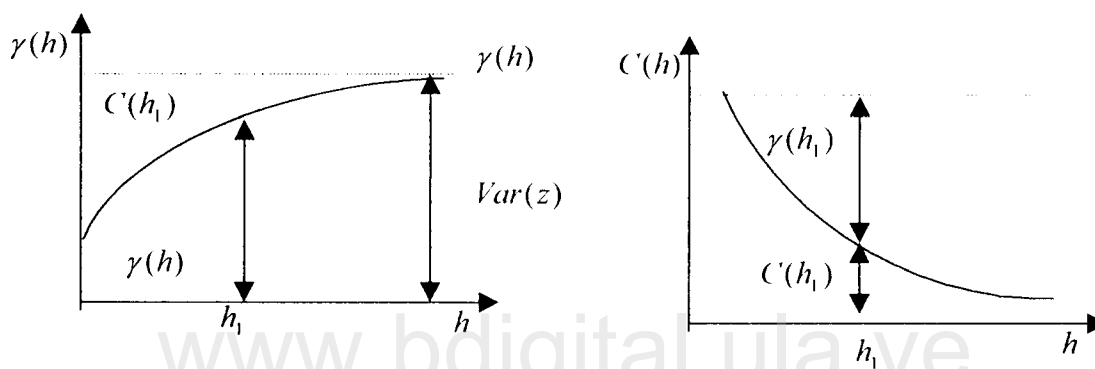


Figura 2.1. Relación existente entre el variograma y la covarianza

El comportamiento gráfico del variograma da una descripción sintética de la estructura del fenómeno estudiado y a su vez permite establecer la relación entre esta estructura y la precisión con la que se resuelve los problemas de interpolación y de estimación planteados.

Para establecer el comportamiento estructural se estudian las tendencias a cortas distancias y las asínticas.

Comportamiento en el origen. Interpreta la continuidad que manifiesta la variable regionalizada. Se distinguen cuatro tipos:

- **Comportamiento parabólico:** Describe a una variable excesivamente regular, derivable en media cuadrática. Ejemplo: Evolución diaria de niveles piezométricos en un pozo profundo. En la Figura 2.2, original de Delhomme (1978), se muestra este tipo de comportamiento (Mora, 1996).

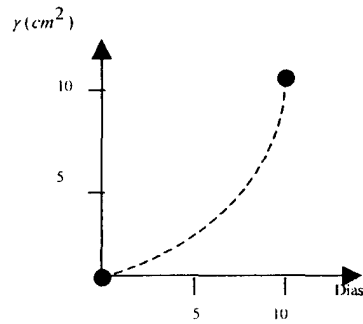


Figura 2.2. Comportamiento parabólico en el origen de un variograma muestral.

- Comportamiento lineal: Tendencia menos regular, continuo en media cuadrática pero no variable. Como por ejemplo, la variación del espesor de una formación geológica. Figura 2.3.

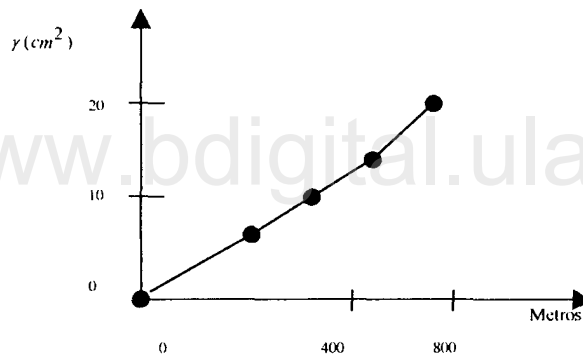


Figura 2.3. Comportamiento lineal en el origen

- Discontinuidad en el origen: La variable es muy irregular, no continua en media cuadrática, un ejemplo lo es, la distribución de una tormenta en función de la distancia, se muestra en la Figura 2.4.

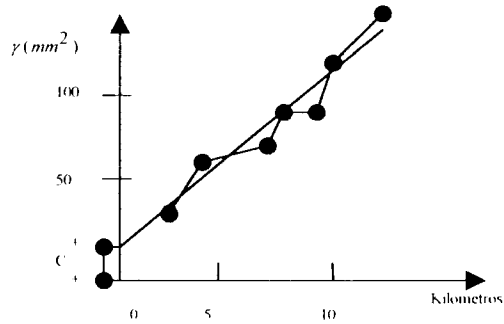


Figura 2.4. Comportamiento del variograma con discontinuidad en el origen.

- Aspecto plano o Efecto de Pepita puro: Es el caso de aleatoriedad pura para $Z(x)$ y $Z(x+h)$, para una distancia h no nula, existe una varianza que oscila entorno a un valor constante. Ejemplo: La evolución de las precipitaciones anuales en una estación. Figura 2.5.

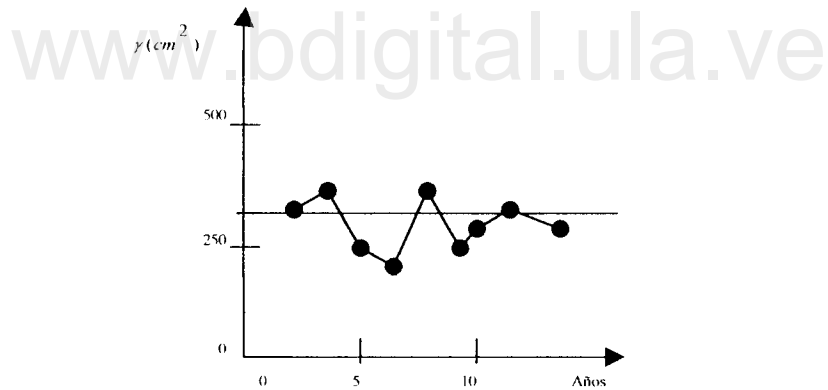


Figura 2.5. Efecto de Pepita puro

- Comportamiento asintótico. El variograma puede crecer indefinidamente ya que es una función monótona no decreciente, al aumentar la diferencia $Z(x+h) - Z(x)$, pero si Z es estacionaria γ puede llegar a estabilizarse y alcanzar un valor límite constante denominado meseta la cual coincide con la varianza σ^2 de Z .

La distancia a la cual se estabiliza el variograma se llama alcance y ésta indica la zona de influencia donde la correlación es nula.

Parámetros del Variograma. En la Figura 2.6, se representan los diferentes parámetros de un variograma, los cuales son:

a. Efecto de pepita: A menudo el variograma es discontinuo en el origen con un salto finito que se le llama efecto de pepita. Este efecto puede deberse a:

- Intervalos de medidas y superposición de semivariograma: Siendo el semivariograma total la suma de los correspondientes a varias escalas de variabilidad del fenómeno buscado, puede resultar que aquellos de escalas más pequeñas aparezcan como efecto de pepita en el semivariograma experimental.
- Efecto de la disposición de puntos de medición: Cuando se trata de demarcar contornos de una región en estudio para efectos de delimitación de la superficie de algún acuífero, es frecuente que existan pozos cercanos a los límites de esas zonas. La consecuencia de tal disposición es que puntos próximos a los límites puedan provocar cambios notables en los valores que no son representativos de la variabilidad global de Z , dando lugar a un efecto de pepita aparente.
- Errores de mediciones: Toda medición puede contener errores, si se supone que estos son realizaciones de una variable aleatoria. $\varepsilon(x)$, que $Z(x)$ representa el campo real, $Z_1(x)$ el campo medido y que los errores son aditivos, entonces Z, Z_1, ε se pueden relacionar mediante:

$$Z_1(x) = Z(x) + \varepsilon(x) \quad (2.10)$$

Suponiendo que $Z(x)$ y $\varepsilon(x)$ son independientes puede establecerse que:

$$\gamma Z_1(h) = \gamma Z(h) + \gamma \varepsilon(h) \quad (2.11)$$

Asumiendo además que los errores carecen de correlación espacial y que tienen una varianza constante σ^2_ε para todo $h \neq 0$, obteniéndose que:

$$\gamma Z_1(h) = \gamma Z(h) + \sigma^2_\varepsilon \quad (2.12)$$

Se puede concluir finalmente que los datos Z_1 tendrán un efecto de pepita puro de valor σ^2_ε además del que puede presentar Z .

b. Meseta: Si Z es estacionaria el variograma puede estabilizarse (comportamiento asintótico) y alcanzar un valor límite constante llamado meseta que coincide con la varianza σ^2 de Z .

c. Rango o alcance: La distancia en la cual el variograma se estabiliza se denomina rango o alcance y denota la zona de influencia en el cual la correlación es nula.

d. Distancia integral: Es aquella distancia h que al multiplicarla por la meseta permite obtener el área existente por encima del variograma a partir de esta distancia h . La distancia integral suele emplearse para medir el grado de correlación espacial de la variable.

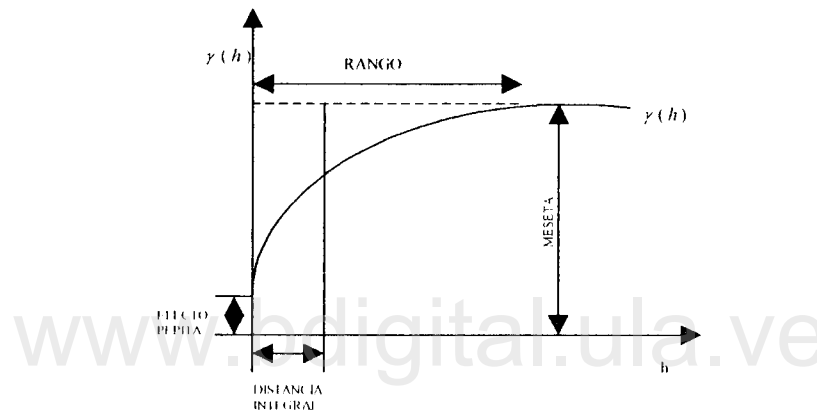


Figura 2.6 Parámetros del Variograma

- *Variograma teórico.* En el variograma experimental se presenta fluctuaciones aparentes, la mayoría de las veces éstas se deben a que los diferentes valores de $\gamma(h)$ son estimaciones obtenidas partiendo de un pequeño número de pares de valores muestrales. En la práctica corriente esto justifica el ajuste de modelos teóricos empíricos a los variogramas muestrales con el objeto de garantizar la coherencia matemática de la estimación.

El término “teórico” se usa para diferenciarlos de los variogramas muestrales; es necesario destacar que estos variogramas teóricos no provienen de alguna hipótesis especial ni pretende representar fenómenos específicos.

Debido a razones de tipo numérico los variogramas de tipo teóricos deberán cumplir con ciertas condiciones:

a.- De la definición de variograma se deduce que $\gamma(h)$ debe ser nulo en el origen es decir que $\gamma(0) = 0$.

b.- $\gamma(h)$ es una función “condicionalmente definida negativa”, o también $-\gamma(h)$ es condicionalmente “positiva definida”. Es decir, que para todo conjunto X_1, \dots, X_n de puntos arbitrarios y para todo conjunto $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ de coeficientes que satisfacen que:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 0 \quad (2.13)$$

Se debe cumplir que:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(X_i, X_j) \leq 0 \quad (2.14)$$

c.- De la condición que $\gamma(h)$ es condicionalmente una función definida positiva se puede demostrar que el variograma necesariamente tiene un ritmo de crecimiento menor que h^2 cuando h tiende a infinito, lo cual indica un ritmo de crecimiento menor (Journel y Huijbregts, 1981) es decir:

$$\lim_{h \rightarrow \infty} \frac{\gamma(h)}{h^2} = 0 \quad (2.15)$$

Tipos de variogramas teóricos. Son usados generalmente para ajustar los variogramas experimentales. Entre los modelos teóricos de variogramas se tienen dos tipos; modelos con una meseta o de transición y modelos sin meseta.

Modelos con una meseta o de transición. Entre ellos se encuentran:

- Modelo de Efecto de Pepita Puro
- Modelo Esférico
- Modelo Exponencial
- Modelo Gaussiano
- Modelos Cúbicos.

Modelo de efecto de pepita puro. Es indicativo de un fenómeno sin ninguna autocorrelación espacial. Se emplea su combinación con otro modelo. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ S & \text{si } h > 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

donde:

$\gamma(h)$ = variograma teórico
 S = meseta
 h = distancia

Modelo esférico. Se caracteriza porque alcanza la meseta para una distancia finita ($h=a$); es indicativo de fenómenos continuos, o con un conjunto a lo sumo numerable de discontinuidades, aunque no derivables. Es decir, fenómenos cuya representación gráfica puede presentar quiebres; está expresado por la ecuación:

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{S}{2} \left[3\left(\frac{h}{a}\right) - \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] & \text{si } h \leq a \\ S & \text{si } h > a \end{cases} \quad (2.17)$$

a = alcance

Sus características son el alcance a , la meseta S , la pendiente en el origen es $1.5 \frac{S}{a}$ y la distancia integral λ viene dada por:

$$\lambda = \frac{1}{S} \int_0^a S \left[1 - \frac{3}{2} \left(\frac{h}{a}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] dh = \frac{5}{12} a \quad (2.18)$$

Modelo exponencial. Es representativo de fenómenos continuos, salvo en un conjunto de puntos (en una dimensión), líneas (en dos dimensiones) o planos (en tres dimensiones).

Su ecuación está expresada por:

$$\gamma(h) = S \left[1 - e^{-\frac{h}{a}} \right] \quad (2.19)$$

Alcanza su meseta de forma asintónica:

$$\text{Meseta} = \lim_{h \rightarrow \infty} S \left[1 - e^{-\frac{h}{a}} \right] = S \quad (2.20)$$

Alcance efectivo a será la distancia a la cual el variograma $\gamma(h) = 0.95S$, que es aproximadamente:

$$a' = 3a \quad (2.21)$$

La pendiente en el origen S/a , que es menor que la de un variograma esférico con el mismo alcance a , pero es mayor a la igualdad de alcance a' . Es decir, que la igualdad de alcance en el variograma exponencial crece y se aproxima a la meseta más rápidamente que el esférico (Miyashiro, 1996). La distancia integral es:

$$\lambda = \frac{1}{S} \int_0^{\infty} [S - \gamma(h)] dh = \frac{S}{S} \int_0^{\infty} e^{-h/a} dh = a \frac{a'}{3} \quad (2.22)$$

Modelo gaussiano. Representa muy bien fenómenos suaves, es decir, continuos y derivables en la mayoría de los puntos.

Su comportamiento inicial es de tipo parabólico con pendiente en el origen y es indicativo de una gran regularidad. Su expresión es:

$$\gamma(h) = S \left[1 - e \left(- \frac{h^2}{a^2} \right) \right] \quad (2.23)$$

Alcanza su meseta asintóticamente,

$$meseta = \lim_{h \rightarrow \infty} \gamma(h) = S \quad (2.24)$$

Este modelo gaussiano, no tiene alcance, para efectos prácticos se toma $a = \sqrt{3}a$ el variograma es igual a $0,95 S$. La distancia integral es:

$$\lambda = \frac{1}{S} \int_0^{\infty} [S - \gamma(h)] dh = \int_0^{\infty} e \left(- \frac{h^2}{a^2} \right) dh = \frac{a}{2} \sqrt{\pi} \quad (2.25)$$

El variograma gaussiano suele conducir a problemas numéricos, salvo cuando se usa con efecto pepita, por lo que su empleo en la práctica es poco habitual.

Modelos cúbicos. Su comportamiento en el origen es cuadrático por lo que es típico de fenómenos muy suaves, aunque no tanto como los componentes del modelo gaussiano del mismo alcance. Sus expresiones son:

$$\gamma(h) = \begin{cases} S \left(\frac{7h^2}{a^2} - \frac{35h^3}{4a^3} + \frac{7h^5}{2a^5} - \frac{3h^7}{4a^7} \right) & \text{Si } h < a \\ S & \text{Si } h \geq a \end{cases} \quad (2.26)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} S \left(\frac{2h}{a} - \frac{h^2}{a^2} \right) & \text{si } h < a \\ S & \text{si } h \geq a \end{cases} \quad (2.27)$$

La distancia integral es igual a $\frac{35}{96}a \cong 0,37a$

Modelos sin meseta. Dentro de este tipo se consiguen:

Modelos Monómicos

Modelos Logarítmicos

Modelos con Efecto Agujero

Modelos Monómicos. Se usan para representar fenómenos no estacionarios, estos no tienen meseta, ya que tiende al infinito cuando lo hace h . Su ecuación genérica es:

$$\gamma(h) = Kh^\theta \quad (2.28)$$

donde θ se acota estrictamente en el intervalo abierto (0,2) ya que si $\theta = 0$ se tiene un efecto de pepita puro y si $\theta \geq 2$ la función no es definida positiva y k es la pendiente en el origen.

Modelos logarítmicos. No están definidos en el origen ni tampoco tienen meseta, ya que el $\lim_{h \rightarrow \infty} \gamma(h) = \infty$.

Es de gran utilidad cuando el variograma experimental se comporta linealmente al usar una escala logarítmica para las distancias. Su ecuación es:

$$\gamma(h) = C_1 \log(h) \quad (2.29)$$

Modelos con efecto agujero. Es indicativo de fenómenos con componentes periódicas o cuasi – periódicas. Estas componentes son difíciles de estudiar por efecto krigeado. Si la periodicidad se conoce bien lo mejor es filtrarla por algún otro método. Si no existen datos suficientes para asegurar su existencia, se debe ignorar las ondulaciones del variograma experimental, ya que pueden ser debidas a otras causas. Los variogramas más comunes con efecto agujero son:

$$\gamma(h) = S \left(1 - \frac{\text{Sen}(h)}{h} \right) \tag{2.30}$$

Con comportamiento parabólico en el origen y negativo definido en tres dimensiones.

En la Figura 2.7 se muestran los diferentes tipos de variogramas teóricos más comunes.

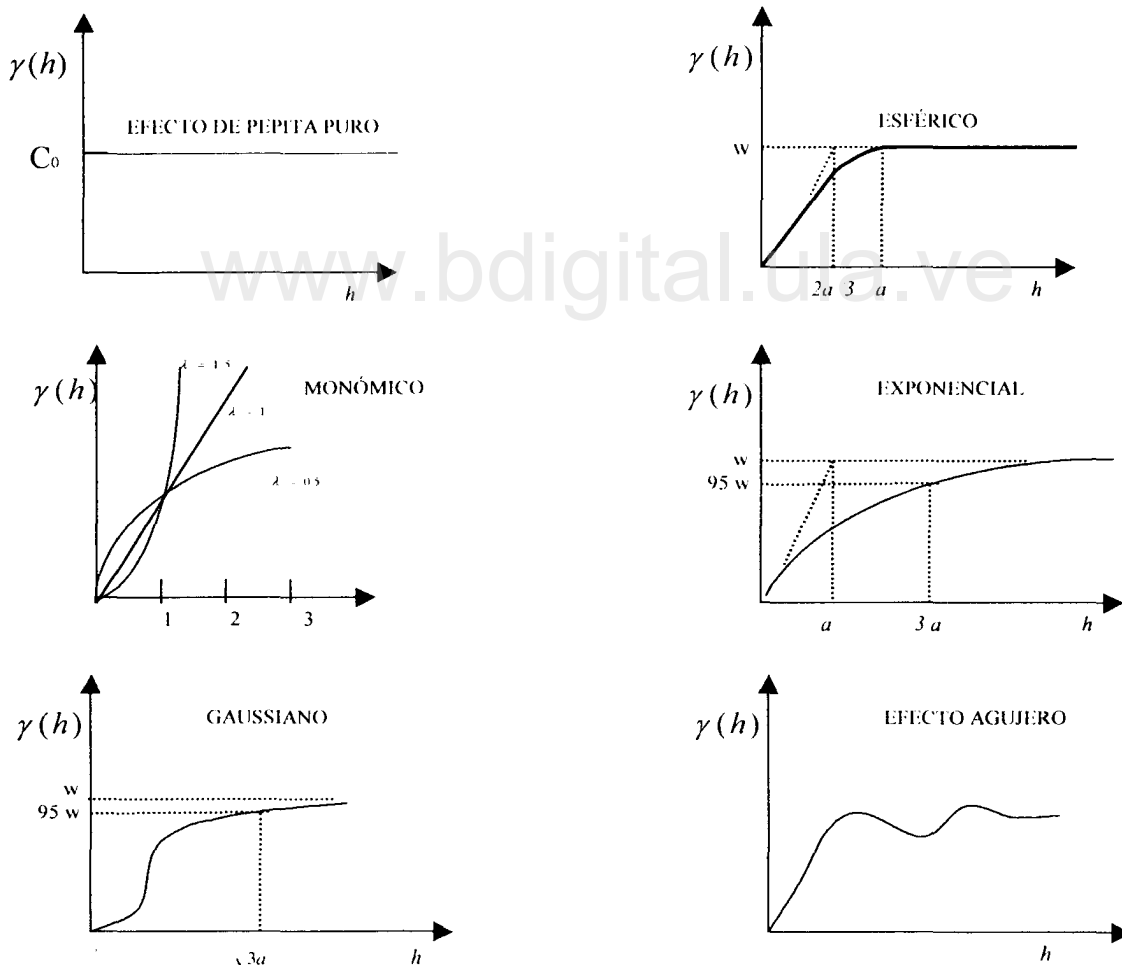


Figura 2.7. Variogramas teóricos más utilizados (tomado de Samper y Carrera, 1990)

2.2. KRIGEADO

El objetivo del krigeado es conseguir la mejor estimación o predicción lineal posible de una variable a partir de la información disponible, valores muestrales y relaciones de dependencia espacial, asignando como criterio para ello la falta de sesgo y la minimización de la varianza de la estimación.

Con el krigeado se obtendrá la estimación más precisa del valor en un punto cuando los datos siguen una distribución de probabilidad normal y además simultáneamente permite determinar la varianza de la estimación y con esto detectar un error sistemático.

2.2.1. Krigeado Ordinario

Este método tiene como objetivo obtener la estimación de $Z(x)$, a partir de los datos medidos Z_i en los puntos de observación X_i de la forma siguiente:

$$Z^* = \sum_i \lambda_i Z_i \quad (2.31)$$

Como no se conoce la media, se obliga a imponer un requisito adicional, el de sesgo nulo. Es decir,

$$E(Z^*) = E(Z) \quad (2.32)$$

Sustituyendo la Ecuación (2.31) en la Ecuación (2.32) se obtiene:

$$E\left(\sum_i \lambda_i Z_i\right) = E(Z) = m \quad (2.33)$$

o bien

$$\sum_i \lambda_i E(Z_i) = \sum_i \lambda_i m = m \quad (2.34)$$

Obteniéndose:

$$\sum_i \lambda_i = 1 \quad (2.35)$$

Condición necesaria para asegurar que el estimador es insesgado y la condición de optimalidad es nuevamente la de que la varianza de estimación sea mínima. Esta se derivó como:

$$E = [(Z^* - Z)^2] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j E(Z_i - Z_j) - 2 \sum_i \lambda_i E(Z_i Z) + E(Z^2) \quad (2.36)$$

donde:

$$\begin{aligned} E(Z_i Z_j) &= C(X_i - X_j) + m^2 \\ E(Z^2) &= C(0) + m^2 = VarZ + m^2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

Sustituyendo en la Ecuación (2.36) se llega a:

$$E[(Z^* - Z)^2] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(X_i - X_j) - 2 \sum_i \lambda_i C(X_i - X) + C(0) + m^2 (\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j - 2 \sum_i \lambda_i + 1) \quad (2.38)$$

El factor que multiplica a m^2 es precisamente igual a $\left(\sum \lambda_i - 1\right)^2$, que es nulo por la condición que expresa la Ecuación 2.35. Con ello, la Ecuación (2.38) se reduce a:

$$E[(Z^* - Z)^2] = \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(X_i - X_j) - 2 \sum_i \lambda_i C(X_i - X) + C(0) \quad (2.39)$$

Minimizando para satisfacer la Ecuación 2.32, empleando el método de los multiplicadores de Lagrange que consiste en minimizar el lagrangiano $L(\lambda_i, \mu)$:

$$L(\lambda_i, \mu) = \frac{1}{2} E[(Z^* - Z)^2] - \mu (\sum_i \lambda_i - 1) \quad (2.40)$$

Respecto a los coeficientes λ_i y al parámetro μ , denominado multiplicador de Lagrange. Para la minimización de la Ecuación 2.40 hay que igualar a cero las derivadas de $L(\lambda_i, \mu)$, Esto conduce a:

$$\begin{aligned} \sum_i \lambda_i C(X_i - X_j) - \mu &= C(X_i - X) & j = 1, \dots, n \\ \sum_i \lambda_i &= 1 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Sistema lineal de $n+1$ ecuaciones con $n+1$ incógnitas, que constituyen las ecuaciones de krigado. Este sistema es regular y la matriz de coeficientes es independiente de X . determinando los λ_i y μ , se obtiene el estimador Z^* y su varianza de estimación:

$$Z^* = \sum_i \lambda_i Z_i$$

$$Var(Z^* - Z) = Var(Z) - \sum_i \lambda_i C(X_i, -X) + \mu \quad (2.42)$$

Esta varianza es superior a la obtenida en el caso de media conocida. Esto es debido a la incertidumbre, sobre m , que implica una restricción adicional en la elección de los coeficientes de ponderación. El valor de la media m , se tiene que determinar para poder estimar la función de covarianza. Esto puede evitarse trabajando con el variograma en vez de la covarianza.

2.3. LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa es un superconjunto de la lógica convencional que se ha extendido para manejar el concepto de verdad parcial o valor verdadero entre “completamente verdadero” y “completamente falso”. Fue introducido por el Dr. Lotfi Zadeh de la universidad de Berkeley en California en los sesenta, como un medio para modelar la incertidumbre del idioma natural.

Zadeh dice que en vez de referirse a la teoría difusa como una sola teoría, se debe referir al proceso de “difusión” como una metodología para generalizar cualquier teoría específica de una forma exacta o discreta a una continua o difusa. (Freissinet, 1997).

2.3.1. Los subconjuntos difusos

La teoría de los subconjuntos difusos es una teoría matemática cuyo objetivo original es formalizar las nociones vagas del pensamiento y del idioma humano para paliar la inadecuación de la teoría clásica de conjuntos en este dominio.

Zadeh, quien trabajó hasta entonces en la teoría de los sistemas sometidos a límites estrictos, buscando tomar en cuenta los límites flexibles para los cuales las violaciones débiles son aceptables, los cambios de clase sin discontinuidad abrupta, los atributos y las cantidades vagas, introduce la teoría de los subconjuntos difusos a partir de la idea de pertenencia parcial de clases a los límites mal definidos. Así un elemento de un subconjunto difuso puede pertenecer más o menos fuertemente a una clase. (Freissinet, 1997).

Sea un conjunto de referencia U , la definición de un subconjunto difuso A de U para una función de pertenencia que asocia a cada elemento x de U , donde la función $f_a(x)$ está comprendida entre 0 y 1; y representa el grado con el cual x pertenece a A , es:

$$A = \{(x, f_a(x)); x \in U, f_a(x) \in [0,1]\} \quad (2.43)$$

A todo elemento x de U , la función de pertenencia puede tomar un valor cualquiera comprendido entre 0 y 1, si este intervalo $[0,1]$ es reemplazado por el conjunto compuesto por los dos elementos $\{0,1\}$, entonces A se vuelve un conjunto clásico.

En el caso de un subconjunto difuso A , se distinguen tres casos para la función de pertenencia:

- $f_a(x) = 0$ si x no pertenece al conjunto difuso A .
- $f_a(x) = 1$ si x pertenece al subconjunto difuso A
- $f_a(x)$ diferente de 0 y de 1, si x pertenece parcialmente al subconjunto difuso A .

- **Características de un subconjunto difuso**

Para describir un subconjunto difuso se usa la terminología siguiente:

1. Apoyo: El apoyo de un conjunto difuso A , corresponde al conjunto de los elementos de U que pertenecen al menos un poco a A .

$$Apoyo(A) = \{x \in U / f_a(x) \neq 0\} \quad (2.44)$$

2. Altura: La altura de un conjunto difuso A es el valor máximo de una función de pertenencia:

$$h(a) = \text{Sup}_{x \in U} f_a(x) \quad (2.45)$$

En el caso donde la función de pertenencia se normaliza, existe al menos un elemento x de U , para el cual cada elemento tiene un grado de pertenencia igual a 1, por consiguiente $h(a)=1$.

3. Centro: El centro del subconjunto difuso A corresponde a un subconjunto clásico de U , para el cual cada elemento tiene un grado de pertenencia igual a 1.

$$Centro(A) = \{x \in U / f_a(x) = 1\} \quad (2.46)$$

4. Cardinal: El cardinal de un subconjunto difuso A con apoyo finito, corresponde a la suma de los grados de pertenencia de los elementos de ese apoyo. Se define por:

$$Card(A) = \sum_{x \in U} f_A(x) \quad (2.47)$$

5. Corte de Nivel α : Un corte de nivel α de un subconjunto difuso A para unos datos de valores de α comprendidos en el intervalo $[0,1]$, corresponde al subconjunto clásico A_α de U definido por:

$$A_\alpha = \{x; f_A(x) \geq \alpha\} \quad (2.48)$$

Un corte de nivel α define un umbral α satisfactorio de carácter difuso a partir de un subconjunto difuso A .

Operaciones con subconjuntos difusos. Los subconjuntos difusos A_i describen clases con límites imprecisos. Se necesita entonces tener operadores para describir los puntos comunes a los diferentes subconjuntos (Kaufmann, 1973). Los subconjuntos difusos son una generalización de los subconjuntos clásicos, las operaciones con los subconjuntos difusos son en general las extensiones de las operaciones con los subconjuntos clásicos: igualdad, inclusión, intersección, unión, complemento.

- a) Igualdad, Inclusión. Sean dos subconjuntos difusos A_1 y A_2 en el universo U . A_1 y A_2 son iguales si su función de pertenencia tiene el mismo valor en todo punto x de U .

$$\forall x \in U \quad f_{A_1}(x) = f_{A_2}(x) \quad (2.49)$$

Un subconjunto difuso A_1 está incluido en un subconjunto difuso A_2 si:

$$\forall x \in U \quad f_{A_1}(x) \leq f_{A_2}(x) \quad (2.50)$$

- b) Intersección, unión. Existen numerosas posibilidades para definir las operaciones de intersección y de unión. Según Zadeh, 1965, citado por Freissinet (1997):

La función de pertenencia $f_B(x)$, Figura 2.8, de la intersección $B = A_1 \cap A_2$ de dos subconjuntos difusos A_1 y A_2 está definida por:

$$f_B(x) = \min(f_{A_1}(x), f_{A_2}(x)) \quad (2.51)$$

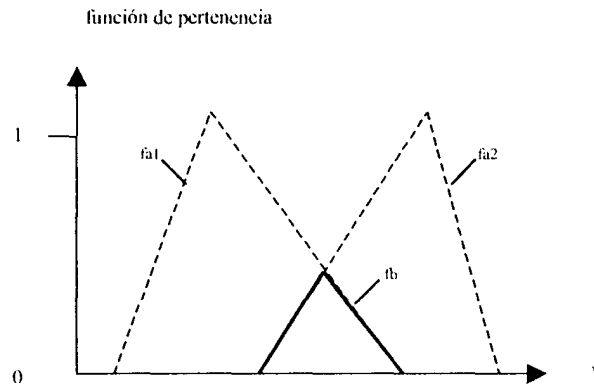


Figura 2.8. Intersección de dos subconjuntos difusos.

Esta intersección difusa significa que un elemento x de U pertenece a la vez a los dos subconjuntos difusos A_1 y A_2 , y que su grado de pertenencia no puede ser superior de A_1 y de A_2 .

La función de pertenencia $f_c(x)$, Figura 2.9 de la unión $C = A_1 \cup A_2$ de dos subconjuntos difusos A_1 y A_2 es definida por:

$$f_c(x) = \max(f_{a_1}(x), f_{a_2}(x)) \tag{2.52}$$

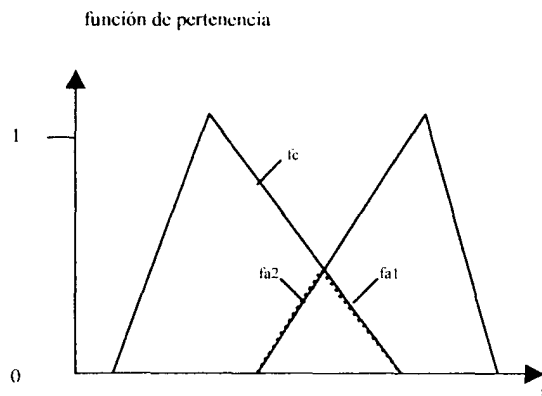


Figura 2.9. Unión de dos subconjuntos difusos

Esta unión representa el grado más grande de pertenencia entre los dos subconjuntos difusos A_1 y A_2 .

c) Complemento. El complemento de un subconjunto difuso A es el subconjunto difuso A^c donde la función de pertenencia está descrita por:

$$f_{A^c}(x) = 1 - f_A(x) \quad (2.53)$$

Contrariamente a los subconjuntos clásicos, los subconjuntos difusos generalmente verifican:

$A^c \cap A \neq \phi$ donde ϕ es el conjunto vacío, y $A^c \cup A \neq U$ las otras propiedades restantes de el complemento de los subconjuntos clásicos se satisfacen.

- *Comparación entre Grado de Pertenencia y probabilidad.* El grado de pertenencia y la probabilidad representan los dos toda una medida de imprecisión, cuantificada para cada número real tomado de el intervalo cerrado $[0,1]$, de donde se observa a menudo confusión. Pero al recalcar, estas dos nociones, son de naturaleza totalmente diferentes. Un grado de pertenencia constituye una medida de imprecisión con relación a una noción imprecisa tal como “grande”, “rápido”, “bonito”, en diversos grados. En cambio una probabilidad está asociada a la noción de ocurrencia de un evento; se está en la espera de ver realizarse este evento, la posibilidad de realización de este evento generalmente depende del valor preciso atribuido a la probabilidad. Pero no se puede hablar de probabilidad de estar “grande”, o lo es o no lo es; “grande” es una noción imprecisa, no se puede definir con un grado de pertenencia la categoría “grande” ya que esto puede variar según el juicio de la persona. Así un francés que observa a un hombre que mide 1.75m lo juzgará “grande” con un grado de pertenencia de 0.8, en cambio un holandés, sabiendo que el holandés es en promedio más grande que los franceses, juzgará a este hombre “grande” con un grado de pertenencia de 0.3. (Freissinet, 1997).

2.3.2. Las Cantidades Difusas. Definición

Un valor impreciso originado de un resultado de una simulación, son cantidades modeladas por los subconjuntos difusos y se les llaman cantidades difusas. Una cantidad difusa se supone normalizada, esto es para decir que su centro no es vacío y que su altura es igual a 1.

- **Intervalo Difuso**

Un intervalo difuso es una cantidad difusa convexa. Corresponde a un intervalo de un conjunto de los números reales de quien los límites son imprecisos. Cuando la función de pertenencia es semi-continua, todos los cortes de nivel α son los intervalos formados por todos los $\alpha \in [0,1]$. La Figura 2.10 presenta esquemáticamente un intervalo difuso con sus características. (Freissinet, 1997).

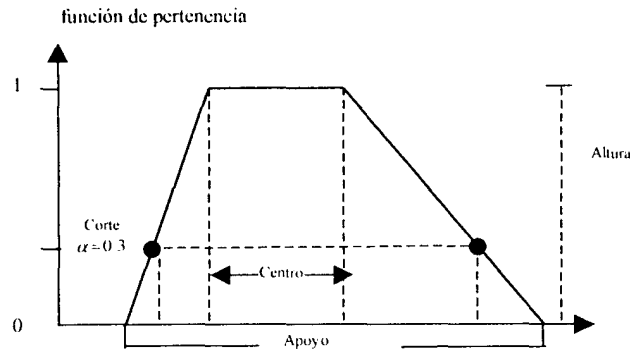


Figura 2.10. Intervalo difuso y sus características.

Número difuso. Un número difuso es un intervalo difuso de función de pertenencia excepcionalmente semi-continua y de apoyo compacto, es decir cerrado y limitado, admitiendo un único valor modal de A ; sea m un elemento de U , $f_a(x) = 1$. El representa un número real conocido de manera imprecisa (Dubois y Prado, 1978, citado por Freissinet (1997)).

La forma de la función de pertenencia de un número difuso refleja la creencia que lleva puesto el valor exacto que se estimó. Las formas de función de pertenencia más usadas son el triángulo, Figura 2.11, el semifallo, Figura 2.12 y la curva "L-R", Figura 2.13; donde las posiciones lineales del triángulo son reemplazadas por las funciones creciente y luego decreciente.

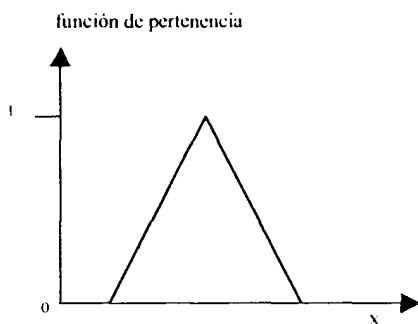


Figura 2.11. Triángulo

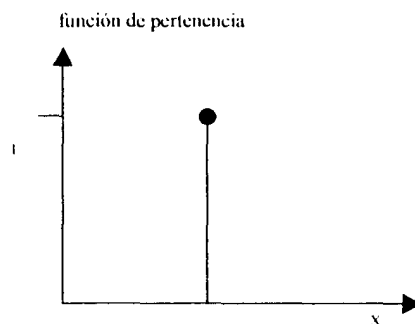


Figura 2.12. Semifallo

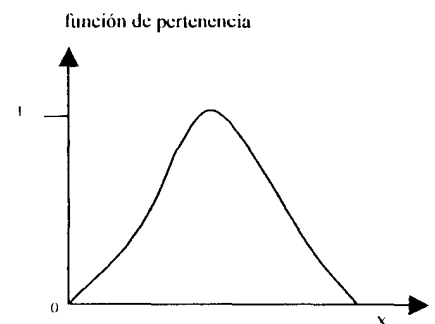


Figura 2.13 Forma L-R

2.3.3. Razonamiento en Lógica Difusa

La lógica clásica caracterizada por sus dos valores de verdad “verdadero” y “falso” y sus reglas de inferencia, es inapropiada para tratar los conocimientos vagos e imprecisos. La lógica multivalente generaliza la lógica binaria clásica aumentando el número de valores de verdad, los cuales son un número preciso pertenecientes al intervalo $[0,1]$, pero los conocimientos cuyos límites son mal definidos no pueden ser tratados por esta lógica (Tong- Tong, 1995, citado por Freissinet (1997)).

Se propone entonces utilizar la lógica difusa, llamada igualmente lógica lingüística, donde los valores de verdad no son más valores del intervalo $[0,1]$, sino las palabras o las expresiones del lenguaje humano: verdadero, falso, muy verdadero, más bien falso, casi verdadero... Los valores de verdad de la lógica lingüística manipulan las nociones vagas modeladas por un subconjunto difuso en el universo $[0,1]$.

La mayor parte de los objetivos de base utilizados por la lógica difusa son de naturaleza vaga, como por ejemplo, los valores de verdades difusas: verdadero, falso, más o menos falso, casi verdadero, etc., las cantidades difusas: mucho, poco, al menos un poco, casi todos, algunos, etc., los predicados difusos: grande, pequeño, joven, bello, rico, inteligente, etc., y las modificaciones difusas: muy, más bien, más o menos, etc.; estos objetivos de la lógica difusa son asociados a una función de pertinencia y al subconjunto difuso que los modela.

- **Variable lingüística.**

El lenguaje natural empleando los términos vagos para definir las situaciones observadas, representan las variables simbólicas para definir los conocimientos imprecisos con una variable cuyo valor tomado es desconocido. Esta variable simbólica es llamada igualmente una variable lingüística (Zadeh, 1975, citado por Freissinet (1997)).

Una variable lingüística esta definida por un triplete, V, U, E_v donde V designa el nombre de la variable, U representa el universo de V y E_v el conjunto finito o no de los valores lingüísticos de la variable V .

Proposiciones difusas. Una proposición difusa está constituida por uno o varios predicados difusos según sea la proposición simple o compuesta (Tong – Tong, 1995, citado por Freissinet (1997)).

Proposición difusa simple. Una proposición difusa simple utiliza una variable lingüística V, U, E_v , y es de la forma “ V es a A ”, donde A es un elemento de E_v .

Proposición difusa compuesta. Una proposición difusa compuesta es obtenida por la utilización de algunas proposiciones difusas simples relacionadas entre ellas por un conector. Los conectores más simples se experimentan por la conjunción de proposiciones difusas simples “ V_1 es a A y V_2 es a A_2 ” y por la disyunción de proposiciones difusas elementales “ V_1 es a A o V_2 es a A_2 ”. Igualmente se puede conectar dos proposiciones difusas simples con una implicación difusa compuesta “si V es a A entonces R es a B ”. la implicación difusa está definida más adelante.

- *Razonamiento aproximado.* El razonamiento aproximado permite la utilización de variables lingüísticas, de proposiciones difusas y de implicaciones difusas, la representación de los conocimientos vagos imprecisos, para modelar el razonamiento humano.

Implicaciones Difusas. En lógica clásica, una implicación es definida por una relación entre dos proposiciones precisas p y q , cuya notación es $p \geq q$, p implica q , que se verifica en todos los casos excepto para p verdadero y q falso. En lógica difusa, tal implicación es de la forma “si x es a A entonces y es a B ” y puede igualmente ser de notación “ (x, y) es $A \geq B$ ” donde (x, y) designa una variable lingüística bidimensional y $A \geq B$ un conjunto difuso.

La función de pertenencia de $A \geq B$, de notación $f_{A \geq B}(x, y)$, depende de las funciones de pertenencia $f_a(x)$ y $f_b(x)$, según una relación característica del tipo de implicación considerada. (Freissinet, 1997).

2.3.4. Krigeado con Variogramas imprecisos

Es una metodología para la utilización de la información imprecisa sobre parámetros del variograma en predicciones geoestadísticas. Normalmente en geoestadística aplicada, solo una cantidad pequeña de datos especiales medidos son aprovechables, y así surgen las dificultades en la estimación del variograma.

La formulación probabilística de los procesos espaciales es una aproximación al problema de la estimación de la realización única de un fenómeno. No se puede hablar de un “verdadero” variograma, sino de un “exhaustivo” variograma, con un exhaustivo muestreo del área considerada (Journel, 1985). Incluso en el caso de grandes conjuntos de datos, el variograma experimental no puede ajustarse fácilmente con un modelo teórico. Se muestra el caso del

variograma experimental de una simulación espacial Figura 2.14, donde el ajuste es relativamente simple y un ajuste más difícil o incierto, Figura 2.15.

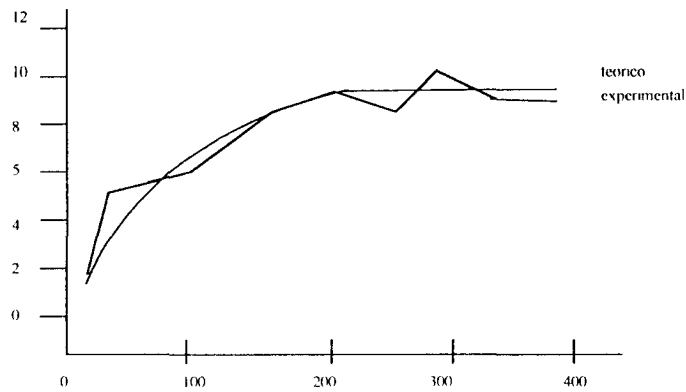


Figura 2.14. Variograma experimental con un “fácil” ajuste.

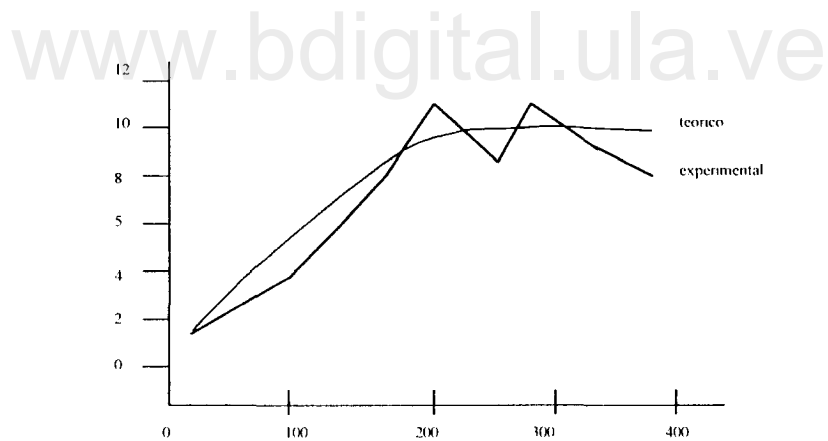


Figura 2.15. Variograma experimental con un “difícil” ajuste.

Los variogramas experimentales reflejan los datos disponibles, sin embargo el modelo ajustado debe ser representativo de la población entera. Cuando el variograma modelo juega un papel crítico en el cálculo de la fiabilidad de una estimación, el ajuste de la incertidumbre no debe descuidarse para determinar esa fiabilidad. La pérdida de la “incertidumbre” en los

parámetros del variograma puede producir riesgos de sobreestimación y una falsa confianza en los resultados. (Bardossy, Bogardi y Kelly, 1990).

- **Parámetros de variogramas difusos**

La elección del tipo de variograma esférico, exponencial o gaussiano y de los parámetros, efecto pepita, meseta y rango puede influir fuertemente en los resultados del krigado (Bardossy, 1988). Sin embargo la cantidad limitada de datos y/o la distribución no simétrica del parámetro bajo estudio hace difícil una definición firme del variograma. Por otro lado, el problema general del conjunto pequeño de datos ha recibido relativamente poca atención.

Armstrong (1984) no se planteó la necesidad de métodos más sofisticados para variogramas firmes, exigiendo que “el sentido común y técnicas de limpieza para datos ordinarios” ayudarían, en la mayoría de los casos, a la estimación de un variograma razonable. La propuesta de usar la teoría del conjunto difuso es aplicar un modelo con “sentido común” y un “variograma razonable”.

La imprecisión en la estimación de un variograma está relacionada a dos causas:

- La incertidumbre al escoger un modelo analítico particular.
- Dado un modelo analítico, la incertidumbre alrededor de los parámetros correspondientes al variograma.

Dado un modelo analítico, los parámetros del variograma p_1, \dots, p_k no pueden evaluarse como números exactos. Esto puede ser debido al comportamiento del variograma experimental, difícil ajuste, y a la pequeña cantidad de datos disponibles para calcular el variograma experimental.

El variograma teórico seleccionado depende de sus parámetros y del vector separación h :

$$\gamma(h) = \gamma(p_1, \dots, p_k, h) \quad (2.54)$$

Se supone que el conjunto de posibles parámetros del variograma es un conjunto difuso P en R^k . Cada parámetro del vector p_1, \dots, p_k es asignado como un valor perteneciente a P mostrando como aceptable el vector parámetro. Para un variograma experimental con modelos de difícil ajuste, Figura 2.15, los diferentes valores que pertenecen a él corresponden a parámetros imprecisos.

La función de pertenencia P puede ser construida evaluando funciones de pertenencia para cada parámetro p_i y después combinarlos. Esta aproximación ignora posibles dependencias

entre parámetros individuales. Otra aproximación consiste en la construcción de la función de pertenencia usando dependencias funcionales entre parámetros, y después combinar las pertenencias correspondientes a esa expresión funcional.

La función de pertenencia del conjunto difuso P es construida con la ayuda de las expresiones hechas con los parámetros del variograma. Estas expresiones pueden describir parámetros individuales como el rango o parámetros más dependientes como la constante pepita relativa. Suposiciones adicionales también pueden ser incorporadas, como una dependencia entre la pepita constante y el variograma modelo. Esto en formulación difusa, dependencia e independencia, no tiene significado probabilístico; se muestra dependencia con la ayuda de las expresiones, que se usan para construir la función de pertenencia P . La incertidumbre que corresponde a las expresiones individuales puede ser evaluada contestando: ¿Cuál es el valor más probable? ¿Entre cuáles límites está el valor conocido con certeza? La respuesta a la primera pregunta da un valor con una pertenencia de 1; la segunda respuesta da puntos del extremo del intervalo con valores no negativos de pertenencia. Usualmente una interpolación lineal entre estos puntos da valores útiles de pertenencia para puntos intermedios. (Bardossy, Bogardi y Kelly, 1990).

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO 3

METODOLOGÍA APLICADA EN EL ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

3.1. INFORMACIÓN BÁSICA RELACIONADA CON EL ÁREA EN ESTUDIO.

3.1.1. Ubicación

La planicie aluvial del río Motatán, se encuentra ubicada en la zona baja del estado Trujillo, aproximadamente entre las coordenadas 9° y 10° de latitud Norte y 70° y 71° de longitud Oeste. La Figura 3.1 muestra la ubicación geográfica de la planicie.

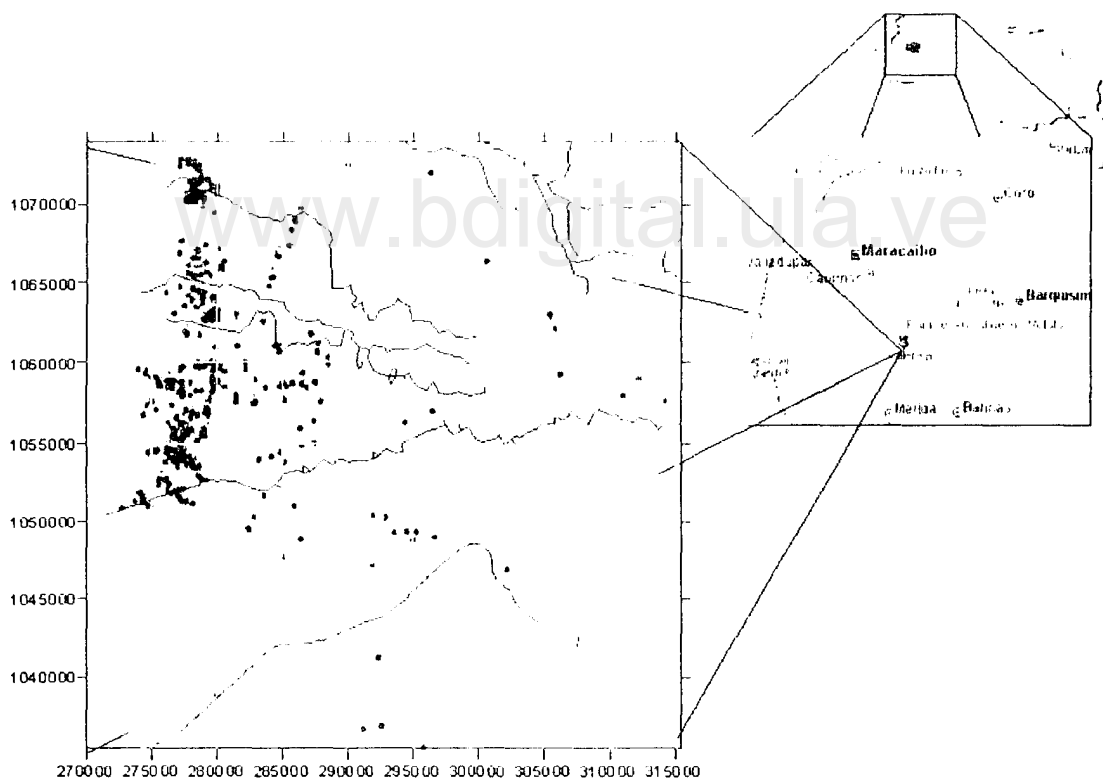


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la planicie del Motatán.

El área en estudio se delimitó entre las coordenadas Norte 1045000 y 1075000, Este 272000 y 310000.

3.1.2. Geología y Geomorfología

La planicie aluvial del río Motatán consiste en su totalidad en sedimentos del cuaternario. En estos aluviones recientes se evidencia el aporte que han tenido en el proceso de sedimentación y formación de los suelos de las formaciones geológicas de la cuenca alta del río Motatán. Esta cuenca está integrada por algunas formaciones del triásico y jurásico incluyendo formaciones del Paleozoico, pero predominan formaciones terciarias en su mayoría pertenecientes al Eoceno medio y superior y el Plioceno.

Desde el punto de vista geomorfológico la planicie del río Motatán es producto de un sistema deposicional de desborde caracterizado por una sedimentación muy homogénea en cuanto a granulometría y en forma de estratos horizontales espesos.

La zona cuenta con dos unidades estratigráficas principales que conforman los suelos. Desde el punto de vista hidrogeológico dichas formaciones presentan buenas características acuíferas.

1. Formación Betijoque – Terciario (Mioceno – Plioceno). Está compuesta de lechos macizos, de conglomerados gruesos, areniscas y arcillas. Las capas de conglomerados mal cementadas llegan a tener de 12 a 15 metros de espesor. Las areniscas están mal consolidadas.
2. Cuaternario Reciente Aluvión. Esta unidad estratigráfica la constituyen los aluviones recientes formados por gravas, arenas y limos que rellenan los valles de las quebradas y áreas influenciadas por los procesos de sedimentación del río Motatán. (Rodríguez, 1986).

3.1.3. Climatología

El clima predominante en la zona, según la clasificación bioclimática de las zonas de vida de Venezuela (Ewel y Madrid, 1968) puede ubicarse perfectamente dentro de la formación Bosque Seco Tropical (b-st). El clima es heterogéneo con precipitaciones promedio anuales que varían entre los 960 y 1100 mm.

La temperatura media oscila entre 26.5 y 29.7 °C las temperaturas máximas medias entre 29.5 y 37.9 °C y las mínimas medias entre 21.1 y 25.6 °C (MARNR, 1992).

Esta zona presenta una tasa de evaporación promedio de 1700mm anuales. (MARNR, 1992)

3.1.4. Topografía

Las características topográficas definen la zona como llanuras con terrenos de pendientes suaves que varían entre 0.5% y 1%.

3.1.5. Hidrografía

La zona presenta una gran cantidad de caños y cañadas, así como algunos ríos de cierta magnitud. Todos ellos se originan en las estribaciones de la cordillera andina, presentando características de altas pendientes en sus orígenes y desarrollo inicial y muy bajas pendientes en su tramo final de descarga al lago de Maracaibo, esto último hace que exista mucha deposición de sedimentos por la disminución de la velocidad del agua lo cual causa los típicos meandros en las planicies cercanas a un cuerpo de agua. La gran mayoría de caños y cañadas son de carácter intermitente, es decir, sólo llevan agua en las épocas de lluvias, por lo que su importancia desde el punto de vista ambiental es relativa.

En el área específica de estudio se encuentra el río Motatán siendo éste el único curso importante con régimen permanente, el cual drena una cuenca de 5000 Km² con un volumen escurrido anual de 1200 millones de m³, es decir un caudal medio anual de $38,05 \frac{m^3}{s}$, producto de una precipitación media anual de 900 mm y también paralelo a éste se encuentra el río carrillo, el cual es de régimen no permanente.

3.2. RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN BÁSICA EXISTENTE

La información básica utilizada para el desarrollo del presente trabajo de investigación fue facilitada por la empresa regional Sistema Hidráulico Trujillano. La misma contiene el inventario de pozos realizado por la empresa en los años 1993-1994, el cual es de un total de 1296 pozos; pruebas de bombeo de 3 pozos realizadas por el SHT y 5 pruebas hechas por Corpoandes y procesadas por Rodríguez (1986); niveles piezométricos correspondientes a 103 pozos con registros históricos desde julio de 1993 hasta julio de 1999; perfil litológico de 316 pozos construidos y datos de construcción de 435 pozos, abatimientos de 186 pozos y cota de terreno correspondientes a 142 pozos.

Es de destacar que la información cartográfica disponible en cartografía nacional existe a una escala de 1: 25000 con curvas de nivel a equidistancia de 20 m, la cual no es conveniente utilizar ya que la planicie tiene una pendiente promedio muy baja $\leq 2\%$.

3.2.1. Variables utilizadas

- ***Identificación de pozos***

El SHT para la identificación de cada pozo utilizó un código compuesto de diez dígitos en el que los dos primeros representan el estado donde se encuentran ubicados (TR = Trujillo, ZU = Zulia); los cuatro siguientes son números arábigos que identifican a la sección extensa; la planicie fue dividida en once secciones extensas de aproximadamente 300km² de superficie; luego tres números arábigos que representan el número de pozo dentro de la sección extensa y el último dígito es una letra que representa la condición de funcionamiento del pozo; por ejemplo:

TR5878004A: Corresponde a un pozo ubicado en el estado Trujillo dentro de la sección extensa 5878, identificado con el número cuatro y en funcionamiento para el momento del inventario.

- ***Coordenadas UTM***

La ubicación aportada de cada pozo estaba en coordenadas geográficas. Los diferentes programas a utilizarse en lo sucesivo requieren de coordenadas cartesianas, norte – este, las mismas fueron transformadas utilizando el programa TCORD7, tomado del banco de programas del CIDIAT.

- ***Cota de terreno***

Motivado a que la topografía disponible en cartografía nacional no es la más acorde al caso, curvas de nivel cada 20 m, y ante la dificultad de campo por lo extenso del área en estudio y la poca precisión del GPS en la estimación de las cotas de terreno donde se ubican los pozos, se hizo necesaria la búsqueda de otra alternativa para generar las mismas de aquellos pozos que no la poseían, la mayoría de los pozos ubicados en la planicie.

La unidad de sistema de información geográfica (sig) adscrita al SHT, proporcionó archivo de puntos con coordenadas y cotas para realizar un plano digital de la planicie, generando curvas de nivel cada 5 m. A su vez también se digitalizó parte del borde sureste del Lago de Maracaibo, la carretera panamericana, el río Pocó, que constituyen los límites este, oeste y sur del área en estudio; así como las principales vías internas y los drenajes naturales más importantes de la zona.

Dicho plano se usó en el paquete Surfer 7.0 para generar las cotas de terreno con mayor confiabilidad, partiendo de un archivo de datos ASCII que contenía las variables identificación y coordenadas UTM de cada pozo, determinando las cotas a partir del criterio residual, parte del menú Map del mencionado paquete.

- **Nivel piezométrico**

El SHT a mediados del año 1993, instala una red de observación con el objeto de llevar un control mensual de la variación de los niveles de agua en el acuífero, la misma se estabilizó a finales del año 1994, tomando registros hasta julio de 1999; a estos pozos se le calculó el nivel piezométrico de la siguiente manera:

$$NP = CT - H \quad (3.1)$$

Donde:

NP : nivel piezométrico

CT : cota de terreno

H : distancia vertical medida desde la superficie del terreno hasta el nivel del agua.

- **Abatimiento**

Este parámetro que representa la distancia vertical existente entre el nivel estático y el dinámico debe calcularse motivado a que en la planicie no existe suficiente cantidad de pruebas de bombeo que permitan obtener la transmisividad del acuífero. El mismo servirá para la obtención de la capacidad específica en los pozos, que distribuidos uniformemente en la planicie, posean los datos de caudal de aforo y posición del nivel de bombeo.

Se calculó solo para los pozos, en los cuales el SHT realizó un aforo durante la fase de inventario y a través de sondas se tomó registro de profundidad de los niveles estático y dinámico, respectivamente. Para su obtención se empleó la siguiente ecuación:

$$s : H_{NE} - H_{ND} \quad (3.2)$$

Donde:

s : abatimiento o depresión en metros

H_{NE} : distancia vertical desde la superficie del terreno al nivel estático en metros.

H_{ND} : distancia vertical desde la superficie del terreno al nivel dinámico en metros.

- **Capacidad Específica**

Esta se obtuvo a través del cociente, caudal extraído cuando se hizo el aforo durante la fase de inventario entre el abatimiento, para aquellos pozos que poseían o se había generado dicha información requerida. La expresión es la siguiente:

$$CE : Q / s \quad (3.3)$$

Donde:

CE: capacidad específica

Q: caudal extraído

s: abatimiento

- **Transmisividad**

La unidad de hidrología del SIIT realizó pruebas de bombeo en tres pozos identificados como: TR5878004A, TR5879001A y TR5879023A, para el primero se midieron los abatimientos directamente en el pozo de bombeo; para el segundo en dos pozos de observación ubicados a 42.2 y 281.4 m del pozo bombeado; mientras que para el tercero en tres pozos de observación, ubicados a 60, 118.4 y 157.2 m del bombeado. Estas pruebas de bombeo se procesaron en el paquete GWB para obtener los valores de transmisividad, los cuales se promediaron para el segundo y tercer pozo respectivamente.

Por otro lado, se tomaron cinco valores de dicho parámetro que generó Rodríguez (1986), procesando pruebas de bombeo realizadas por CORPOANDES en un sector de explotación agrícola de la planicie. Estos, fueron confirmados a través del uso de GWB. Los valores usados aparecen en la Tabla 3.1. Con estos y los valores de capacidad específica calculados por la Ecuación (3.3), se procedió a realizar un análisis de regresión, cuyos resultados para diferentes tipos de regresión se presentan a continuación: en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Valores de prueba de bombeo, transmisividad y capacidad específica.

Identificación del pozo	Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /d)	Capacidad Específica (l/s.m)
3 Febrero 1*	40	565,17	3,9389
3 Febrero 2*	44	367,81	3,5953
Adjunta 4*	38	345,02	2,6220
Punta Maya 1*	72	448,71	3,5068
Punta Maya 2*	77	424,62	3,7321
TR5878004A	114,5	1974,07	10,6215
TR5879001A	30	731,87	5,5147
TR5879023A	37,9	777,93	2,8340
* Valores tomados de Rodríguez (1986)			

Tabla 3.2. Análisis de regresión para el caso en estudio

Regresión	Ecuación	R ²
Lineal	$Y = 163.62X$	0.8539
Potencial	$Y = 129.65X^{1.0769}$	0.704
Logarítmica	$Y = 1060.8 \ln(x) - 793.66$	0.7686
Exponencial	$Y = 247.58e^{0.1923x}$	0.7711

Donde: Y : Transmisividad; X : Capacidad Específica; R^2 : Coeficiente de correlación.

El modelo que presentó la mayor correlación es el lineal, con una confiabilidad del 85,39%, ver Figura 3.2. El mismo se usó para generar la transmisividad en aquellos pozos cuya capacidad era conocida.

Generados los valores, para obtener el archivo definitivo, se hizo el descarte partiendo del siguiente criterio: valores $> 3000 \text{ m}^2/\text{d}$ y $< 30 \text{ m}^2/\text{d}$ dejan de ser confiables, debido al tipo de material que compone el acuífero, por tanto se descartan. Se presentan en el Anexo I, Tabla I.1, los valores generados de transmisividad.

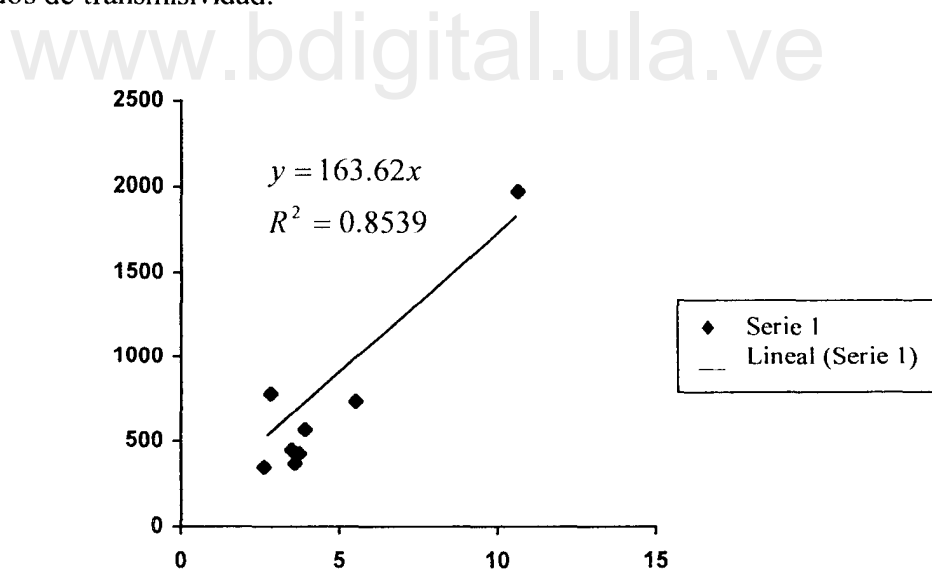


Figura 3.2. Regresión Lineal para generar transmisividad

- **Litología**

Según los registros litológicos suministrados por el SHT, 348 pozos poseían información sobre su perfil. Como primer criterio de descarte se usó la similitud del perfil, como era de esperarse pozos cercanos debían poseer perfiles similares, entonces se optó por tomar aquel que fuese más representativo, tomando en cuenta básicamente la profundidad de perforación.

Luego quince pozos más fueron descartados por diversas causas, entre ellas: muy cercano a un perfil similar, no existe correlación en las capas con ninguno de los pozos a su alrededor, profundidad de perforación pequeña. Es decir, en definitiva, del universo de pozos con información litológica, ochenta y cinco pozos muestran consistencia en la conformación de capas del acuífero.

Al observar la correlación definitiva de las capas se encontró que la profundidad más representativa era de 110 m; para dicha profundidad quedaba perfectamente definido un acuífero confinado estratificado en diez capas, alternándose entre impermeables y permeables con espesores variables.

En vista de lo complicado y extenso que resulta la evaluación del parámetro transmisividad para un acuífero de una sola capa aún más en este caso que se encontraron cinco capas permeables, entonces se tomó la decisión de trabajar con una idealización del acuífero confinado cuyo fondo de la capa permeable es de 110 m y el espesor de arcilla que define el confinamiento es el de la primera capa impermeable, tomada de la correlación de espesores.

- **Coeficiente de almacenamiento**

De las pruebas de bombeo realizadas por la unidad de hidrología del SHT, en los pozos mencionados anteriormente y procesadas en el paquete GWW se obtuvieron los valores promedio de dicho parámetro, se usaron también los valores generados por Rodríguez en 1986 cuando procesó pruebas de bombeo realizadas por Corpoandes. En vista de que solo se contaban con ocho valores del parámetro muy localizados en un área muy pequeña, que no era representativa del área de estudio, se utilizó la información de litología que sí era numerosa para calcular este parámetro a través de la ecuación propuesta por Boonstra y Ridder, la cual se presenta a continuación:

$$S = 1.8 \times 10^{-6} (d_1 - d_2) + 8.6 \times 10^{-4} (d_1^{0.3} - d_2^{0.3}) \quad (3.4)$$

Donde:

S = coeficiente de almacenamiento (adimensional)

d_1 = distancia desde la superficie del terreno hasta el fondo de la capa permeable en metros.

d_2 = distancia desde la superficie del terreno hasta la parte superior de la capa permeable en metros.

Para los efectos del presente estudio d_1 equivale a 110 m, ya que se consideró una sola capa permeable cuyo fondo era plano y d_2 representa el espesor de la primera capa de arcilla tomado de los registros de litología aportados por SHT para cada pozo.

- ***Caudal de Bombeo***

Los volúmenes de agua por unidad de tiempo que el pozo está descargando por bombeo se obtuvieron de los registros de la base de datos del SIIT, los cuales fueron producto de aforos puntuales realizados en el momento en que se hizo el inventario de pozos de agua subterránea en la planicie en 1994 usando los métodos volumétricos y el de la trayectoria según sea el caso. Además se tomaron los tres valores usados en la prueba de bombeo y los cinco valores procesados por Rodríguez en 1996, Tabla 3.1. Los valores utilizados se muestran en el Anexo I, Tabla I.2.

3.2.2 Prueba de Hipótesis de Normalidad

En la evaluación de fenómenos aleatorios una de las distribuciones probabilísticas que mejor se adapta es la prueba de distribución normal, con ello se verifica la homogeneidad de los valores con los que se va a trabajar.

La prueba de ajuste utilizada es la propuesta por Smirnov Kolmogorov, usada en el programa AJUSTE realizado por Duque (sin publicación), y se efectúa a los datos de transmisividad generados para 142 pozos.

El criterio de aceptación o rechazo a la prueba de normalidad es el que corresponde a un nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

De la prueba de normalidad se determina que los valores de transmisividad no siguen una distribución probabilística normal, por lo que se realiza la transformación logarítmica de los datos, ver Tabla I.1 del Anexo I, para verificar si estos tienen una distribución log – normal, el resultado de la prueba fue de aceptación del ajuste, con un valor observado de 0,054784 y un valor crítico de 0,114.

En la Figura 3.3, se muestra el ajuste a una distribución normal para los datos de transmisividad con transformación logarítmica que es la hipótesis de normalidad aceptada.

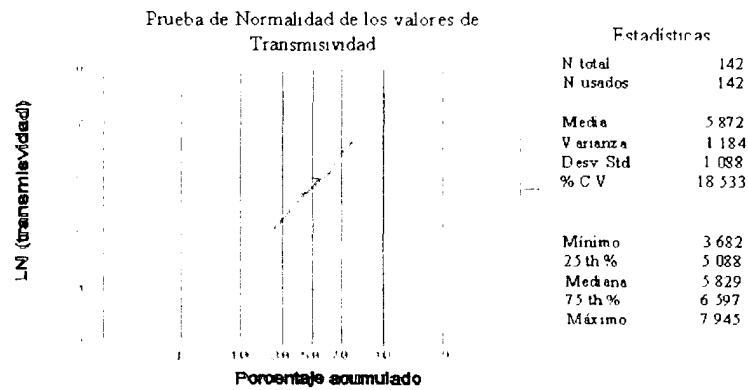


Figura 3.3. Ajuste a una distribución normal para los valores de transmisividad.

Tabla 3.3. Resumen estadístico de la transmisividad.

Variable	Transmisividad
Media	5,872
Varianza	1,184
Desviación Estándar	1,088
Mediana	5,829

3.3. DEFINICIÓN DE CASOS

3.3.1. Caso I

En éste caso se plantea la estimación del abatimiento a partir de un caudal constante de 25 l/s, siendo éste el promedio de los caudales aforados durante la fase de inventario, coeficiente de almacenamiento igual a 10^{-3} correspondiente a un acuífero confinado y el parámetro transmisividad difuso.

3.3.2. Caso II

Se estimará el abatimiento con dos parámetros difusos transmisividad y caudal, el coeficiente de almacenamiento constante igual a 10^{-3} .

3.3.3. Caso III

El abatimiento se consigue con tres parámetros difusos transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento.

3.4. ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS PARÁMETROS TRANSMISIVIDAD, CAUDAL Y COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO PARA GENERALIZAR EL ABATIMIENTO CALCULADO.

El análisis estructural es el proceso de definición del modelo geoestadístico; esto implica definir el comportamiento estructural de los datos de la variable, haciendo el análisis de variabilidad espacial, es decir, la estimación del variograma y la distribución espacial para cada parámetro.

www.bdigital.ula.ve

3.4.1. Análisis geoestadístico de la transmisividad

El análisis geoestadístico del problema fue realizado usando el SURFER 7.0 de Golden Software Inc.; con la hoja de cálculo del programa Excel se crea un archivo .xls, en el que se encuentra las coordenadas norte y este, la variable en estudio y la identificación de los pozos, las cuales se ubican en las columnas A, B, C y D respectivamente.

- *Estimación de los parámetros del variograma*

Introduciendo el archivo .xls, en el menú grid del programa se crea el variograma experimental, en éste caso con los valores de logaritmo de transmisividad. En la Figura 3.4, se observa que el variograma experimental presenta discontinuidad en el origen, lo que significa que la variable es muy irregular e implica que dos puntos distintos pero muy próximos presentan una diferencia de varianza al menos igual al efecto de pepita.

Luego se procede al ajuste del modelo teórico al variograma experimental, Figura 3.4. Dicho ajuste es a menudo subjetivo; este proceso de escogencia del modelo teórico es de ensayo y error; en el programa utilizado se realiza el ajuste en la ventana propiedades del variograma en el menú model en donde se permite optimizar los parámetros de meseta, alcance y efecto pepita.

Se comprueba que no siempre el modelo teórico ajustado conduce a un variograma que tenga similitud con el variograma muestral.

El modelo teórico que mejor se ajusta es el esférico, obteniéndose los siguientes valores en los parámetros del variograma:

Variable: Transmisividad
Modelo: esférico
Efecto de pepita puro: 0,65
Meseta: 0,72
Alcance: 11.000

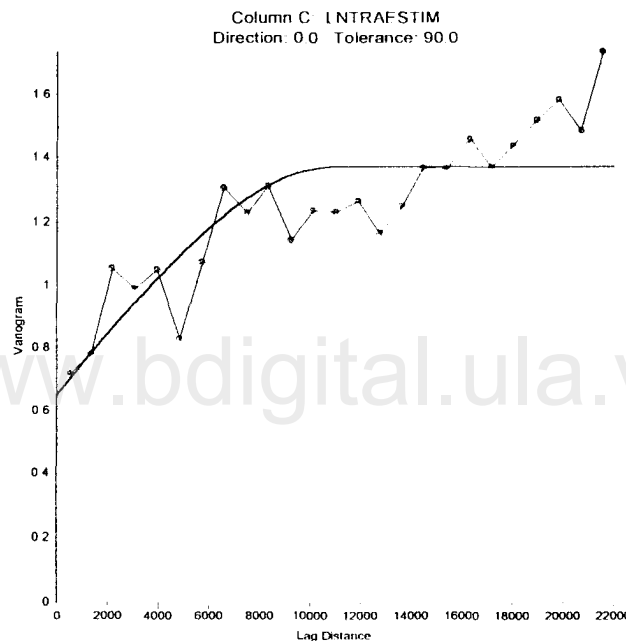


Figura 3.4 Variograma experimental y teórico del ln de transmisividad

En los resultados del variograma ajustado, se observa un marcado efecto pepita de 0,65 lo que implica una variabilidad errática. Esto se debe a varios factores entre estos la magnitud de los errores que se presentan en los ensayos de bombeo, la poca cantidad de pruebas realizadas, y por el hecho, como es en este caso, de que la “exactitud” del ajuste se modela con una base de datos imprecisa. Puesto que la transmisividad estimada era insuficiente se contaba solo con tres pruebas de bombeo que se procesaron con el GWV para obtener transmisividad; se tomaron cinco valores de transmisividad que generó Rodríguez (1986) procesando también pruebas de bombeo, por lo que fue ampliada mediante un modelo de regresión lineal, partiendo de la capacidad específica calculada, como se explica en el aparte 3.2.1. Estos factores dan lugar a errores en las “mediciones” puntuales que se traducen en un efecto pepita.

Estimación por Krigado. Ajustado el variograma teórico, se realiza la estimación de la distribución espacial de la variable por krigado.

Es importante considerar que si se ha hecho una transformación logarítmica a la variable considerada, se debe invertir esta transformación, ya que un mapa con valores de uso común se visualiza más que uno con el ln de éstos; es necesario realizar la transformación de los logaritmos a los valores originales mediante las expresiones de Sichel citados por Mora (1996):

$$Z^* = e^{\left(y^* + \frac{Var(y^* - y)}{2} \right)} \quad (3.5)$$

$$Var(Z^* - Z) = (Z^*)^2 \left(e^{(Var(y^* - y))} - 1 \right) \quad (3.6)$$

donde y^* = valor estimado por krigado del ln de la variable original; $Var(y^* - y)$ = varianza del krigado; Z^* = valor krigado de la variable original y $Var(Z^* - Z)$ = Varianza de la estimación.

La estimación por krigado se realiza a partir del archivo de datos .xls y el variograma teórico ajustado, para definir la malla se le introdujeron las siguientes coordenadas:

	Mínimo	Máximo
Coordenadas x	270000	320000
Coordenadas y	1026000	1076000

Los valores de transmisividad estimados por krigado se muestran en la Figura 3.5, observándose los valores más altos de transmisividad entre 800m²/d a 2400m²/d en la zona comprendida en las coordenadas norte 1045000 – 1070000 y este 280000-298000 aproximadamente; dicha zona se encuentra cercana al Lago de Maracaibo, donde se considera que se encuentra el material más permeable. En la zona más alejada a los límites del lago, al noreste, para los valores estimados la variación se presenta en áreas más extensas, entre 200m²/d a 600m²/d, siendo menores que los anteriores. Se muestran tabulados los valores estimados de Transmisividad en el Anexo I, Tabla I.3

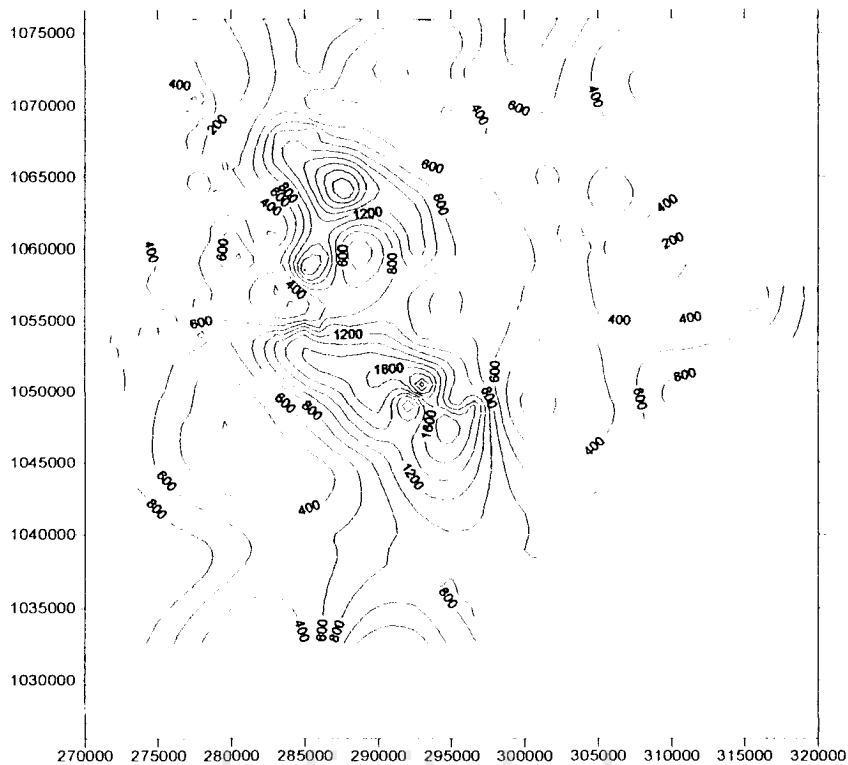


Figura 3.5. Mapa de Transmisividad

3.4.2. Determinación del Abatimiento Calculado.

Parámetro difuso = Transmisividad

El abatimiento se determina mediante la fórmula modificada de no equilibrio, hecha por Jacob a la ecuación de Theis:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \quad (3.7)$$

donde:

s= abatimiento

Q= Caudal en m³/d

T= Transmisividad en m²/d

t= tiempo de bombeo en días

r= radio en m.

S= coeficiente de almacenamiento

En la Ecuación (3.7), se tomarán constantes el tiempo de bombeo $t = 365$ días y el radio del pozo $r = 0,30m$.

Los valores de transmisividad, son los valores estimados para este parámetro, mostrados en la Tabla I.3, del Anexo I.

Con el abatimiento calculado, cuyos resultados se muestran en el Anexo I, Tabla I.4 se generó el mapa para estos valores, Figura 3.6, en ella se observa que hacia la zona cercana al lago el abatimiento es mayor variando de 10m a 24m, en esa zona la transmisividad estimada se encuentra entre $200m^2/d$ a $600m^2/d$, en la parte central del acuífero los abatimientos son menores y varían de 2 a 8m coincidiendo con el área de mayor transmisividad entre $800m^2/d$ a $2400m^2/d$.

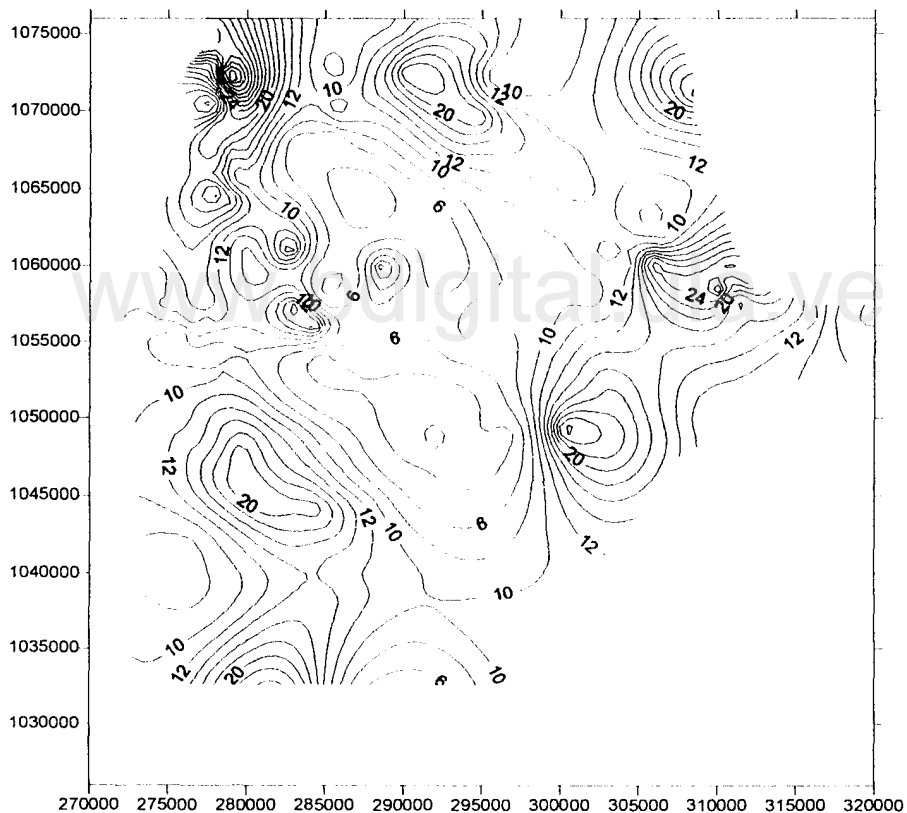


Figura 3.6. Mapa de Abatimiento calculado con transmisividad difusa

- **Intervalo para el abatimiento calculado**

Para definir el intervalo para el abatimiento calculado, se usarán las siguientes expresiones:

$$s_{maxcalculado} = s_{calculado} + \sigma \quad (3.8)$$

$$s_{mincalculado} = s_{calculado} - \sigma \quad (3.9)$$

Al realizar esta estimación de +/- una desviación estándar se tiene el 68% de confianza, ya que la variable sigue una distribución normal.

Los valores de abatimiento calculado, Tabla I.4, presentan las siguientes características que se muestran en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4. Resumen estadístico del abatimiento calculado.

Característica estadística	Abatimiento calculado (m)
Valor mínimo	1,707
Valor máximo	41,98
Media	11,654
Mediana	10,608
Desviación estándar (σ)	4,835

En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestran los mapas de abatimiento máximo calculado y abatimiento mínimo calculado respectivamente, donde se observa que en las zonas cercanas a los límites del acuífero se encuentran los mayores abatimientos máximos y los mayores abatimiento mínimos y en la zona central de transmisividad máxima se presentan los menores abatimientos máximos y los menores abatimientos mínimos. Los valores tabulados de abatimiento máximo calculado y abatimiento mínimo calculado se encuentran en la Tabla I.4, del Anexo I.

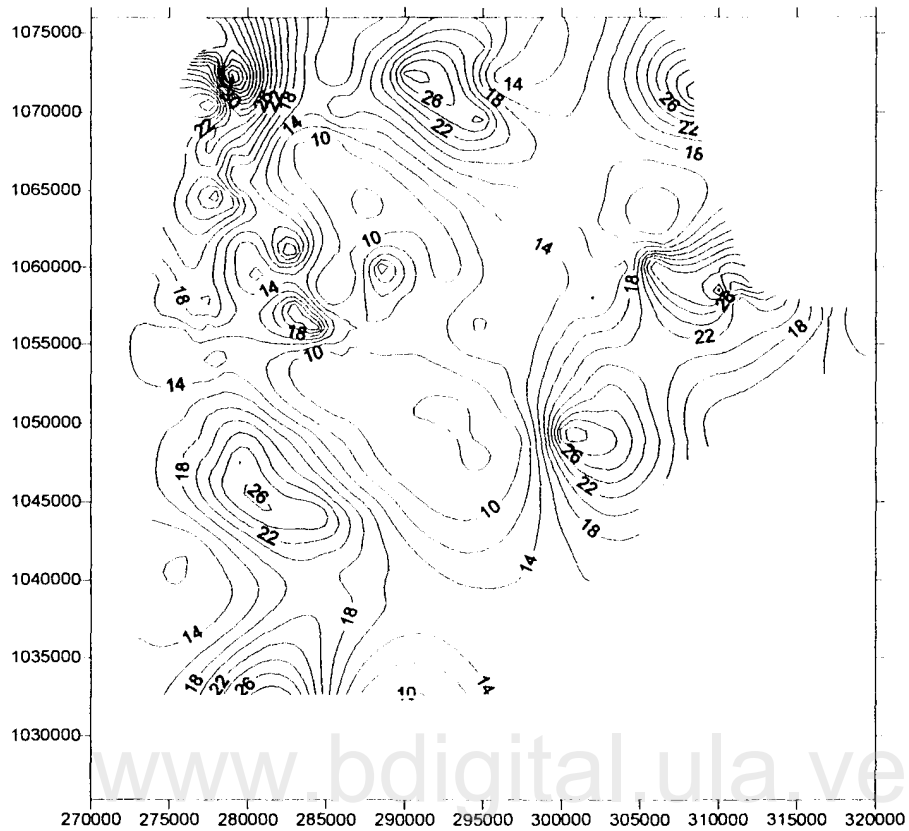


Figura 3.7. Mapa de Abatimiento máximo calculado

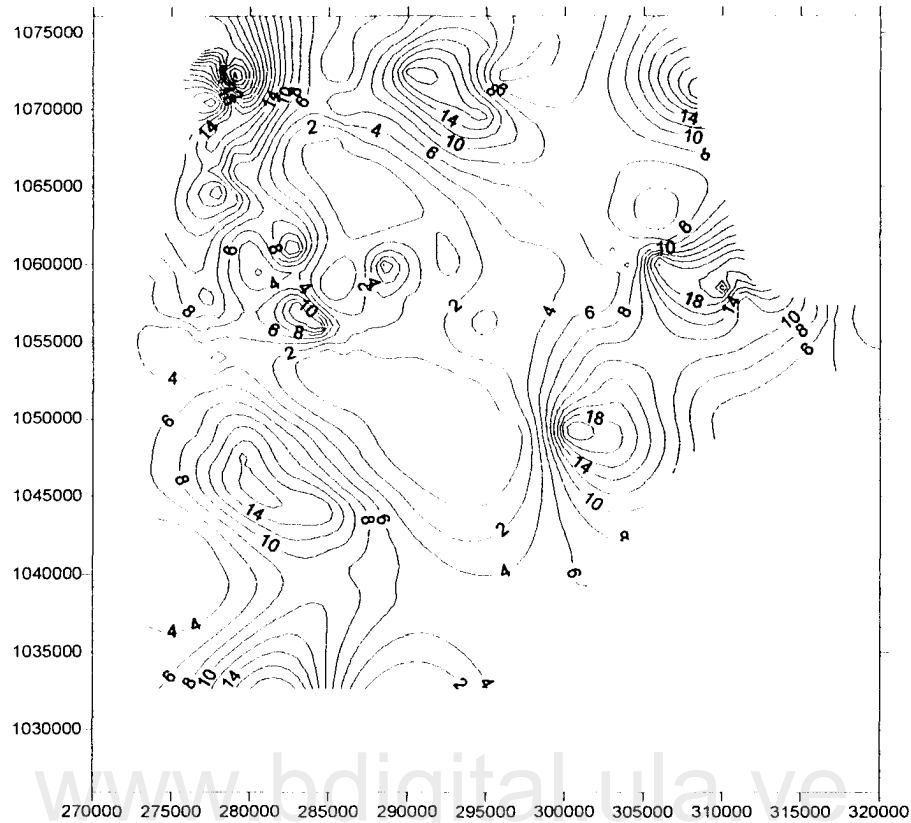


Figura 3.8. Mapa de Abatimiento mínimo calculado

Función de pertenencia para el abatimiento calculado. El abatimiento puede ser representado por un número difuso triangular y con el fin de disminuir la influencia de los valores extremos, se propone tomar en cuenta las características estadísticas de la distribución, establecidas con los valores de abatimiento calculado, Tabla 3.4, donde $\sigma = 4,835$. Así el apoyo o soporte del intervalo difuso de abatimiento calculado está definido por su desviación típica, el cual corresponde a una estimación de la probabilidad del 68% en la cual la variable aleatoria abatimiento pertenece al soporte del intervalo difuso de abatimiento calculado.

La Figura 3.9 ilustra la función de pertenencia para el intervalo difuso de abatimiento calculado, con centro igual al abatimiento calculado y soporte de ancho igual a σ , con $\sigma = 4,835$.

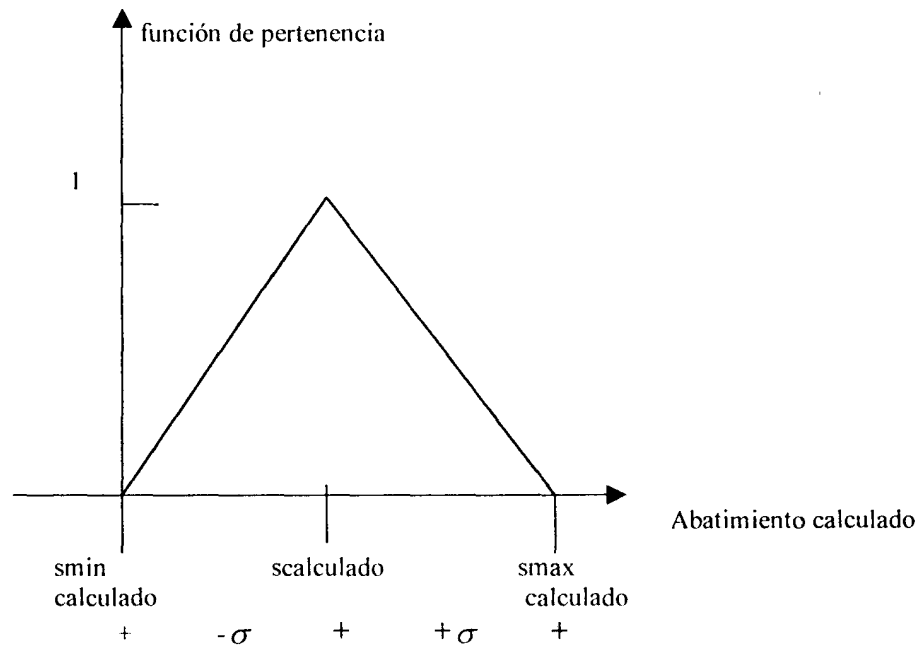


Figura 3.9. Forma general del número difuso abatimiento calculado.

Entre los intervalos de abatimiento calculado resultantes, presentados en el Anexo I, Tabla I.4, se tienen:

Coordenada x	Coordenada y	scalculado	smaxcalculado	Smincalculado
276500	1042000	7,73	12,56	2,89
282500	1052500	5,59	10,44	0,77

Siendo smax calculado y smin calculado el valor máximo y mínimo respectivamente, que puede tomar el abatimiento calculado con una transmisividad difusa.

Las Figuras 3.10 y 3.11, ilustran la función de pertenencia de los resultados obtenidos en las coordenadas 276500-1042000 y 282500-1052500 respectivamente.

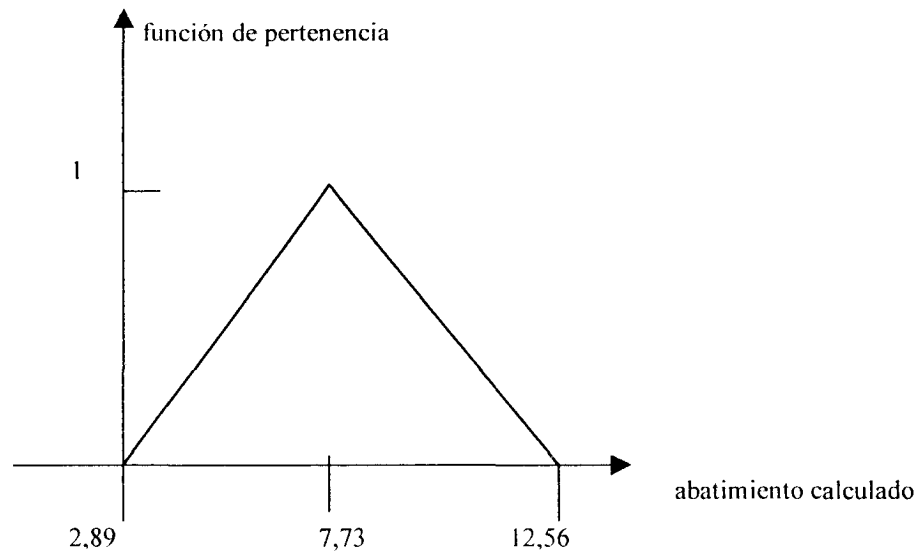


Figura 3.10. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento calculado en la coordenada 276500-1042000

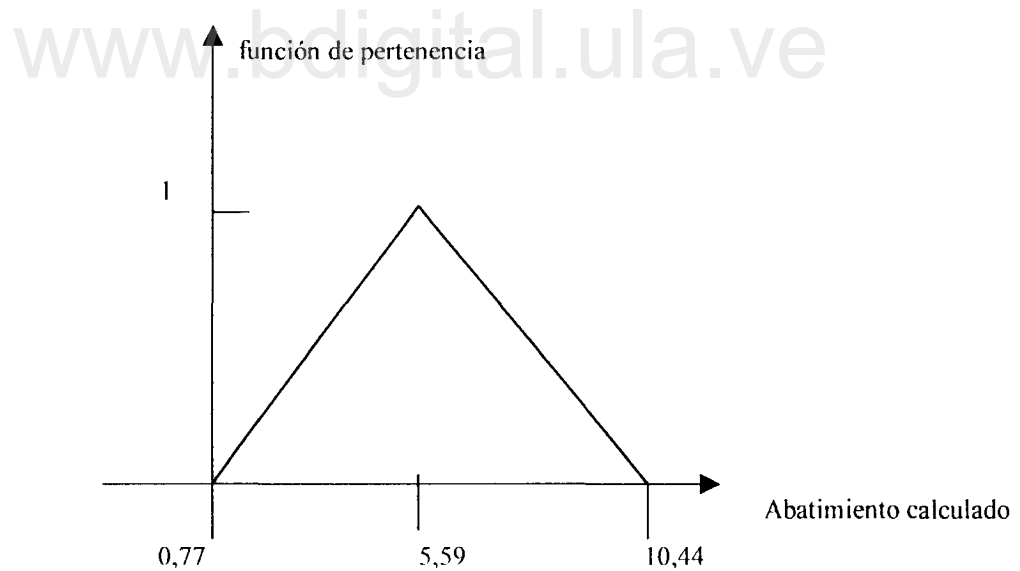


Figura 3.11. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento calculado en la coordenada 282500-1052500

Al definir el apoyo del número difuso, ya que éste puede variar en función de la precisión deseada en los resultados, por σ , se tienen definidos los límites de los intervalos del abatimiento con una estimación de confiabilidad del 68%.

- *Imprecisión relativa del intervalo del abatimiento calculado.* La imprecisión en el abatimiento depende de la precisión con la cual los diferentes parámetros de la ecuación de Jacob son determinados.

En este caso, la transmisividad es un número difuso, por lo que el intervalo de abatimiento calculado es un intervalo difuso cuyos límites son imprecisos, de función de pertenencia continua y de apoyo compacto o cerrado y limitado; la forma de la función de pertenencia refleja la creencia que incluye el valor exacto a estimar.

Para determinar la imprecisión entre el intervalo de abatimiento y el abatimiento calculado, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Imprecisión relativa} = \frac{s_{max} - s_{min}}{s_{calculado}} \quad (3.10)$$

donde $s_{max}-s_{min}$ es el intervalo de abatimiento para cada caso y $s_{calculado}$ es el abatimiento calculado para cada caso.

Entonces, la imprecisión relativa del intervalo de abatimiento con el abatimiento calculado se estimó con la Ecuación (3.10), obteniéndose así el mapa de imprecisión en el abatimiento calculado, Figura 3.12, los valores se presentan tabulados en el Anexo I, Tabla 1.5, de donde se obtiene:

Imprecisión máxima = 5,66
Imprecisión mínima = 0,23
Media = 1,003
Desviación standar = 0,547

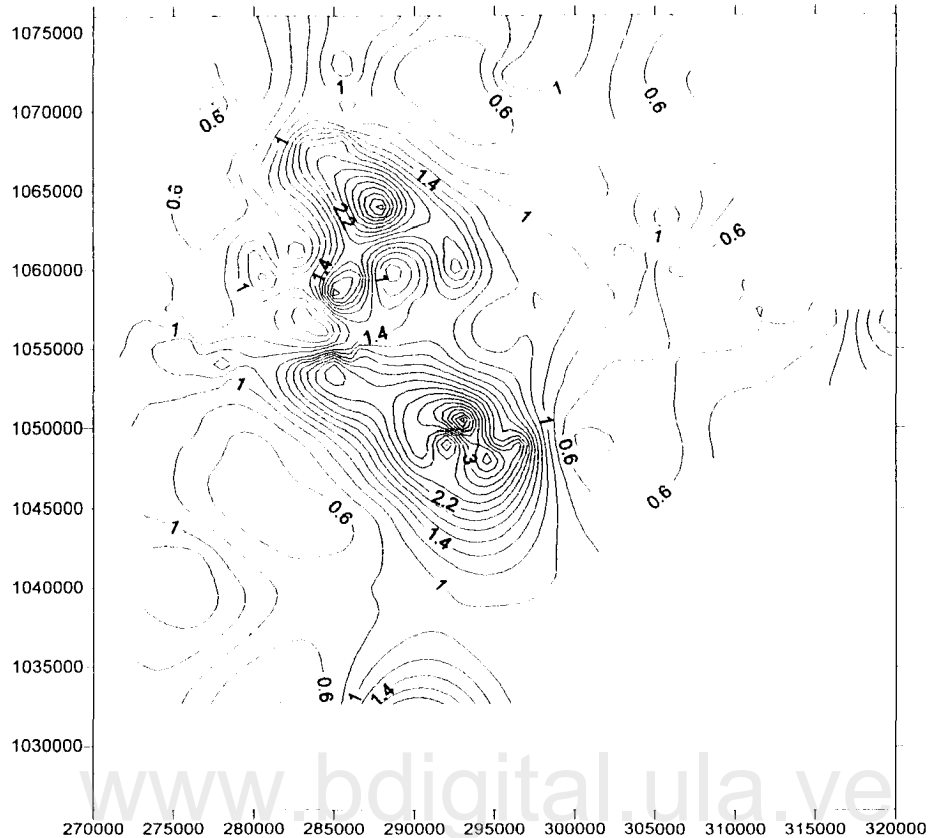


Figura 3.12. Mapa de Imprecisión en el abatimiento calculado

Se observa en el mapa de imprecisión, Figura 3.12, que la mayor imprecisión entre 1,4 a 4,2 se ubica en la zona central del acuífero coincidiendo con la zona donde el abatimiento calculado es menor, entre 2 a 8m área de mayor transmisividad.

3.4.3. Análisis geoestadístico para el caudal

Los valores de caudal son los obtenidos de los registros de la base de datos del SHT, para 136 pozos, que se presentan en el Anexo I, Tabla I.2; realizando el variograma experimental para logaritmo de caudal se consigue un buen ajuste con un modelo esférico, con los siguientes parámetros:

- Modelo = esférico
- Efecto de pepita = 0
- Meseta = 2,25
- Alcance = 7300m

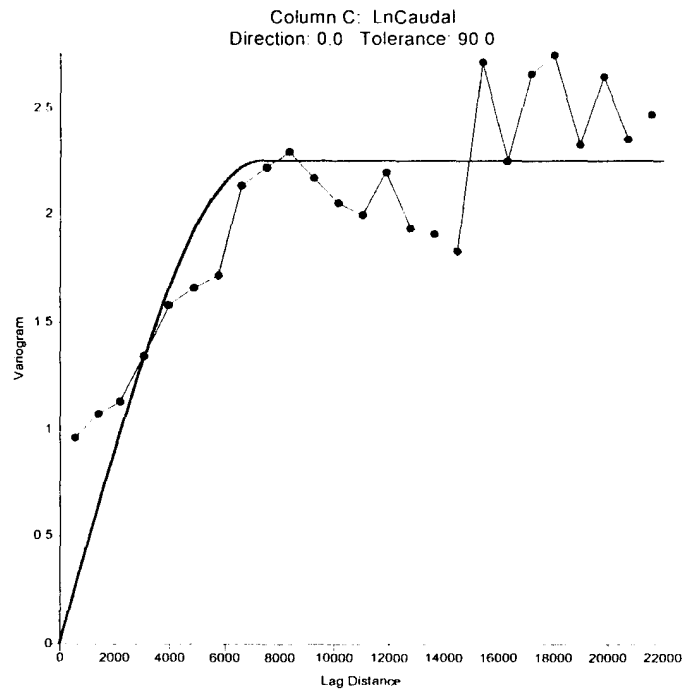


Figura 3.13. Variograma experimental y teórico para caudal

En la Figura 3.13 se ilustra el variograma experimental y teórico para el logaritmo del caudal, en donde se observa que en el variograma experimental se presentan quiebres a distintas escalas y el variograma teórico es continuo en el origen y de pendiente no nula. Esta continuidad en el origen, efecto pepita igual a cero, se presenta por ser el caudal una variable muy regular de la que además se dispone de una cantidad razonable de datos, como es en este caso.

Una vez obtenido el variograma que define la estructura de la variabilidad del caudal se procede al krigado de éste

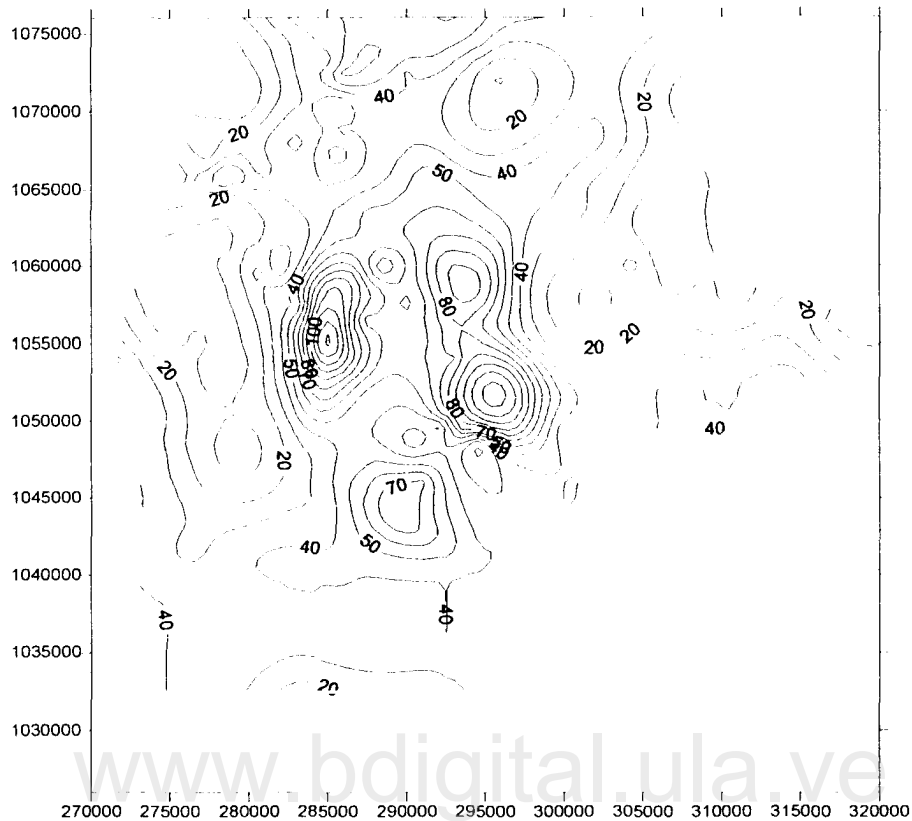


Figura 3.14. Mapa de caudal estimado.

En el mapa de caudal, Figura 3.14, se observa que en la zona central del acuífero los volúmenes de agua por unidad de tiempo que se descarga por bombeo son mayores; en el resto del acuífero son consistentes.

Los valores de caudal estimado por kriging se presentan en el Anexo I, Tabla I.6.

3.4.4. Determinación del abatimiento calculado

Parámetros difusos = transmisividad y caudal.

El abatimiento calculado se determinó con la Ecuación (3.7), en donde los valores de transmisividad son los estimados en el aparte 3.4.1 y se muestran en la Tabla I.3; los valores de caudal estimado se presentan en la Tabla I.6.

Al obtener los valores de abatimiento calculado, que se muestran en el Anexo I, Tabla I.7, se generó el mapa de abatimiento calculado con caudal y transmisividad difusos, Figura 3.15.

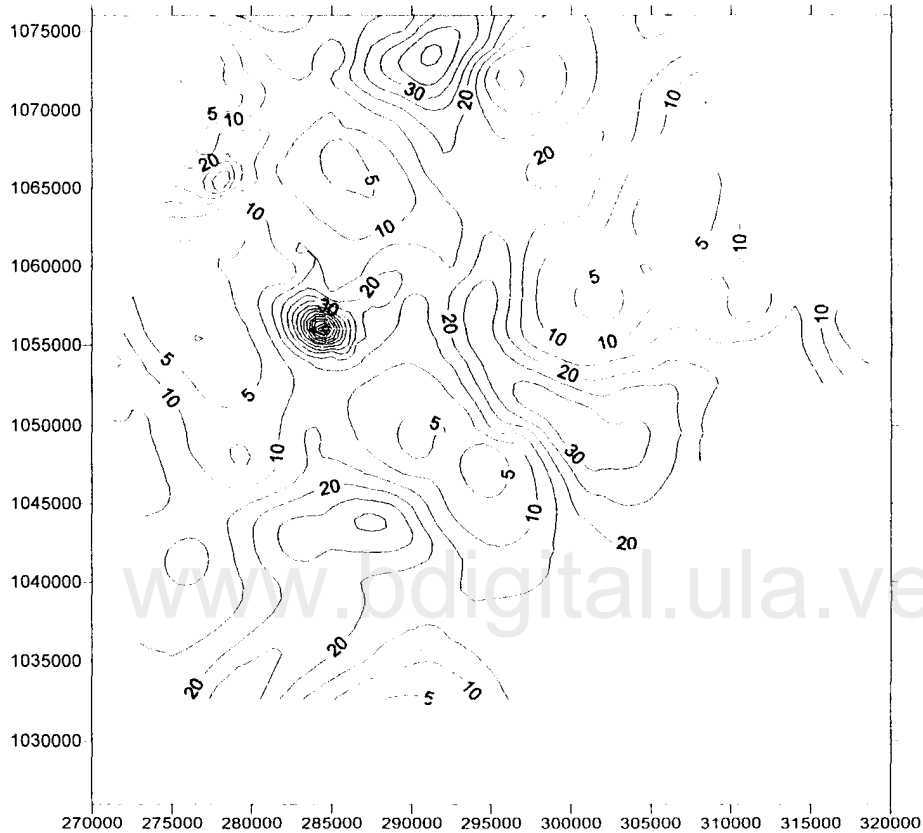


Figura 3.15. Mapa de Abatimiento calculado con transmisividad y caudal difusos

En el mapa, Figura 3.15, se observa la influencia de la transmisividad y del caudal, en zonas donde se tienen valores de caudal altos y transmisividad baja se encuentran los mayores abatimientos como se presenta en la coordenada 284500-1056000 donde se tiene $Q=116\text{l/s}$, $T=180\text{m}^2/\text{d}$ el abatimiento es de 80m.

- ***Intervalo para el abatimiento calculado***

Para generar el intervalo de abatimiento calculado se usó la Ecuación (3.8) para el abatimiento máximo calculado y la Ecuación (3.9) para el abatimiento mínimo calculado,

tomando la desviación típica igual a 6,6836, tomado de la Tabla 3.5 que muestra las características estadísticas del abatimiento calculado.

Tabla 3.5. Resumen estadístico del abatimiento calculado con transmisividad y caudal estimado.

Característica estadística	Abatimiento calculado
Valor mínimo	0,724
Valor máximo	83,68
Media	15,261
Mediana	16,455
Desviación estándar	6,6836

Con estos valores de abatimiento calculado máximo y mínimo, los cuales se encuentran tabulados en el Anexo I, Tabla I.7, se realizó su representación espacial. En la Figura 3.16 se muestra el mapa de abatimiento máximo calculado y en la Figura 3.17 el mapa de abatimiento mínimo calculado.

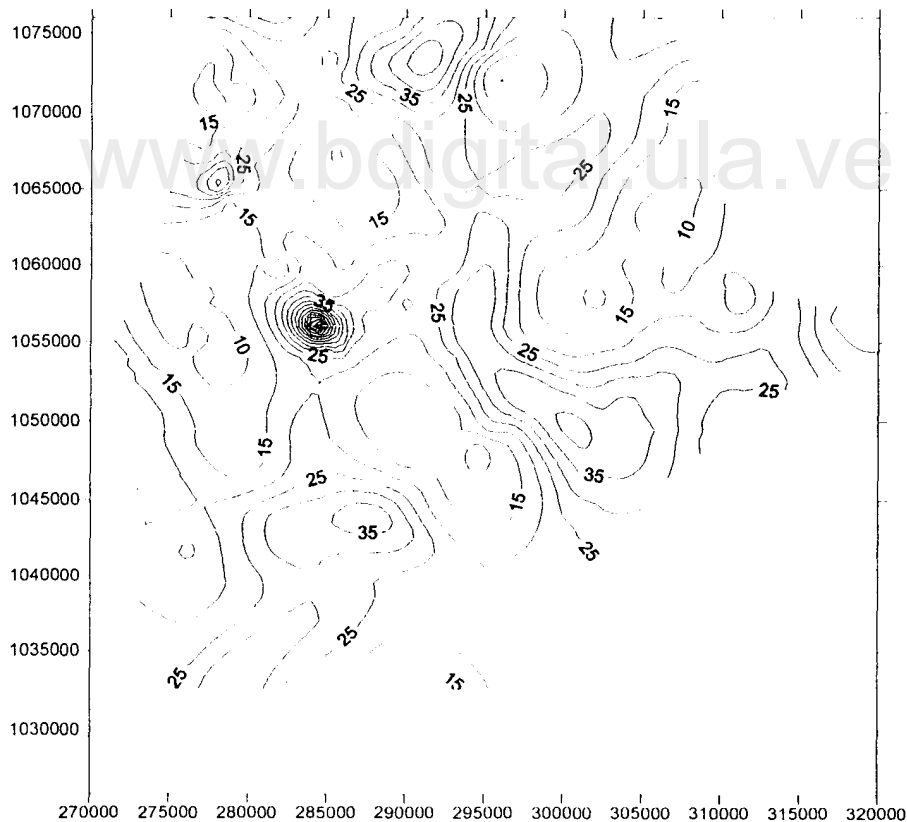


Figura 3.16. Mapa de abatimiento máximo calculado con transmisividad y caudal difusos

En la Figura 3.16 se observa que en las zonas de transmisividad alta entre $800\text{m}^2/\text{d}$ y $2400\text{m}^2/\text{d}$ y caudales bajos 10 l/s y 40 l/s se producen los menores abatimientos máximos entre 5m a 25m y donde se tiene transmisividad entre $200\text{m}^2/\text{d}$ y $400\text{m}^2/\text{d}$ y caudales entre 50 l/s a 130 l/s se presentan los mayores abatimientos máximos $30\text{-}90\text{m}$.

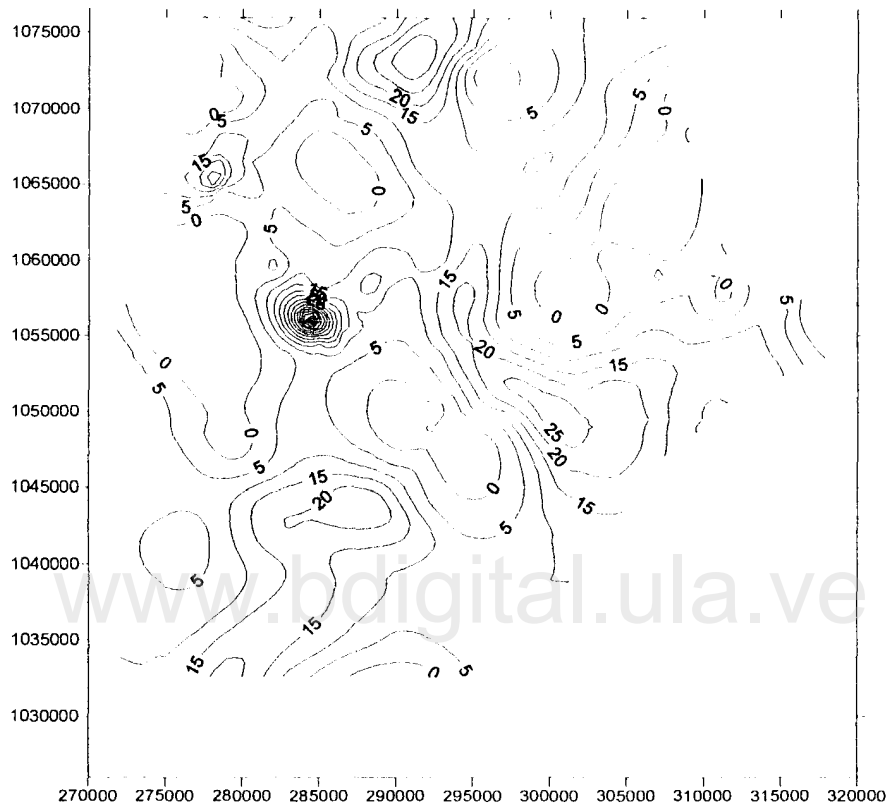


Figura 3.17. Mapa de abatimiento mínimo calculado con transmisividad y caudal difusos

En la Figura 3.17 se presentan, en las zonas de transmisividad alta y caudales bajos, los menores abatimientos mínimos entre 0 a 10m , y para transmisividad baja y caudales altos se tienen los mayores abatimientos mínimos que se encuentran entre 15m a 75m .

Función de pertenencia para el abatimiento calculado. Se tomó del Anexo I, Tabla I.7; los siguientes valores de abatimiento calculado para construir la función de pertenencia;

Coordenada x	Coordenada y	s calculado	s max calculado	s min calculado
276500	1042000	8,16	14,84	1,47
282500	1052500	9,73	16,41	3,04

Siendo *smax calculado* y *smin calculado* el valor máximo y mínimo respectivamente, que toma el abatimiento con transmisividad y caudal difusos .

La Figura 3.18 presenta la función de pertenencia de los resultados en la coordenada 276500 – 1042000 y la Figura 3.19 la función de pertenencia en la coordenada 282500-1052500.

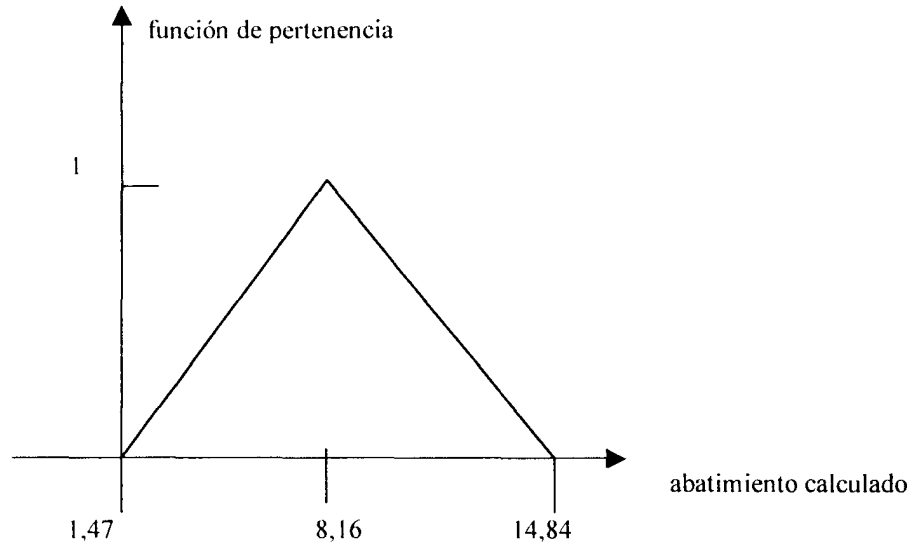


Figura 3.18. Función de pertenencia para abatimiento calculado coordenada 276500 – 1042000

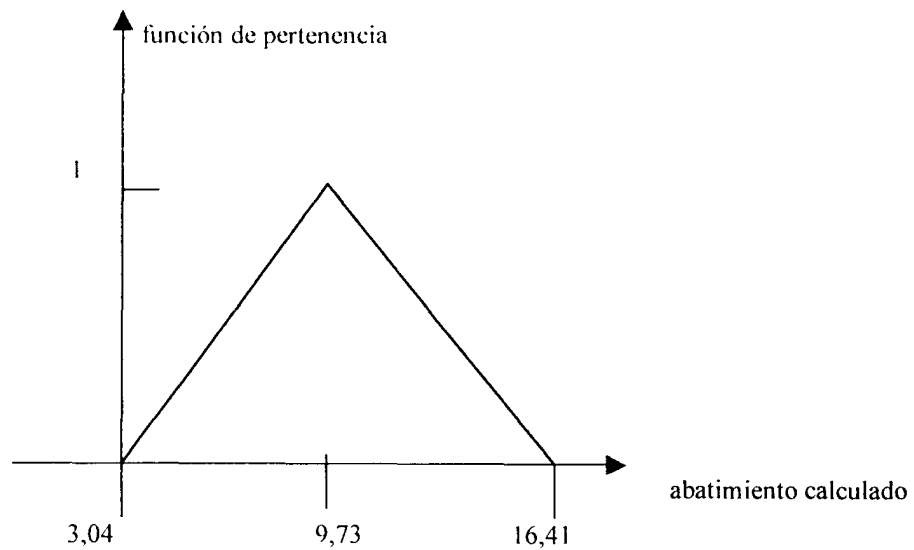


Figura 3.19. Función de pertenencia para abatimiento calculado coordenada 282500-1052500

- *Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado.* La imprecisión entre el intervalo de abatimiento y el abatimiento calculado para los parámetros difusos transmisividad y caudal, se determinó mediante la Ecuación (3.10). Los valores resultantes se presentan en el Anexo I, Tabla I.8, de donde se tiene:

Imprecisión máxima = 18,46
Imprecisión mínima = 0,16
Media= 1,244
Desviación estándar = 1,233

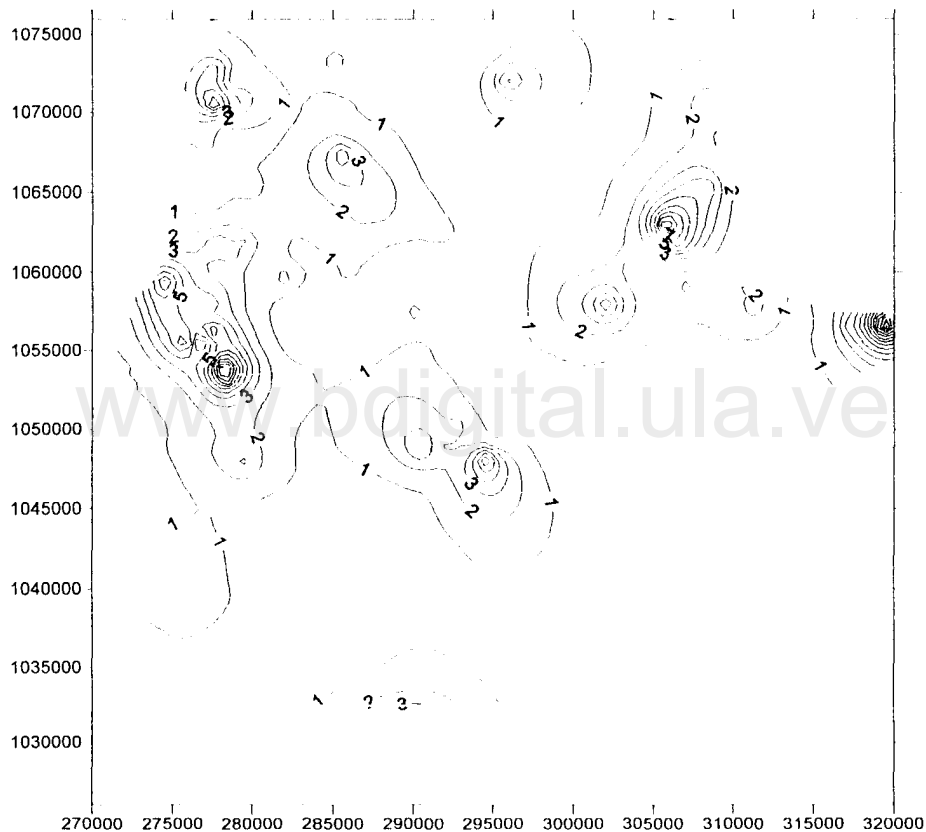


Figura 3.20. Mapa de imprecisión del intervalo de abatimiento calculado con transmisividad y caudal difusos.

En el mapa de imprecisión para el abatimiento calculado, Figura 3.20, se observa que la imprecisión máxima se presenta en la zona donde se tiene caudales muy bajos entre 10 l/s a 40 l/s, transmisividades altas entre $800\text{m}^2/\text{d}$ a $2400\text{m}^2/\text{d}$, y abatimientos entre 5m a 25m.

Realizando la comparación entre el mapa de imprecisión del abatimiento calculado con transmisividad difusa, Figura 3.12, y el mapa de imprecisión del abatimiento calculado con transmisividad y caudal difuso, Figura 3.20, en este último la imprecisión en los resultados es mayor de 0,16 a 18,46 veces que el abatimiento calculado, pero las zonas con mayor imprecisión coinciden en ambos mapas, que es donde se presentan transmisividades altas.

3.4.5. Análisis geoestadístico para el coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento se calculó con la Ecuación (3.4) obteniéndose este parámetro solo para 86 pozos, ver Anexo I, Tabla I.9, por lo que se hizo necesario obtener un mayor número de valores usando el método de estimación por krigeado.

El variograma experimental y el teórico para los valores de coeficiente de almacenamiento presentan las características siguientes:

- Modelo = esférico
- Efecto de pepita = 0
- Meseta = $5,73 \times 10^{-7}$
- Alcance = 3350 m

Con estos valores del variograma, al aplicar el método del krigeado el SURFER no los procesa por que son valores muy pequeños, multiplicándose los valores del coeficiente de almacenamiento por 1000, obteniéndose el siguiente variograma:

- Modelo = esférico
- Efecto de pepita = 0
- Meseta = $5,73 \times 10^{-1}$
- Alcance = 3350 m

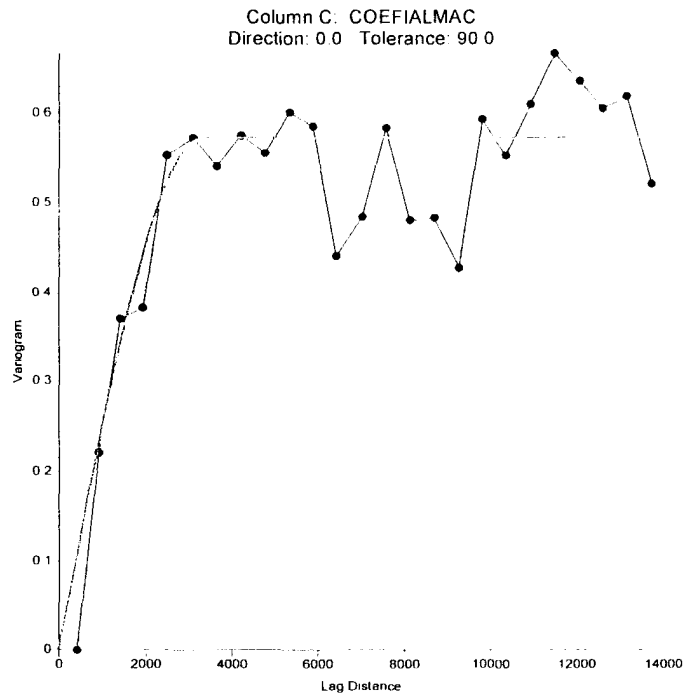


Figura 3.21. Variograma experimental y teórico para los valores de coeficiente de almacenamiento

En la Figura 3.21 se muestra el variograma experimental y teórico para el coeficiente de almacenamiento.

Obtenido el variograma teórico, se procede a realizar el krigeado para el parámetro coeficiente de almacenamiento.

En la Figura 3.22 se muestra el mapa para los valores estimados de coeficiente de almacenamiento, y en el Anexo I, Tabla I.10, los valores tabulados, observándose gran incertidumbre en los resultados, lo cual se debe a que la gran mayoría de los valores fueron estimados. En la zona oeste – centro del acuífero, se presentan conos invertidos donde aumenta o disminuye el coeficiente, en el resto del área se mantiene un coeficiente constante.

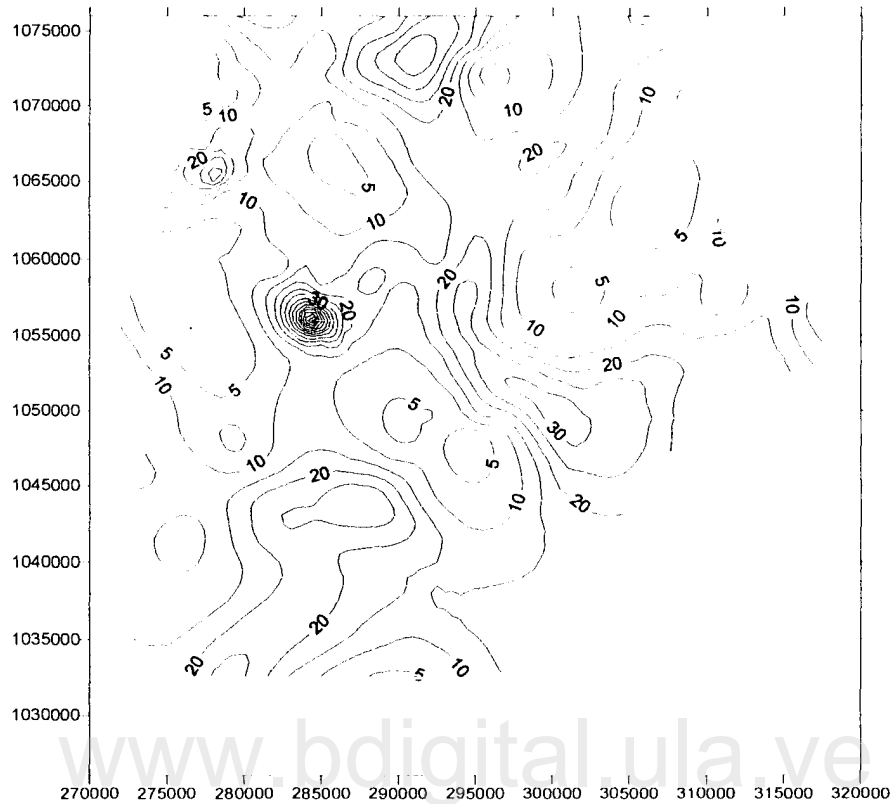


Figura 3.23. Mapa de abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.

En la Figura 3.23, se observa que los abatimientos calculados en gran parte del acuífero son pequeños y varían entre 0m a 20m y donde se presentan abatimientos mayores coincide con las zonas de transmisividades pequeñas de $200\text{m}^2/\text{d}$ a $600\text{m}^2/\text{d}$. El valor abatimiento calculado con los parámetros transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento estimados presenta las características que se muestran en la Tabla 3.6:

Tabla 3.6. Resumen estadísticos del abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento.

Valor estadístico	Abatimiento calculado
Valor mínimo	0,688
Valor máximo	78,33
Media	14,44
Mediana	15,57
Desviación estándar	6,312

Intervalo para el abatimiento calculado. El intervalo para el abatimiento calculado se determinó por las Ecuaciones (3.8) y (3.9) para el máximo y el mínimo abatimiento, donde la desviación estándar para este caso es igual a 6,312, tomado de la Tabla 3.6.

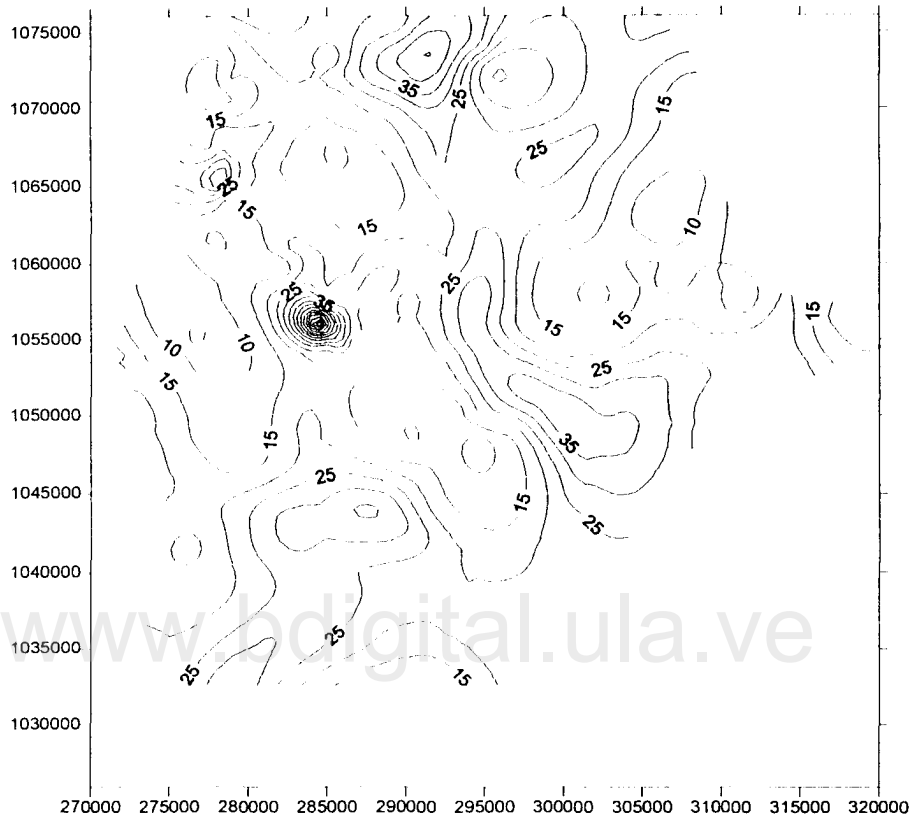


Figura 3.24. Abatimiento máximo calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos

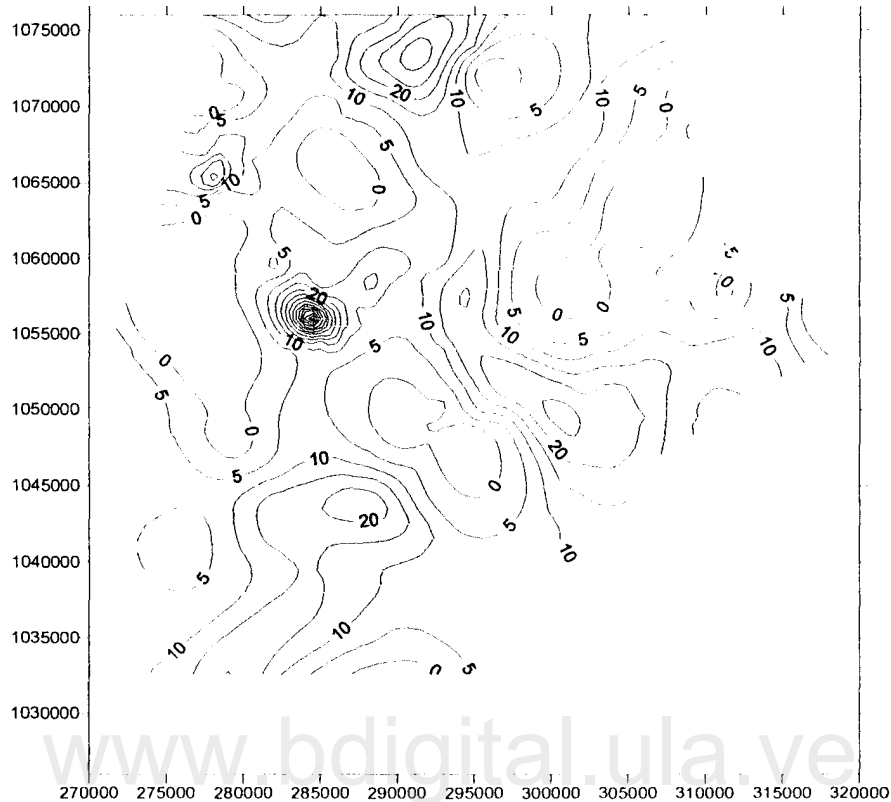


Figura 3.25. Abatimiento mínimo calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.

En la Figura 3.24 se presenta el mapa de abatimiento máximo calculado, el cual presenta una variación entre 5m a 80m y en la Figura 3.25 se tiene el mapa de abatimiento mínimo calculado presentando valores entre 0 a 70m; se observa que hay muy poca diferencia entre ambos mapas, lo que indica que el coeficiente de almacenamiento no influye significativamente en el abatimiento.

Los valores tabulados se presentan en el Anexo I, Tabla I.11

- *Función de pertenencia e imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado*

Entre los intervalos de abatimiento calculado, Tabla I.11, se tiene:

Coordenada x	Coordenada y	sacalculado	smaxcalculado	smincalculado
276500	1042000	7,73	14,03	1,41
282500	1052500	9,17	15,48	2,86

Siendo $smax$ y $smin$ calculado el valor máximo y mínimo respectivamente, que puede tomar el abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento estimados.

La Figura 3.26 muestra la función de pertenencia del intervalo de abatimiento en las coordenadas 276500 – 1042000 y la Figura 3.27 la función de pertenencia en la coordenada 282500 – 1052500.

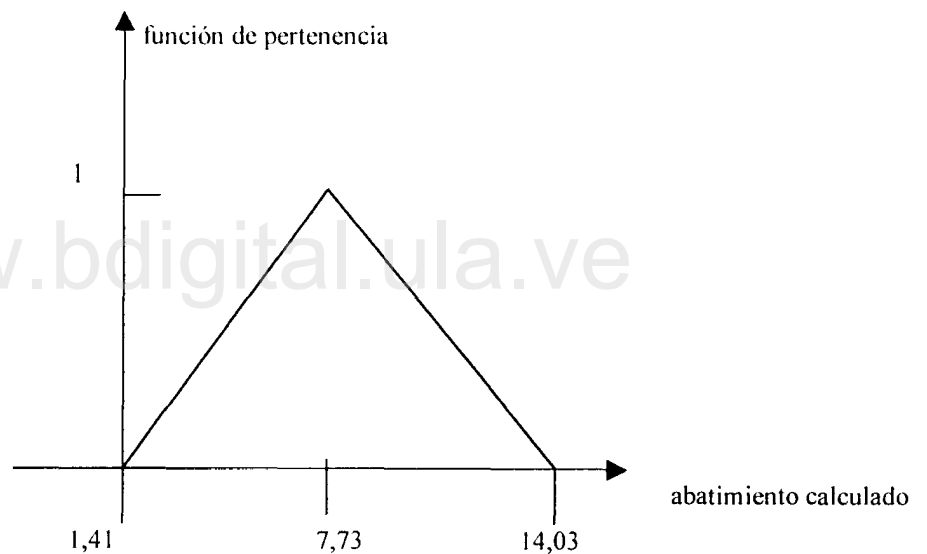


Figura 3.26. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento calculado en coordenada 276500 – 1042000

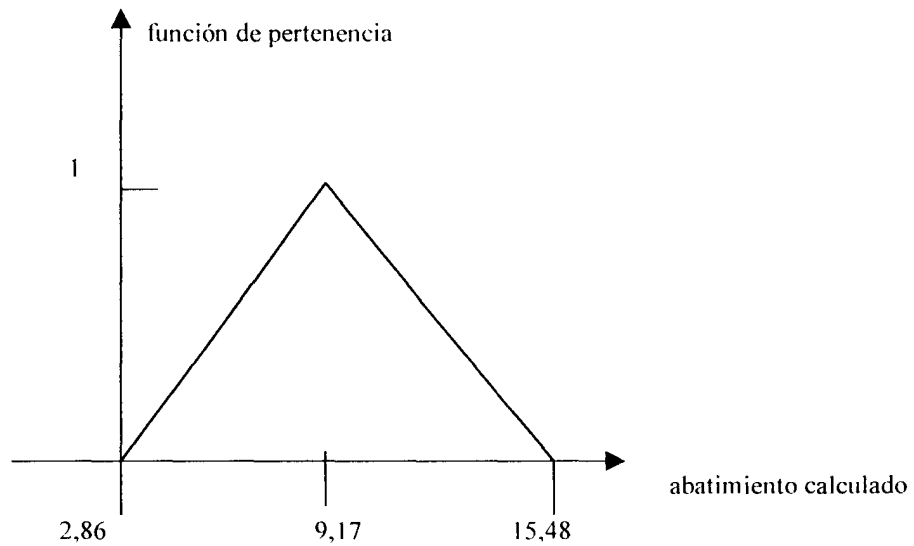


Figura 3.27. Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento calculado en coordenada 282500 – 1052500

La imprecisión relativa entre el intervalo de abatimiento y el abatimiento calculado se determinó con la Ecuación (3.10), obteniéndose el mapa de imprecisión del intervalo de abatimiento calculado, Figura 3.27, los valores se presentan en el Anexo I, Tabla 1.12, de donde se obtiene:

Imprecisión mínima = 0,1611
 Imprecisión máxima = 18,35
 Media = 1,24
 Desviación estándar = 1,23

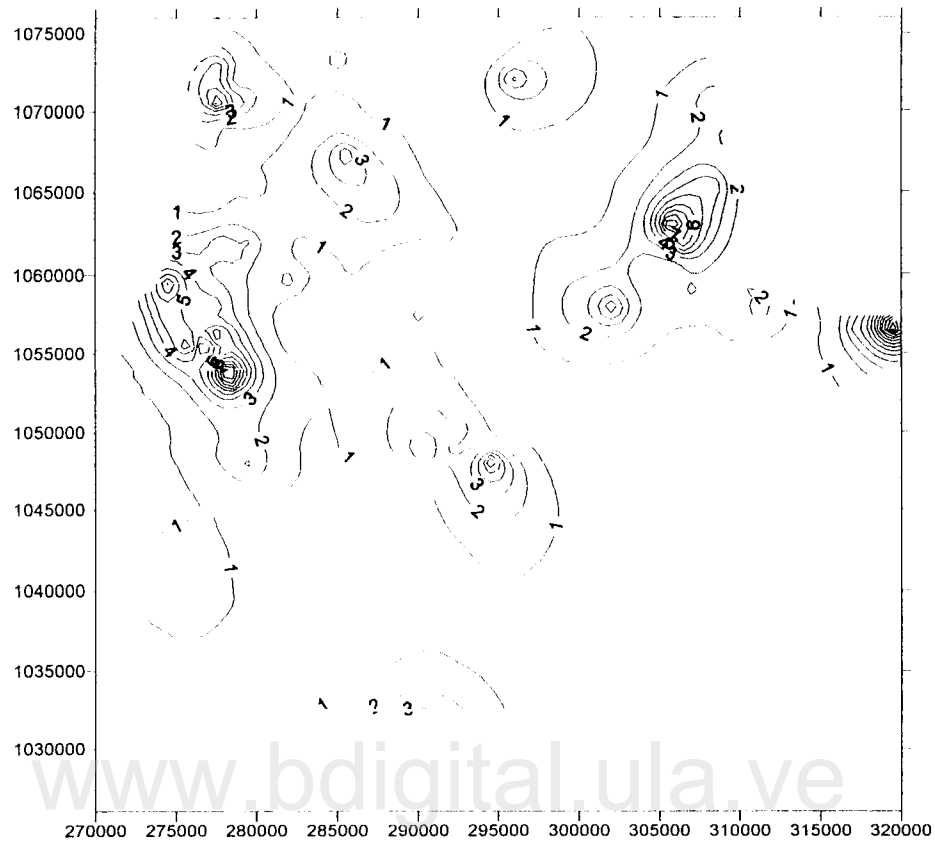


Figura 3.28. Mapa de imprecisión del intervalo de abatimiento con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difuso .

Se observa en el mapa de imprecisión, Figura 3.28, que la imprecisión entre el intervalo de abatimiento y el abatimiento calculado en gran parte del acuífero es mínima y varía entre 0 a 6, lo que indica también que al determinar el abatimiento con coeficiente de almacenamiento difuso éste no influye significativamente.

3.5. COMPARACIÓN ENTRE LAS FUNCIONES DE PERTENENCIA DE ABATIMIENTO CALCULADO

Adimensionalizando las funciones de pertenencia, para realizar la comparación entre ellas, se tiene que para el abatimiento calculado con transmisividad estimada la función de pertenencia en la coordenada 276500 – 1042000, Figura 3.29, es la siguiente:

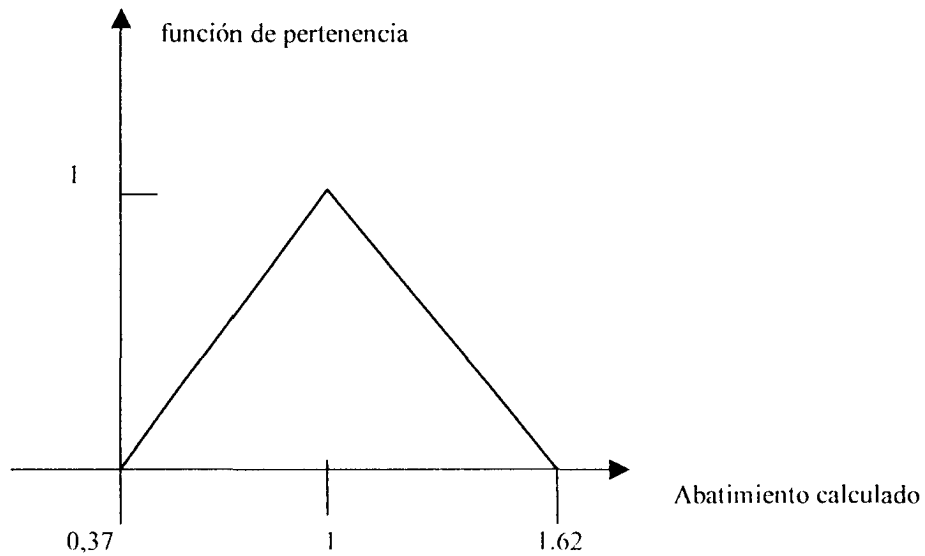


Figura 3.29. Función de pertenencia adimensional del abatimiento calculado con transmisividad difusa en la coordenada 276500 – 1042000.

La función de pertenencia adimensional para el abatimiento calculado con transmisividad y caudal estimados en la coordenada 276500 – 1042000 se presenta a continuación en la Figura 3.30:

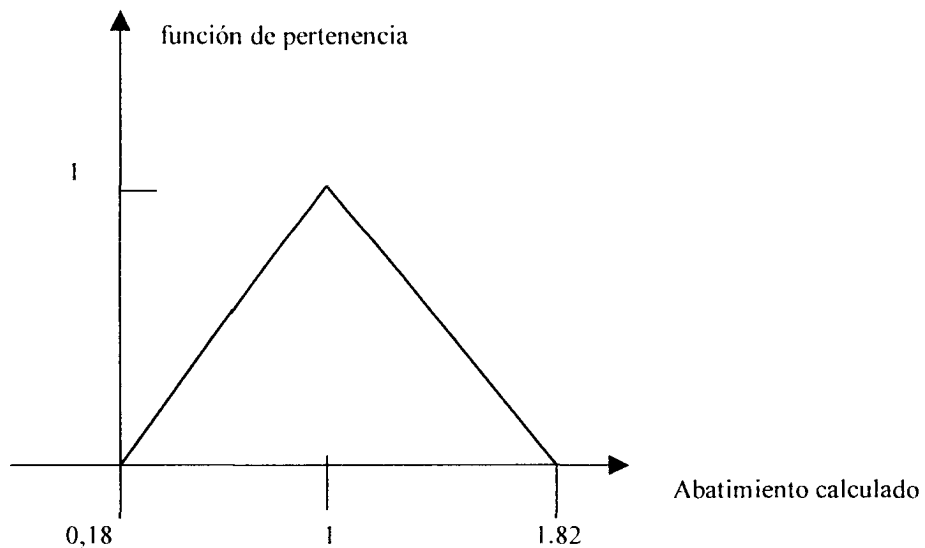


Figura 3.30. Función de pertenencia adimensional del abatimiento calculado con transmisividad y caudal estimados en la coordenada 276500 – 1042000.

La Figura 3.31 presenta la función de pertenencia para el abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente del almacenamiento estimados en la coordenada 276500 – 1042000.

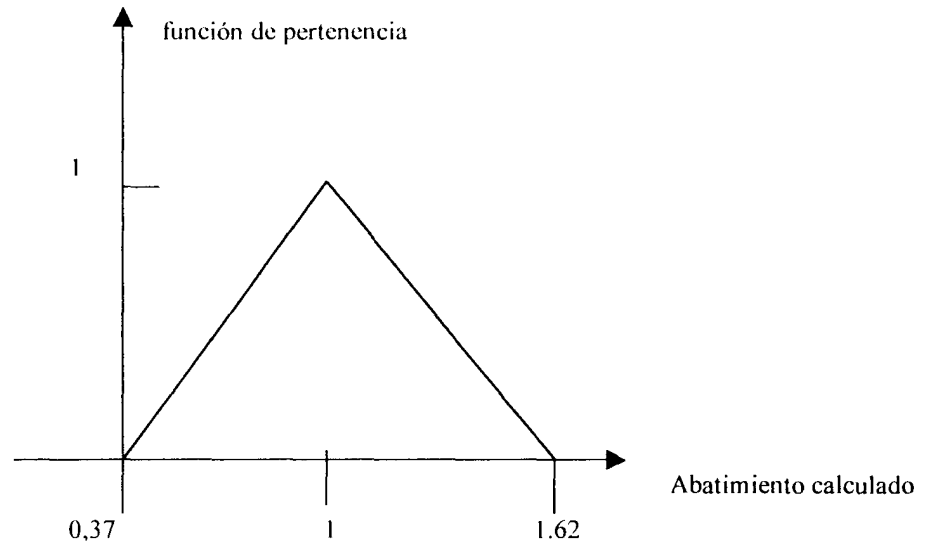


Figura 3.31. Función de pertenencia adimensional del abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento estimados de la coordenada 276500 – 1042000.

Analizando las tres funciones de pertenencia anteriores, se observa que la mayor amplitud se presenta en la función de pertenencia del abatimiento calculado con transmisividad y caudal estimados, Figura 3.30, lo que implica una mayor imprecisión en los valores estimados del intervalo de abatimiento. La amplitud de esta función de pertenencia, Figura 3.30, y la función de pertenencia de abatimiento calculado con los tres parámetros difusos, Figura 3.31, no presenta una variación significativa lo que indica que el coeficiente de almacenamiento no tiene una marcada influencia sobre el abatimiento como lo tienen la transmisividad y el caudal.

Un apoyo más limitado, como se presenta en la Figura 3.29, permite tener información más exacta sobre la imprecisión de los valores extremos alrededor del valor calculado.

De los valores generados por krigeado de la imprecisión en el abatimiento calculado se tiene:

Imprecisión máxima = 5,66
 Imprecisión mínima = 0,23
 Média = 1,003

Desviación estándar = 0,547

Para abatimiento calculado con transmisividad y caudal difusos:

Imprecisión máxima = 18,46

Imprecisión mínima = 0,16

Media = 1,24

Desviación estándar = 1,23

Analizando el mapa de imprecisión del abatimiento calculado, con transmisividad estimada, Figura 3.12, y el mapa de imprecisión del abatimiento calculado con transmisividad y caudal estimados, se corrobora lo que presentan las funciones de pertenencia de ambos casos, mayor imprecisión en el abatimiento calculado es donde se tiene una mayor amplitud en el intervalo, que es el caso de abatimiento calculado con dos parámetros difusos, transmisividad y caudal.

Los valores de imprecisión para el abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos varían muy poco con respecto a los valores de imprecisión del abatimiento calculado con transmisividad y caudal difusos, como se observa:

Imprecisión máxima = 18,35

Imprecisión mínima = 0,16

Media = 1,24

Desviación estándar = 1,23

El coeficiente de almacenamiento no influye significativamente en el abatimiento.

CAPITULO 4

RESULTADOS

En esta etapa se procede al análisis de los resultados del abatimiento según el parámetro difuso en cada caso planteado.

4.1. ESTIMACIÓN DEL ABATIMIENTO PARA EL CASO I

Parámetro difuso = transmisividad

Parámetros constantes = caudal, coeficiente de almacenamiento

4.1.1. Estimación del intervalo de transmisividad

Una vez obtenido el mapa de transmisividad estimada, Figura 3.5, se procede a determinar el error de estimación, con estos dos parámetros se definen los intervalos del valor estimado de transmisividad.

A continuación se exponen los criterios para realizar la estimación de los valores de transmisividad máxima y mínima:

Se calcula la varianza del error de estimación; con los datos de transmisividad y el variograma teórico ajustado, se realiza el krigado de la desviación estándar, con ésta y las Ecuaciones (3.5) y (3.6) se obtiene el valor krigado de la transmisividad y de la desviación estándar respectivamente.

Se determinan las transmisividades máximas y mínimas por medio de las siguientes expresiones:

$$T_{min} = Z^* - \delta \quad (4.1)$$

$$T_{max} = Z^* + \delta \quad (4.2)$$

donde T_{min} y T_{max} son las transmisividades mínimas y máximas respectivamente, Z^* es el valor krigado de la transmisividad y δ es la desviación estándar de la estimación del krigado.

La estimación de la transmisividad máxima y mínima al determinarla con +/- una desviación estándar proporciona un 68% de confiabilidad en los valores resultantes.

Se ha de señalar que para el cálculo de transmisividad mínima se condicionó el resultado, si es negativo se toma la $T_{min} = 30,38 \text{ m}^2/\text{d}$ para un abatimiento $s=110\text{m}$ que es el valor umbral para el estudio del acuífero.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestran los mapas de transmisividades máximas y mínimas respectivamente y en el Anexo II, Tabla II.1, los valores tabulados.

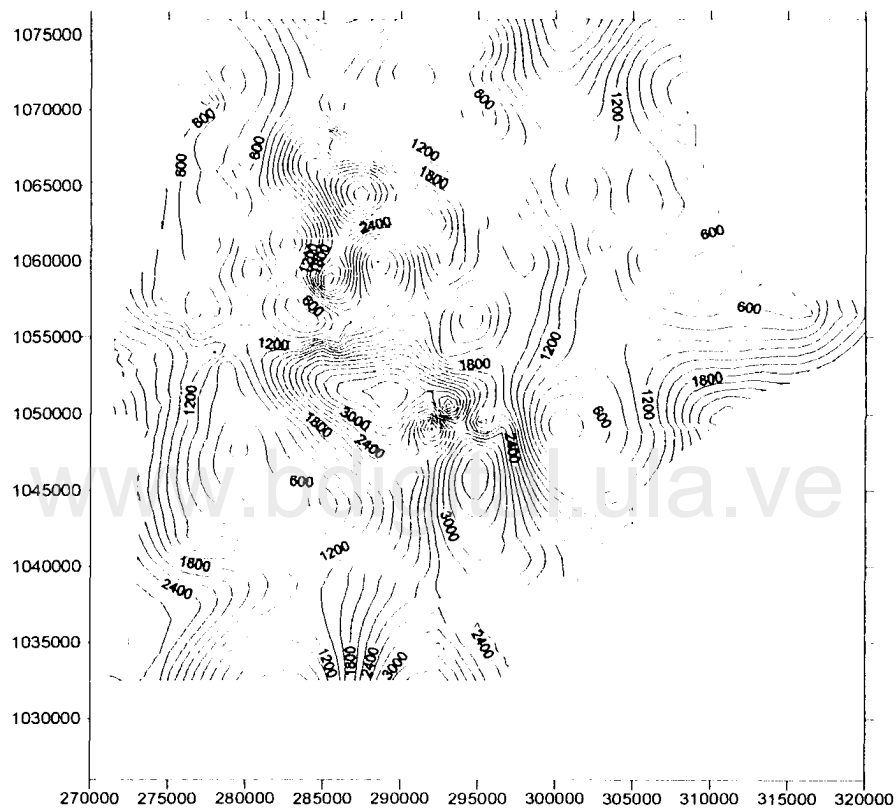


Figura 4.1. Mapa de transmisividad máxima estimada

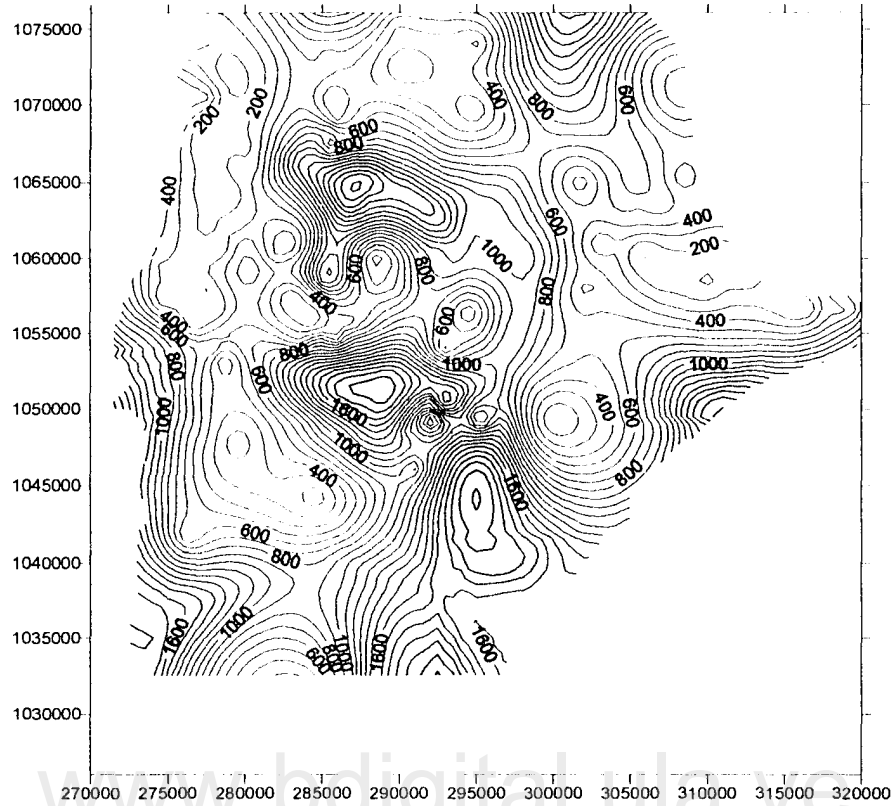


Figura 4.3.. Mapa de errores en la transmisividad estimada

4.1.2. Intervalo de abatimiento con transmisividad estimada

Se calculó el abatimiento con la Ecuación (3.7), con los valores estimados de transmisividad máxima y mínima.

Los resultados que muestran los intervalos de abatimiento se encuentran en el Anexo II, Tabla II.2, con base en ellos, se afirma que el abatimiento máximo se consigue para la transmisividad mínima, esto es debido a que el cono de abatimiento va aumentando su profundidad hasta que exista la suficiente percolación a través de la formación acuífera, para llegar a un equilibrio con la descarga; y el abatimiento es mínimo para una transmisividad máxima, esto es en las zonas del acuífero que presenta una buena capacidad transmisora donde no se ameritan abatimiento elevados para que se produzca el equilibrio con la descarga.

Con los valores estimados de abatimiento máximo y mínimo se generaron los mapas para cada abatimiento, en la Figura 4.4 se presenta el mapa para abatimientos máximos y en la Figura 4.5 el mapa para abatimientos mínimos.

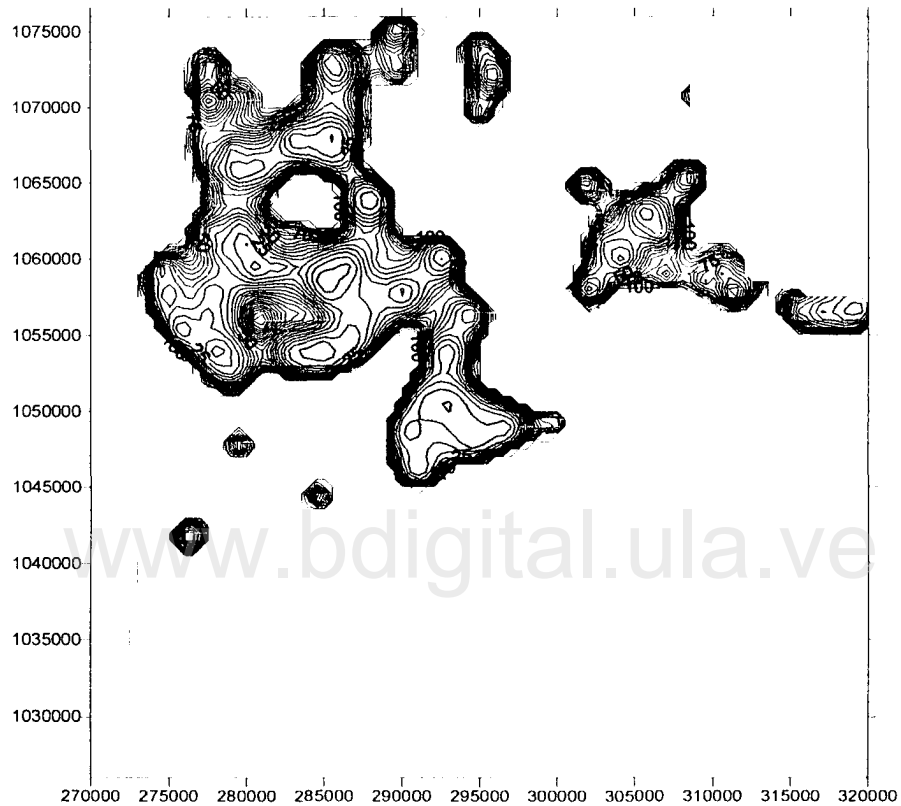


Figura 4.4. Mapa abatimiento máximo calculado con transmisividad difusa

Se corrobora en la Figura 4.4 que en la zona donde se obtienen los menores abatimientos máximos coincide con la ubicación de las transmisividades máximas y los mayores abatimientos máximos en las áreas que presentan transmisividades mínimas.

Se observa además que existen zonas donde el abatimiento que se presenta es igual a la profundidad del acuífero, o sea 110 m, esto indica que la transmisividad estimada en esa área es pequeña y el error de estimación es grande, por lo que al hacer el krigado se toma una transmisividad igual a $30 \text{ m}^2/\text{d}$ y el resultado en el abatimiento máximo es el valor umbral. Esto implica claramente que en esa zona la capacidad transmisora del acuífero no es buena.

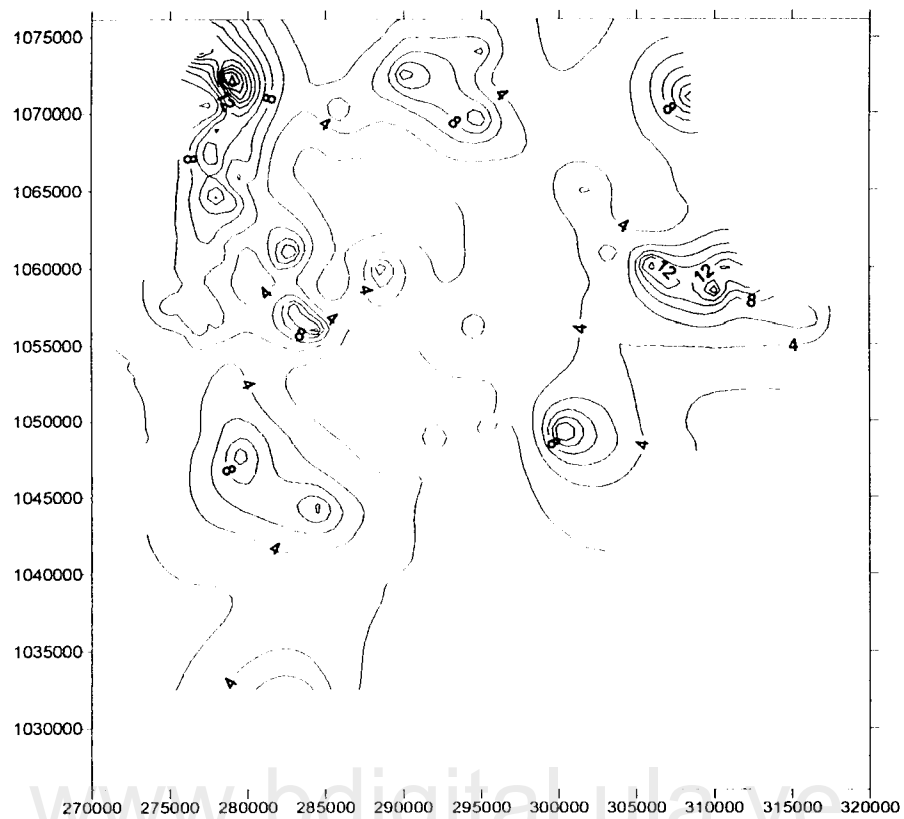


Figura 4.5. Mapa de abatimiento mínimo calculado con transmisividad difusa

En la Figura 4.5, el mapa de abatimiento mínimo se observa que los abatimientos no presentan variación significativa.

4.1.3. Función de pertenencia del intervalo de abatimiento

El abatimiento estimado, se representa por un número difuso de forma triangular, con un centro igual al valor calculado para cada caso y un apoyo igual a la diferencia entre los valores máximos y mínimos estimados del abatimiento para cada caso; como los valores extremos son conseguidos de una estimación por krigeado, se considera esta amplitud como un valor representativo de la imprecisión alrededor del valor observado de abatimiento.

El soporte del número difuso triangular puede variar en función de la precisión deseada de los resultados.

La Figura 4.6 representa la función de pertenencia para el intervalo de abatimiento estimado en cada caso.

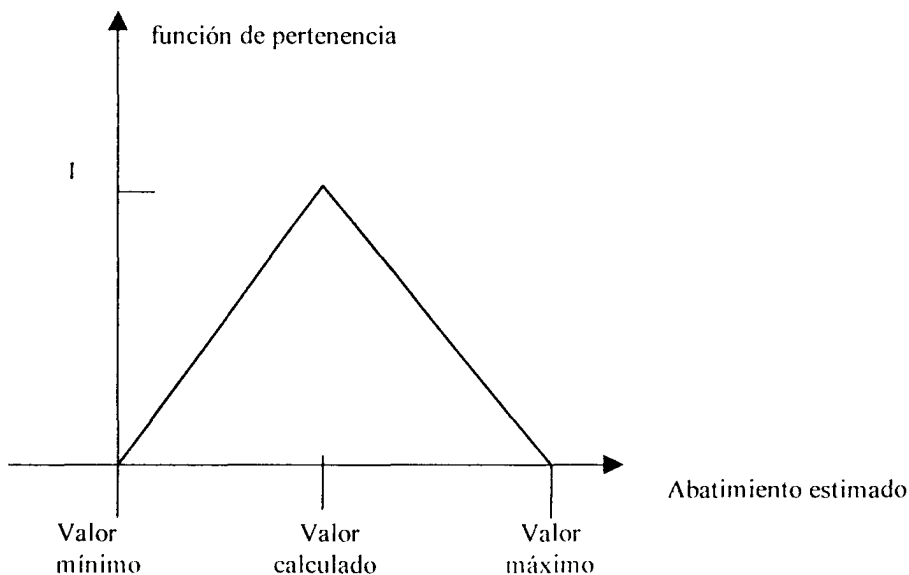


Figura 4.6. Forma general de la función de pertenencia para el intervalo de abatimiento estimado.

Entre los intervalos de variación del abatimiento resultantes, presentados en el Anexo II, Tabla II.2, se tienen:

Coordenada x	Coordenada y	smax	smin	scalculado
276500	1042000	23,65	3,45	7,73
282500	1052500	77,38	1,97	5,59

Siendo *smax* y *smin* el valor máximo y mínimo respectivamente, que puede tomar el abatimiento en ese punto, donde solo el parámetro transmisividad es estimado y *scalculado* es el abatimiento calculado con transmisividad estimada, Tabla I.4.

Las Figuras 4.7 y 4.8 ilustran la función de pertenencia de los resultados obtenidos en las coordenadas 276500 – 1042000 y 282500 – 1052500.

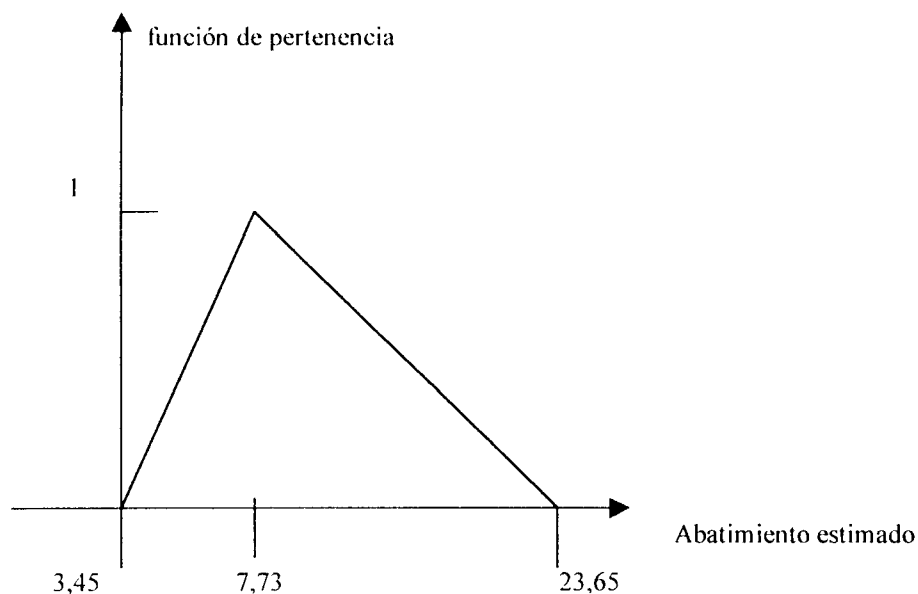


Figura 4.7 Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento estimado en las coordenadas 276500-1042000

www.bdigital.ula.ve

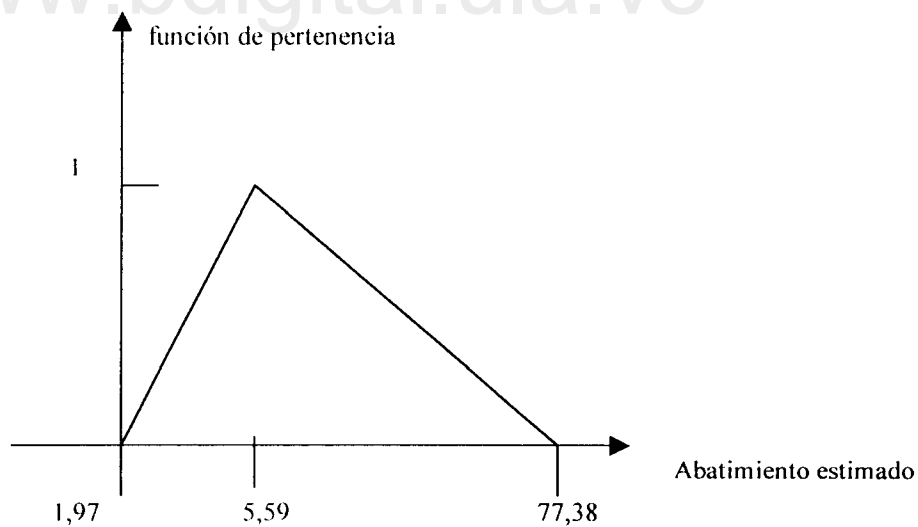


Figura 4.8 Función de pertenencia para el intervalo de abatimiento estimado en las coordenadas 282500-1052500

Como no se obtuvo un único valor de imprecisión entre el valor observado y los valores máximos y mínimos, sino una gama de valores de cómo puede variar el abatimiento en cada coordenada con respecto al observado, se puede considerar una clasificación de vulnerabilidad con referencia a la transmisividad parámetro impreciso en éste caso, diciendo que la unidad hidrológica estudiada será susceptible de pertenecer a la vez a la zona “medianamente vulnerable” y a la “fuertemente vulnerable”.

Adimensionalizando la función de pertenencia, dividiendo por el valor calculado, para comparar ambas funciones, se tiene:

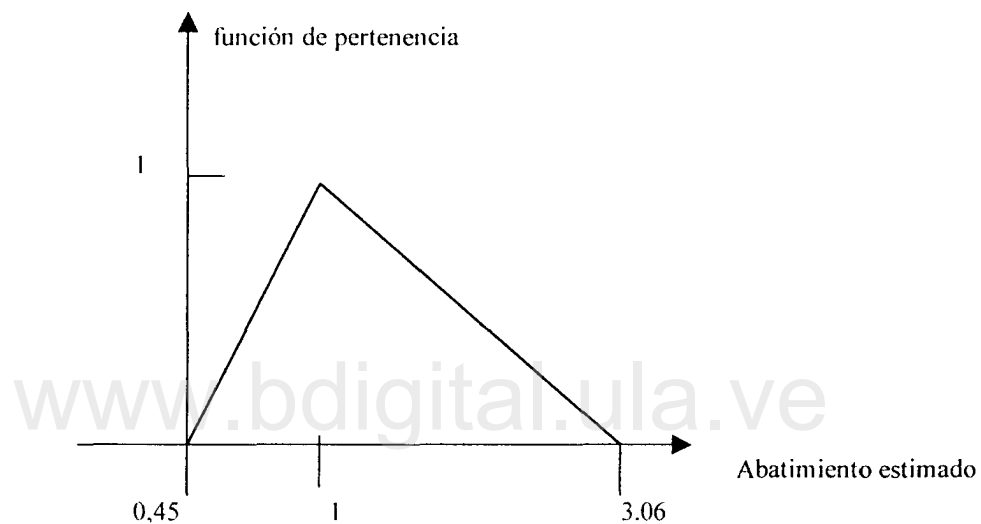


Figura 4.9. Función de pertenencia adimensional coordenada 276500 - 1042000

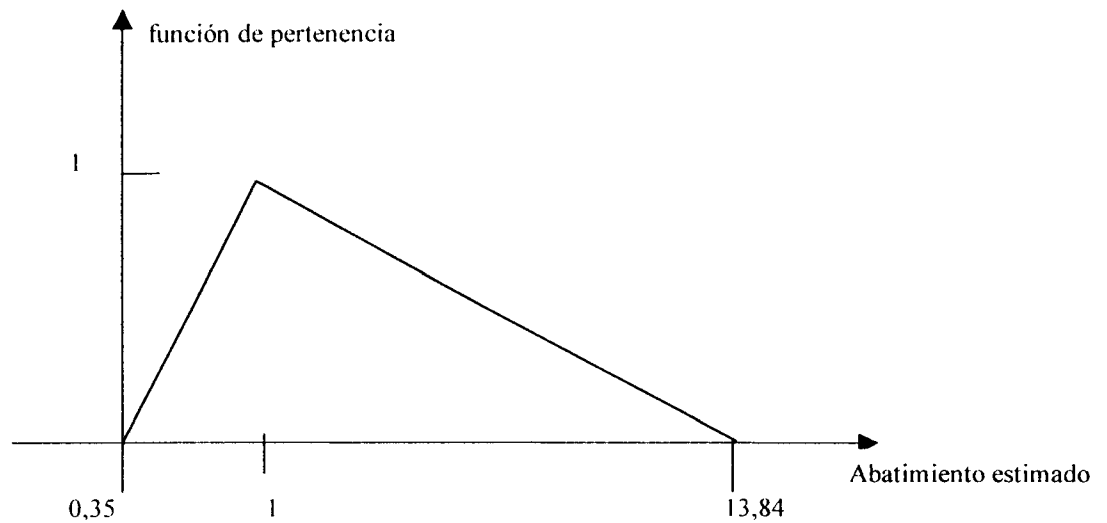


Figura 4.10. Función de pertenencia adimensional coordenada 282500 – 1052500

Se observa, en las Figuras 4.9 y 4.10, la variación en los apoyos de los intervalos difusos, lo que indica que la imprecisión con respecto al valor calculado es diferente en cada intervalo, donde los valores extremos son obtenidos por estimaciones, la mayor amplitud se presenta con el valor máximo lo que implica mayor imprecisión, y se muestra la influencia del valor mínimo, que corresponde al abatimiento mínimo el cual fue el resultado de las estimaciones con transmisividad máxima.

4.1.4. Imprecisión en la estimación del intervalo de abatimiento

La imprecisión relativa del intervalo de abatimiento con el abatimiento calculado con transmisividad estimada, Anexo I, Tabla I.4, se determinó con la Ecuación (3.10), obteniéndose así el mapa de imprecisión en el intervalo de abatimiento, Figura 4.11, presentando los valores en el Anexo II, Tabla II.3, de donde se obtienen los siguientes valores:

Imprecisión mínima = 1,309
 Imprecisión máxima = 45,715
 Media = 9,099
 Desviación standar = 4,859

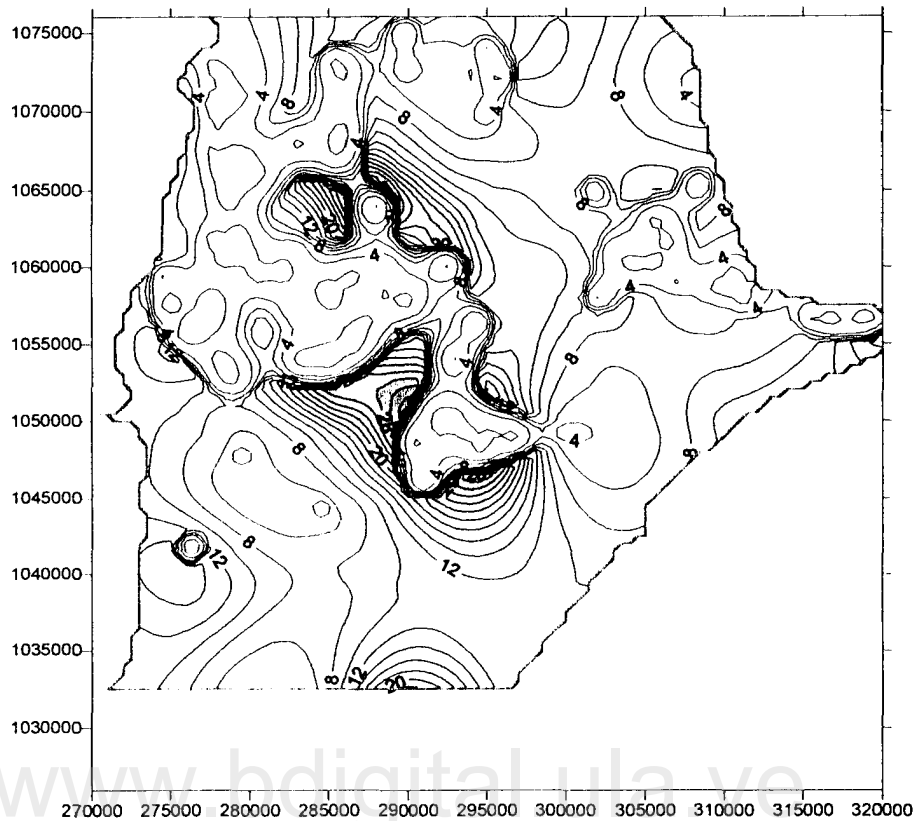


Figura 4.11. Mapa de imprecisión en el intervalo de abatimiento estimado con transmisividad estimada.

Se observa, en la Figura 4.11, la influencia de los valores extremos sobre los observados, ya que solo en parte de la zona central y hacia el nor-oeste del acuífero se puede decir que la imprecisión es baja, y que en el resto del acuífero la imprecisión en la estimación del intervalo de abatimiento es alta.

Observando la Figura 4.4, mapa de abatimientos máximos, y comparando con el mapa de imprecisión del intervalo de abatimiento, se puede decir que la zona donde se da la menor imprecisión coincide con la zona donde se tienen abatimientos máximos y transmisividad mínima, siendo esta zona donde se presentan los errores menores en la estimación de la transmisividad.

4.1.5. Comparación entre los resultados de los intervalos de abatimiento calculado y los intervalos de abatimiento estimado

El hecho de tener un apoyo o amplitud muy grande, como se observa en las Figuras 4.9 y 4.10, no permite dar una información más objetiva de la imprecisión del valor calculado, si no informa únicamente del modelado de los valores extremos que puede tomar el resultado en los casos más desfavorables.

Un apoyo más limitado, como es el caso en las Figuras 3.10 y 3.11, permite tener información más exacta sobre la imprecisión de los valores extremos alrededor del valor calculado; en el intervalo difuso de abatimiento calculado el apoyo es de $\pm \sigma$, el cual corresponde a una estimación de la probabilidad de la cual la variable aleatoria abatimiento pertenece en un 68%.

Analizando las imprecisiones en ambos casos, el mapa de imprecisión de los intervalos de abatimiento calculado, Figura 3.12, y el mapa de imprecisión de los intervalos de abatimiento estimado, Figura 4.11, se ratifica lo que indican las funciones de pertenencia de ambos casos, que la mayor imprecisión se origina donde el apoyo del intervalo difuso no es limitado. En los valores de imprecisión de los intervalos de abatimiento estimado, se tiene:

Imprecisión máxima: 45,715

Imprecisión mínima: 1,309

Media: 9,099

Desviación estándar: 4,859.

En los valores de imprecisión en los intervalos de abatimiento calculado, se tiene:

Imprecisión máxima: 5,66

Imprecisión mínima: 0,23

Media: 1,003

Desviación estándar: 0,547

4.2. ESTIMACIÓN DEL ABATIMIENTO PARA EL CASO II

Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal

Parámetro constante: Coeficiente de Almacenamiento

4.2.1. Estimación del intervalo de caudal

Se determinan los caudales máximos y mínimos para formar el intervalo mediante las expresiones siguientes:

$$Q_{\max} = Z^* + \delta \quad (4.3)$$

$$Q_{\min} = Z^* - \delta \quad (4.4)$$

donde Q_{\max} y Q_{\min} son caudal máximo y mínimo respectivamente, Z^* valor krigado del caudal y δ es la desviación estándar de la estimación del krigado.

Para el cálculo del caudal mínimo se condicionó el resultado: si es negativo se toma cero, asumiendo que en ese punto el caudal es cero.

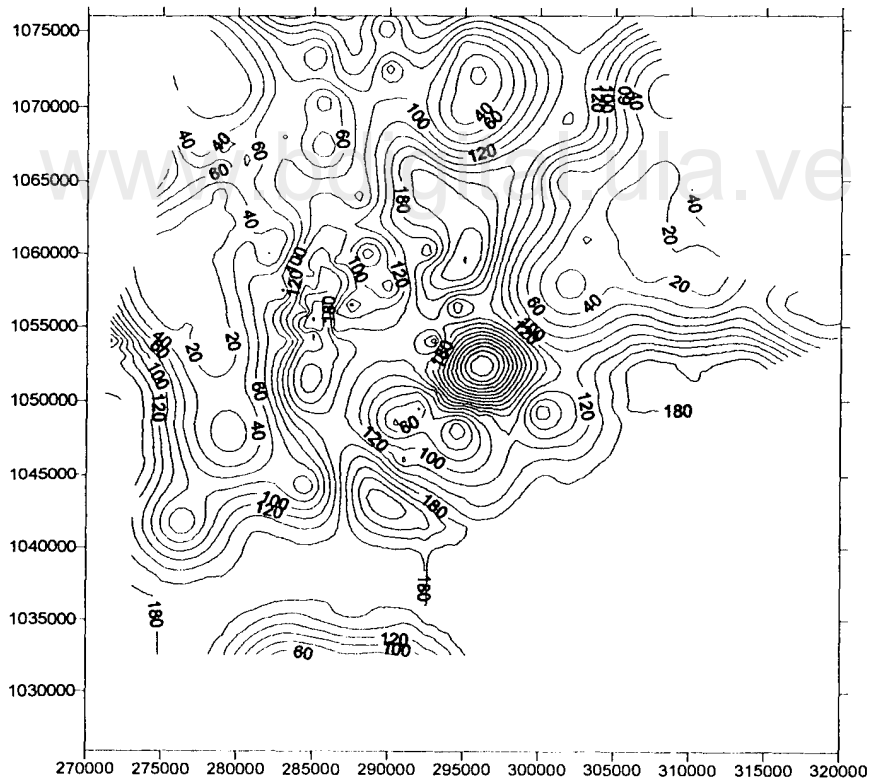


Figura 4.12. Mapa caudal máximo estimado

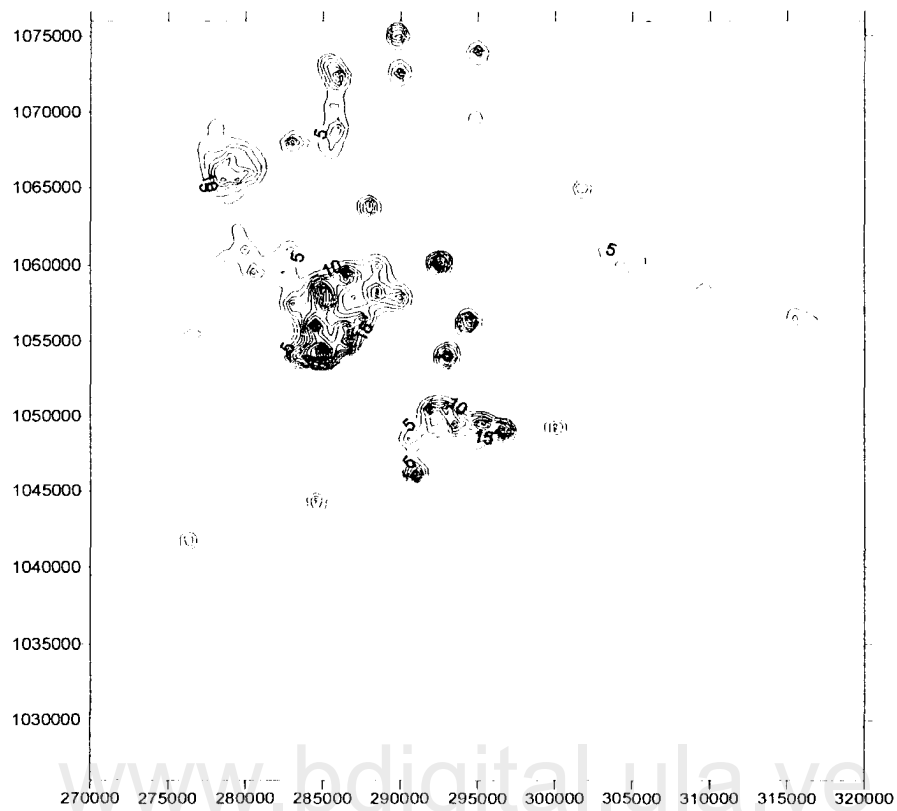


Figura 4.13. Mapa caudal mínimo estimado.

En el mapa de caudal máximo, Figura 4.12, y en el mapa de caudal mínimo, Figura 4.13, se presentan numerosos conos invertidos donde disminuye o aumenta el caudal. Se puede decir que se presenta una elevada incertidumbre en la estimación de estos valores máximos y mínimos, lo que se evidencia en el mapa de errores de estimación del caudal, Figura 4.14, presentándose desde la zona central hacia la zona este errores bastante altos y en la zona cercana al lago se observa una ligera reducción de los errores, sitio donde se concentra la mayor densidad de pozos.

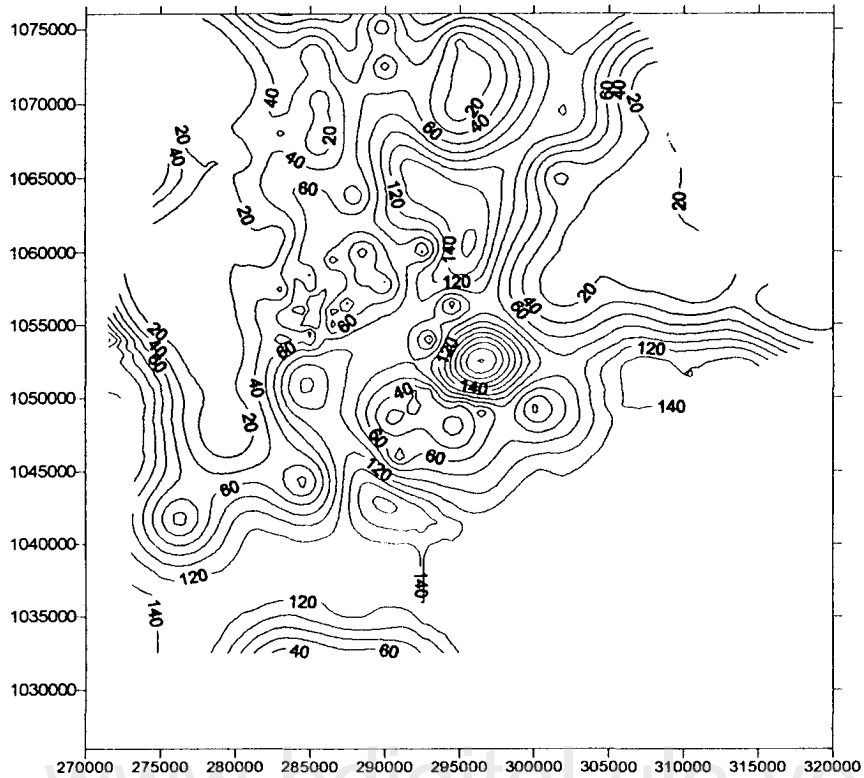


Figura 4.14. Mapa de errores en el del caudal estimado.

En el Anexo II, Tabla II.4, se presentan los valores tabulados de caudal máximo y caudal mínimo.

4.2.2. Intervalo de abatimiento con transmisividad y caudal estimados

Se calculó el abatimiento con la Ecuación (3,7) tomando en cuenta que los parámetros difusos son transmisividad y caudal.

Se realizaron las combinaciones, con los valores máximos y mínimos de la transmisividad y caudal, para estimar el abatimiento, de la manera siguiente:

- Abatimiento 1 se usó caudal mínimo, transmisividad mínima
- Abatimiento 2 se usó caudal máximo, transmisividad mínima
- Abatimiento 3 se usó caudal mínimo, transmisividad máxima
- Abatimiento 4 se usó caudal máximo, trahsmisividad máxima.

Los valores de transmisividad son los estimados en el caso I, Tabla II.1 y los intervalos de caudal son los generados en el aparte 4.2.1., presentados en el Anexo II, Tabla II.4

Calculados los abatimientos, presentados en el Anexo II, Tabla II.5, se descarta el abatimiento 2, porque los resultados obtenidos son muy altos pasando del valor umbral que para este estudio es una profundidad de 110 m; se realizaron con los abatimientos 1,3,4 las posibles combinaciones para construir los intervalos de abatimiento, entre estas se tienen $[s_1-s_3]$, $[s_1-s_4]$, $[s_3-s_1]$, $[s_3-s_4]$, $[s_4-s_1]$ y $[s_4-s_3]$ descartándose las primeras cuatro combinaciones, ya que el programa SURFER 7.0 da como resultado error matemático o totalmente cero; quedando los intervalos $[s_4-s_1]$ y $[s_4-s_3]$.

Se realiza la distribución espacial de los abatimientos 1,3 y 4, en la Figura 4.15 se presenta el mapa para el abatimiento 4; en el Anexo II, Figura II.1, se muestra el mapa para el abatimiento 1 y en la Figura II.2 el mapa para el abatimiento 3.

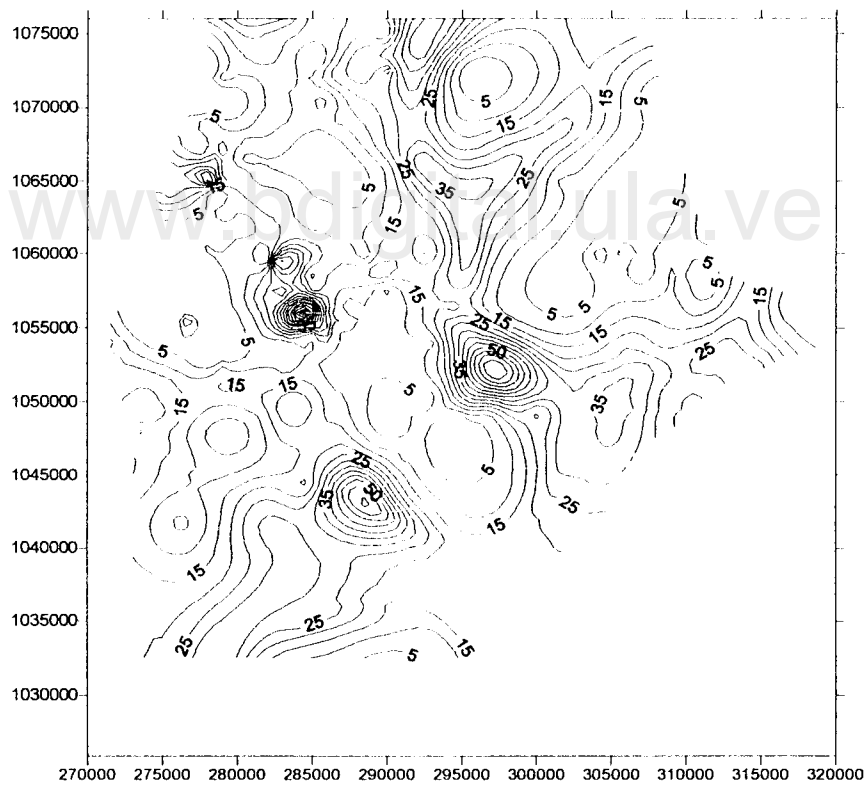


Figura 4.15. Mapa del abatimiento 4 estimado.

El mapa del abatimiento 4, Figura 4.15, presenta conos invertidos en la zona central donde el abatimiento va aumentando. Esta área coincide con la zona donde la imprecisión en la estimación del caudal es más alta, o sea donde se presentan los mayores errores en la estimación.

4.2.3. Función de pertenencia del intervalo de abatimiento

De los resultados obtenidos de los intervalos de abatimiento, Anexo II, Tabla II.5, se tomaron los valores siguientes, para construir la función de pertenencia.

Coordenada x	Coordenada y	s_1	s_3	s_4	scalculado
276500	1042000	1,08	0,069	8,35	8,16
282500	105200	0,29	0,037	10,41	9,73

Para los intervalos definidos anteriormente, en $[s_4-s_1]$ se tiene como abatimiento máximo s_4 y mínimo s_1 , para $[s_4-s_3]$ el abatimiento mínimo es s_3 .

La Figura 4.16 ilustra la función de pertenencia para el intervalo $[s_4-s_1]$, en las coordenadas 276500-1042000, y en las coordenadas 282500-1052500 la Figura 4.17.

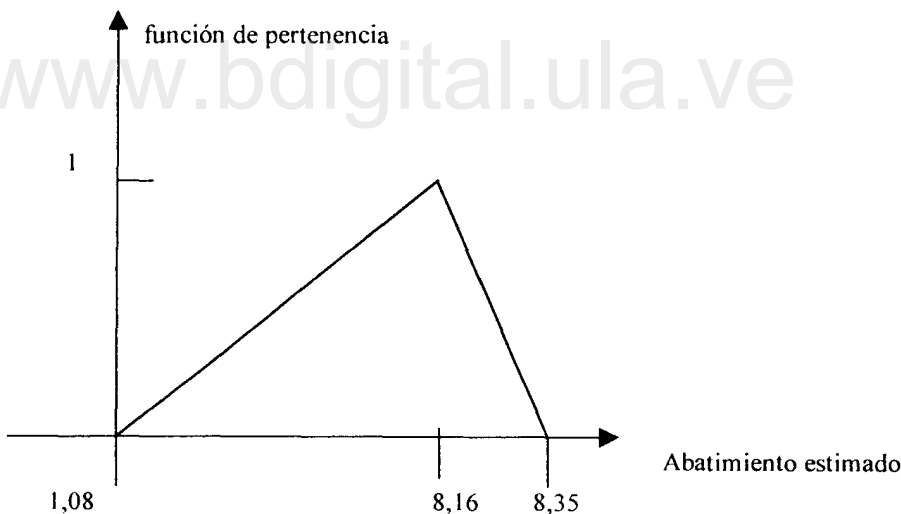


Figura 4.16. Función de pertenencia para $[s_4-s_1]$ con transmisividad y caudal difusos en la coordenada 276500-1042000.

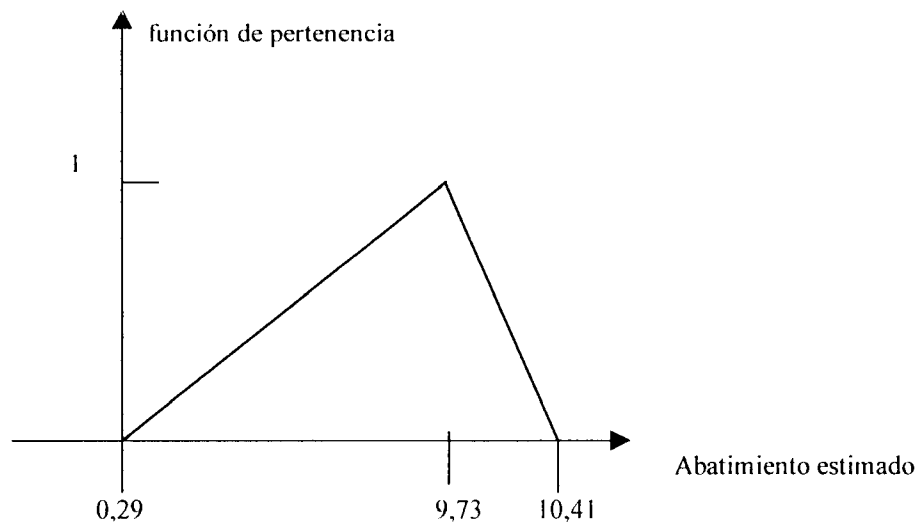


Figura 4.17. Función de pertenencia para $[s_4-s_1]$ con transmisividad y caudal difusos en la coordenada 282500-1052500.

La función de pertenencia para el intervalo $[s_4-s_3]$ en las coordenadas 276500-1042000, se muestra en la Figura 4.18, y en las coordenadas 282500-1052500 la Figura 4.19.

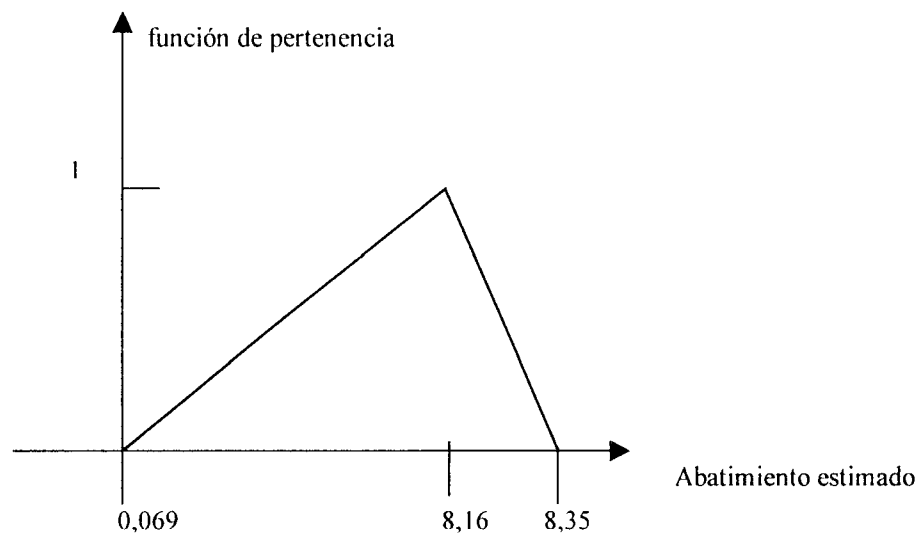


Figura 4.18. Función de pertenencia para $[s_4-s_3]$ con transmisividad y caudal difusos en la coordenada 276500-1042000.

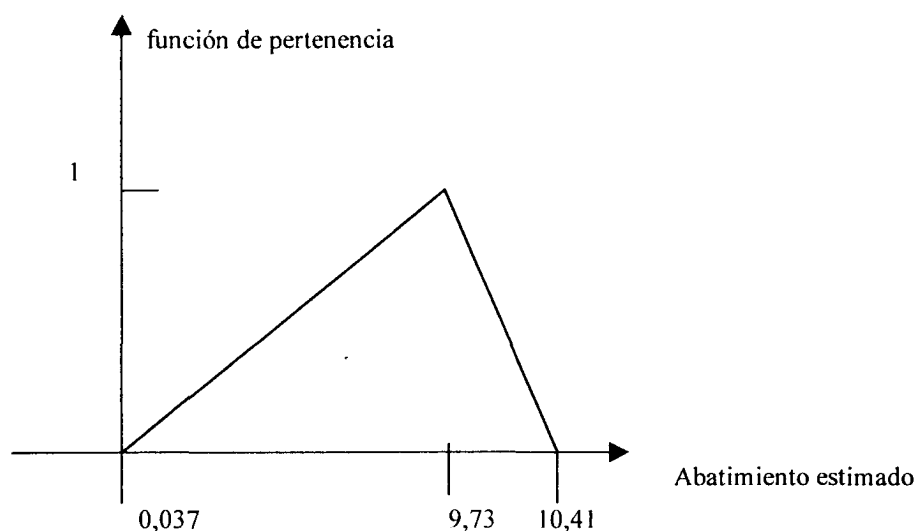


Figura 4.19. Función de pertenencia para $[s_4-s_3]$, con transmisividad y caudal difusos en la coordenada 282500-1052500.

Se adimensionan las funciones de pertenencia, para realizar las comparaciones para $[s_4-s_1]$ en las coordenadas 276500-1042000, Figura 4.20, y en la coordenada 282500-1052500, Figura 4.21.

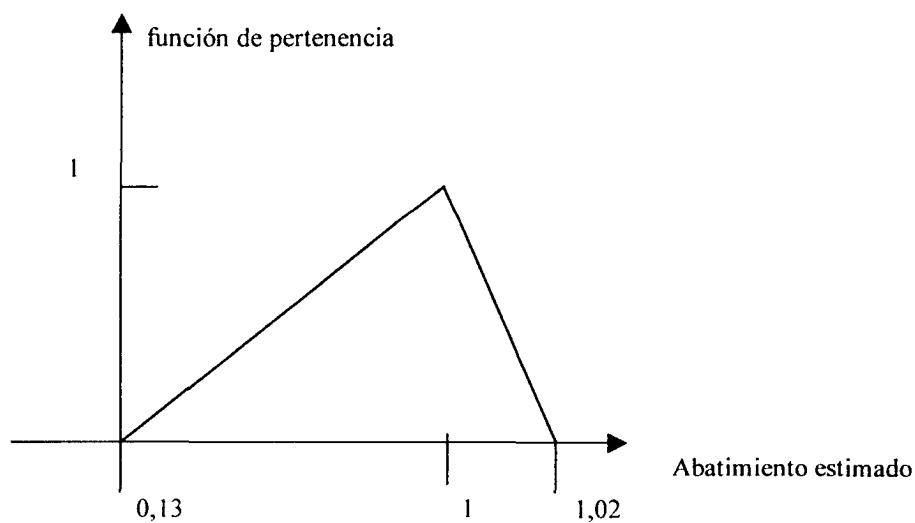


Figura 4.20. Función de pertenencia adimensional, para el intervalo $[s_4-s_1]$ en la coordenada 276500-1042000.

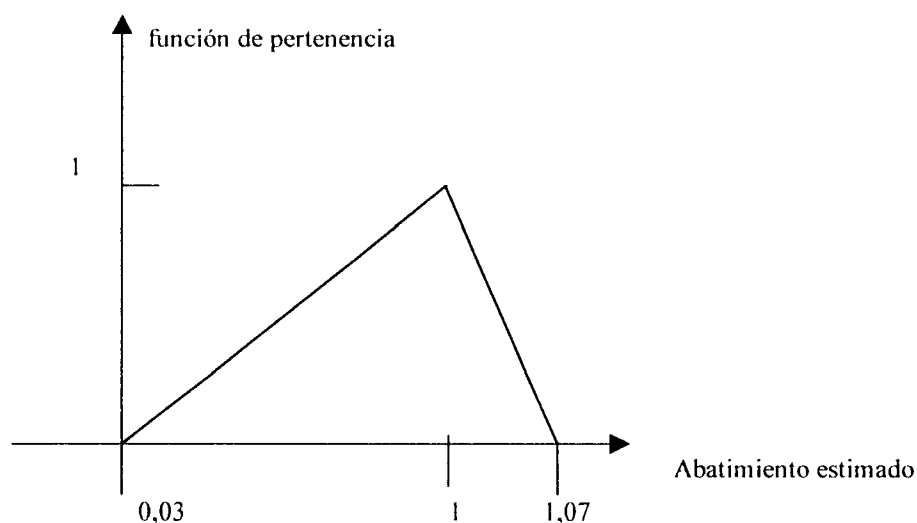


Figura 4.21. Función de pertenencia adimensional para el intervalo $[s_4-s_1]$ en la coordenada 282500-1052500.

Se observa en las funciones de pertenencia adimensionales para $[s_4-s_1]$, Figura 4.20 y Figura 4.21, que hay muy poca variación en el apoyo del intervalo difuso con respecto al valor calculado, presentándose mayor amplitud hacia el valor mínimo; es evidente la influencia del valor máximo, s_4 , el cual es el resultado de la combinación de los parámetros transmisividad y caudal máximo.

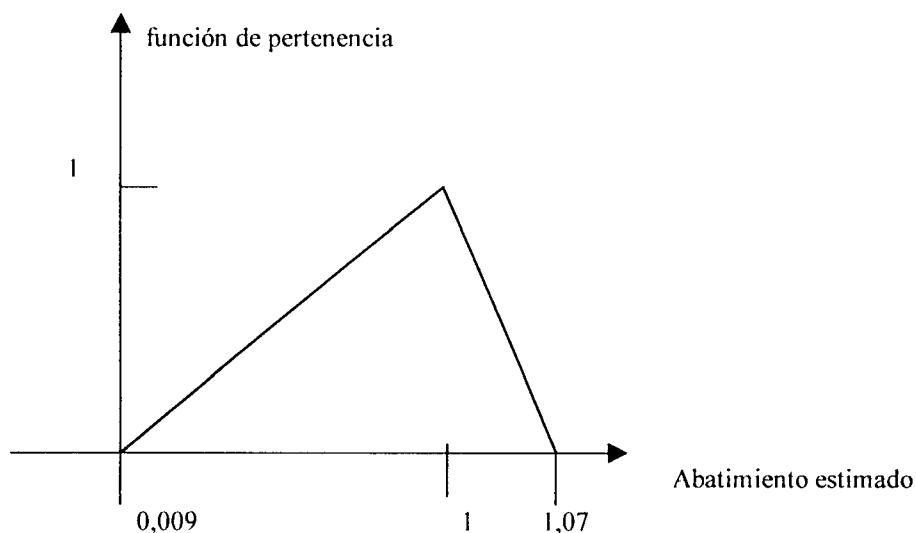


Figura 4.22. Función de pertenencia adimensional para $[s_4-s_3]$ en la coordenada 276500-1042000

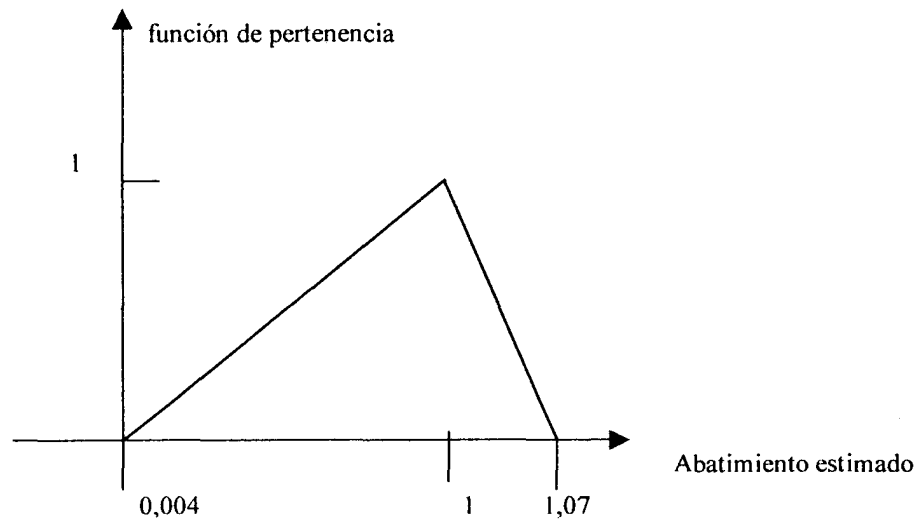


Figura 4.23. Función de pertenencia adimensional para $[s_4-s_3]$ en la coordenada 282500-1052500.

Adimensionalizando las funciones de pertenencia para $[s_4-s_3]$ en la coordenada 276500-1042500, Figura 4.22, y en la coordenada 282500-1052500, Figura 4.23, se observa igualmente la poca variación en el apoyo del intervalo difuso y la influencia del valor máximo, en este caso también s_4 .

4.2.4. Imprecisión en la estimación del abatimiento

El cálculo de la imprecisión relativa de los abatimientos estimados con el abatimiento calculado con transmisividad y caudal estimado, se realizó con la Ecuación (3.10).

Se realizó el cálculo para los dos intervalos de abatimiento seleccionados $[s_4-s_1]$ y $[s_4-s_3]$ con respecto al abatimiento calculado, el cual se presenta en la Tabla I.7, del Anexo I.

De la imprecisión para el intervalo $[s_4-s_1]$, Figura 4.24, resultan los siguientes valores:

Imprecisión mínima = 0,000018

Imprecisión máxima = 3,14

Media = 1,15

Désviación estándar = 0,3643

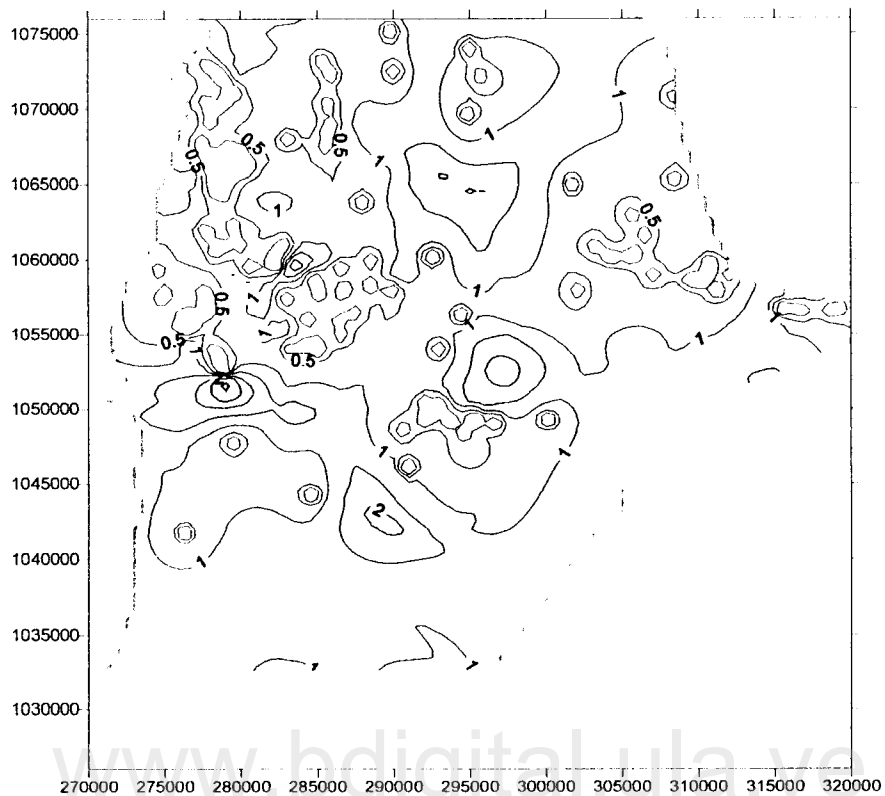


Figura 4.24. Mapa de la imprecisión del intervalo de abatimiento $[s_4-s_1]$ estimado con transmisividad y caudal difusos.

Los valores tabulados para el intervalo $[s_4-s_1]$, se presentan en el Anexo II, Tabla II.6.

En la Figura 4.24 se observa que la imprecisión en la zona central es alta y coincide con el área donde la imprecisión en la estimación de caudal es mayor, influyendo en éstos resultados que el número de datos de caudal tomados de pruebas de bombeo es pequeño y el resto de los valores son los generados por estimación usando el método del krigado.

Para la imprecisión del intervalo $[s_4-s_3]$, Figura 4.24 se tiene:

Imprecisión mínima = 0,032

Imprecisión máxima = 3,42

Media = 1,05

Desviación estándar = 0,322

Se presentan los valores tabulados en el Anexo II, Tabla II.6

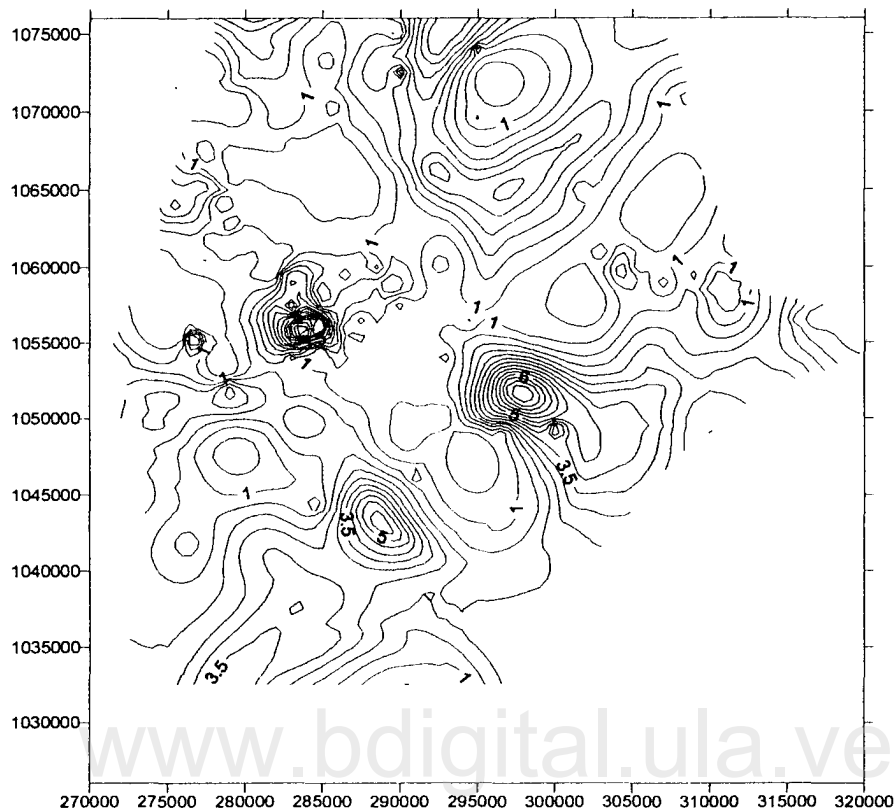


Figura 4.25. Mapa de la imprecisión del intervalo de abatimiento $[s_4-s_3]$ estimado con transmisividad y caudal difusos.

En la Figura 4.25 se observa que la imprecisión del intervalo $[s_4-s_3]$, con respecto al abatimiento observado, sigue siendo alta en la zona central, aunque en el resto del acuífero la imprecisión baja.

4.2.5. Comparación entre los resultados de los intervalos de abatimiento calculado y los intervalos de abatimiento estimado

Observando las funciones de pertenencia para los intervalos de abatimiento estimados con las combinaciones de los valores máximos y mínimos de transmisividad y caudal y las funciones de pertenencia para el abatimiento calculado con caudal y transmisividad difusos, Figura 3.18 y Figura 3.19, se puede decir que la imprecisión con respecto al valor máximo es menor en el intervalo de abatimiento estimado que en el intervalo de abatimiento calculado, se toma como

referencia el apoyo de la función de pertenencia para el intervalo de abatimiento estimado, sin embargo no se tiene ningún grado de confiabilidad en este intervalo cuyos límites son estimados.

Si se observa el mapa de imprecisión del abatimiento calculado, Figura 3.20, se presenta:

Imprecisión máxima: 18,45
Imprecisión mínima: 0,16
Media: 1,24
Desviación estándar: 1,23

Para la imprecisión en el intervalo $[s_4-s_1]$, Figura 4.24, se tiene:

Imprecisión máxima: 3,14
Imprecisión mínima: 0,0000187
Media: 1,15
Desviación estándar: 0,3643

De la imprecisión para el intervalo $[s_4-s_3]$, Figura 4.25, se tiene:

Imprecisión máxima: 3,42
Imprecisión mínima: 0,032
Media: 1,05
Desviación estándar: 0,322

Con estos resultados se evidencia la influencia del valor máximo de abatimiento que fue estimado para valores de transmisividad y caudal máximo, proporcionando estos una menor imprecisión en la estimación del abatimiento.

4.3. ESTIMACIÓN DEL ABATIMIENTO PARA EL CASO III

Parámetros difusos: transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento.

4.3.1. Estimación del intervalo de coeficiente de almacenamiento

Se determinan los valores de coeficiente del almacenamiento máximos y mínimos mediante las expresiones:

$$S_{\max} = \frac{Z^* + \delta}{1000} \quad (4.5)$$

$$S_{\min} = \frac{Z^* - \delta}{1000} \quad (4.6)$$

donde S_{\max} y S_{\min} son coeficiente de almacenamiento máximo y mínimo respectivamente, Z^* valor krigado del coeficiente de almacenamiento y δ desviación estándar de la estimación del krigado.

Dividiendo la Ecuación (4.5) y la Ecuación (4.6) por 1000 para trabajar con los valores reales de coeficiente de almacenamiento, se obtuvo se obtuvo el mapa de coeficiente de almacenamiento máximo, Figura 4.26, y el mapa de coeficiente de almacenamiento mínimo, Figura 4.27.

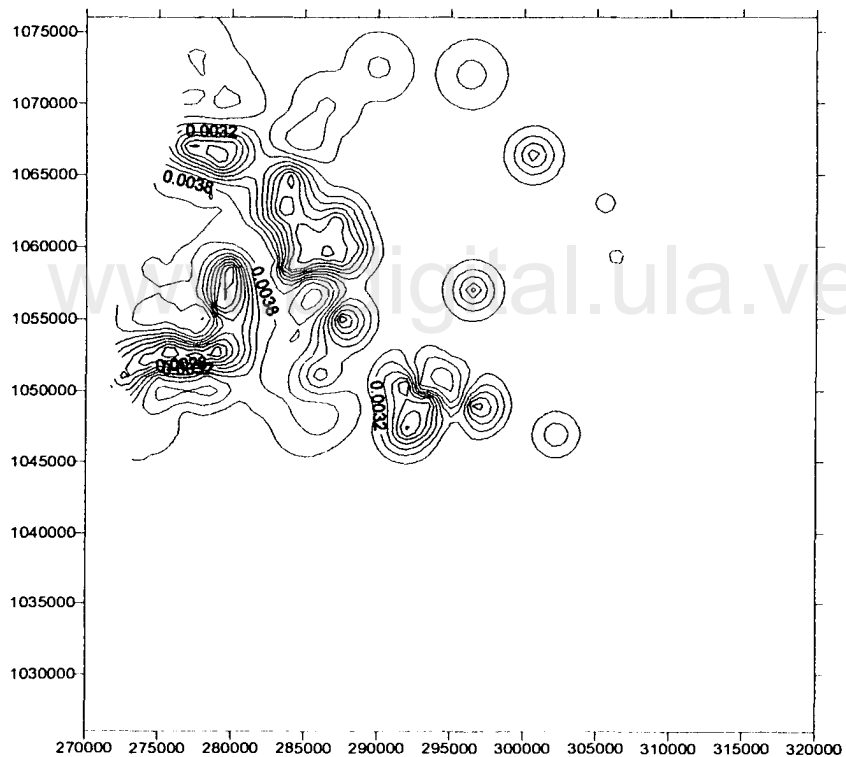


Figura 4.26. Mapa de coeficiente de almacenamiento máximo estimado.

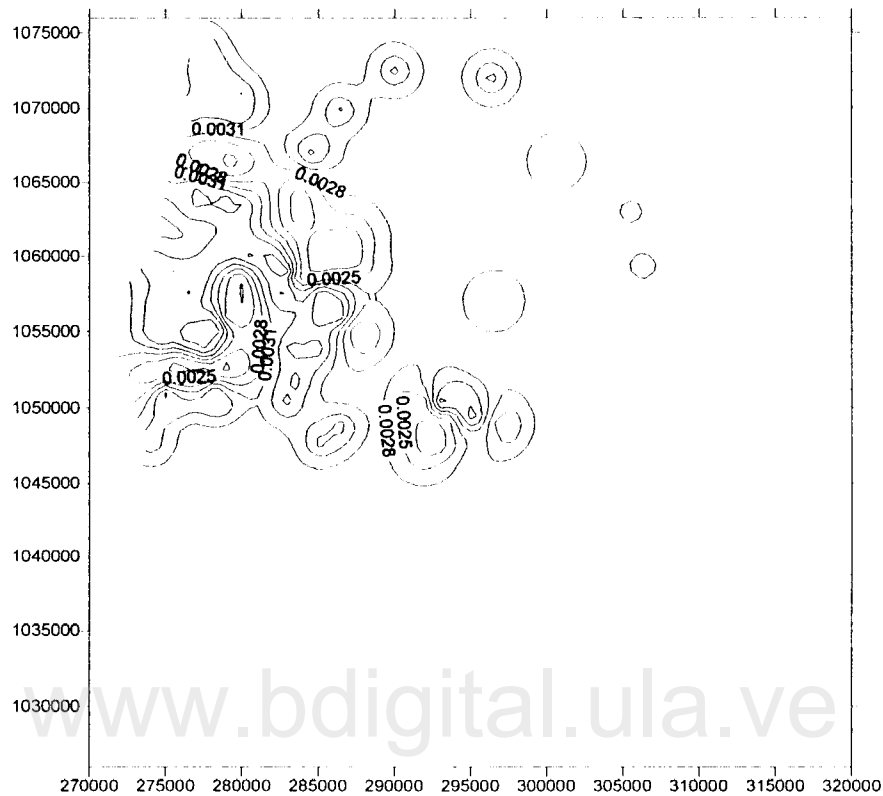


Figura 4.27. Mapa de coeficiente de almacenamiento mínimo estimado

Se observa en ambos mapas que la variabilidad en los valores se presentan en la parte oeste – centro de los mapas, en los cuales no se presenta consistencia en los trazados de las curvas.

4.3.2. Intervalo de abatimiento con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento estimados

Se calculó el abatimiento con la Ecuación (3.7) teniendo tres parámetros difusos: transmisividad, con los valores estimados en el caso I, los valores de caudal estimados en el caso II y valores del coeficiente de almacenamiento generados en el aparte 4.3.1.

Haciendo las combinaciones con los valores máximos y mínimos de cada parámetro se tienen ocho abatimientos.

Abatimiento 1 se usó $Q_{\text{mínimo}}$, $t_{\text{mínima}}$, $S_{\text{mínimo}}$
 Abatimiento 2 se usó $Q_{\text{mínimo}}$, $t_{\text{máxima}}$, $S_{\text{mínimo}}$
 Abatimiento 3 se usó $Q_{\text{máxima}}$, $t_{\text{máxima}}$, $S_{\text{mínimo}}$
 Abatimiento 4 se usó $Q_{\text{mínimo}}$, $t_{\text{mínima}}$, $S_{\text{máximo}}$
 Abatimiento 5 se usó $Q_{\text{mínimo}}$, $t_{\text{máxima}}$, $S_{\text{máximo}}$
 Abatimiento 6 se usó $Q_{\text{máxima}}$, $t_{\text{máxima}}$, $S_{\text{máximo}}$

Solo se usarán los valores para el abatimiento 3 y el abatimiento 6; el resto de los abatimientos se descartan ya que son valores muy altos que pasan del valor umbral de 110 m o son nulos.

El intervalo de abatimiento estimado es entonces $[s_3-s_6]$, el cual se presenta en el Anexo II, Tabla II.7, siendo el abatimiento 3 el máximo y el abatimiento 6 el mínimo.

Se realiza la representación espacial de ambos abatimientos, consiguiéndose que no son significativamente diferentes, como se observa en la Figura 4.28, mapa del abatimiento 3, y en la Figura 4.29, mapa del abatimiento 6.

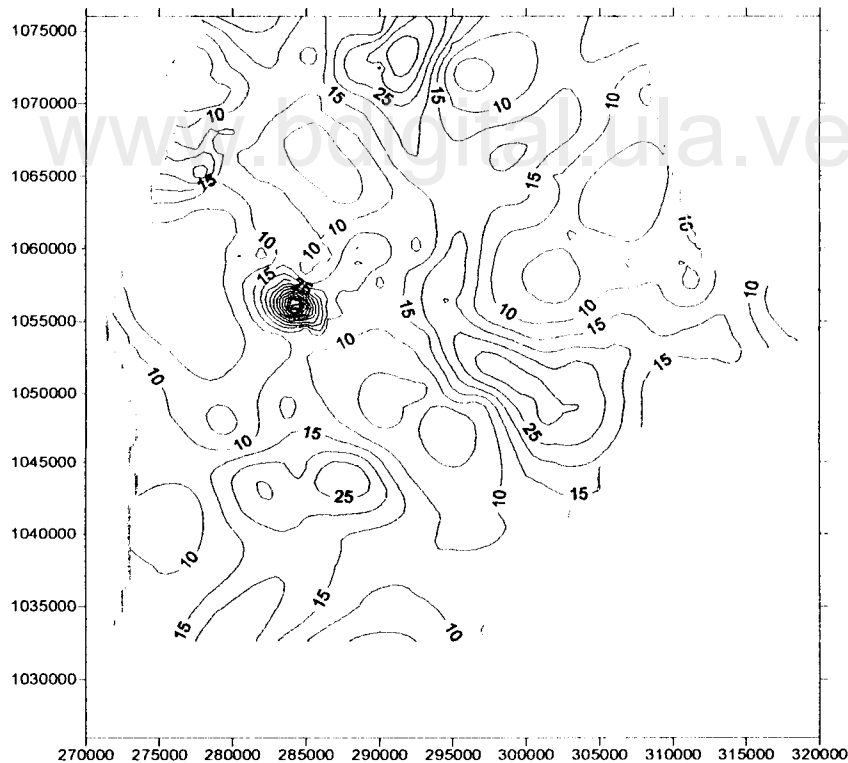


Figura 4.28. Mapa abatimiento 3 estimado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.

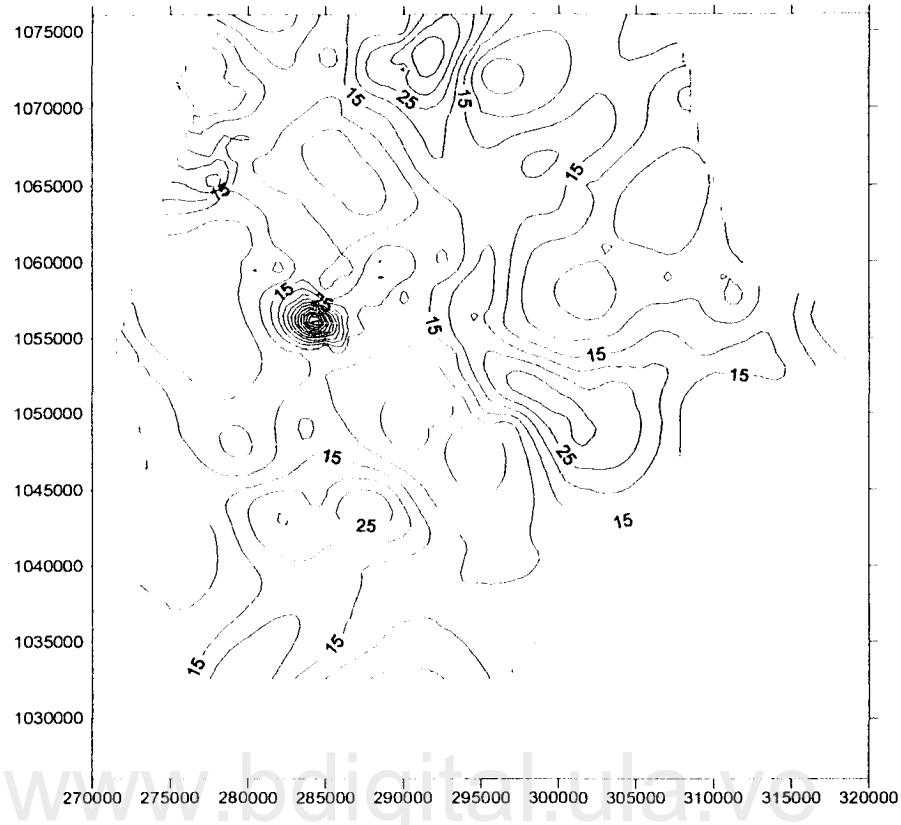


Figura 4.29. Mapa de abatimiento 6 estimado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento difusos.

Al observar que el abatimiento 3, Figura 4.28, donde se combinó $Q_{\text{máximo}}$, $T_{\text{máxima}}$ y $S_{\text{mínimo}}$, y el abatimiento 6, Figura 4.29, en donde se usó $Q_{\text{máximo}}$, $t_{\text{máxima}}$ y $S_{\text{máxima}}$, son iguales, se determina que el coeficiente de almacenamiento no influye significativamente en el abatimiento cuando se presenten transmisividades y caudales máximos, por lo que no se determinará la imprecisión del intervalo con respecto al abatimiento calculado con transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento estimados.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

La cantidad y calidad de los datos disponibles son importantes para el análisis estructural de los mismos lo que influye en la selección del modelo de variabilidad espacial.

Del análisis conceptual y del estudio de los datos surge la conveniencia de realizar una transformación de variables. Esta decisión se apoya en el cálculo de variograma, que se comporta mejor mostrando claramente la estructura de la variable.

El método krigado muestra la tendencia global de los parámetros analizados transmisividad, caudal, coeficiente de almacenamiento y del abatimiento, en los mapas de las variables en la región de estudio y en el de incertidumbre, mediante la desviación típica.

La teoría de los subconjuntos difusos busca tomar en cuenta los límites flexibles para los cuales se aceptan violaciones débiles, atributos y cantidades vagas a partir de la idea de pertenencia a los límites definidos por estimaciones, esto se demuestra en este caso al generar intervalos de las variables cuya amplitud es diferente de acuerdo al grado de imprecisión al determinarlos.

Al expresar los valores de krigado como números difusos caracterizados por la media y la amplitud, puede interpretarse la amplitud de los intervalos estimados por krigado como una nueva medida valedera de la incertidumbre que depende de los valores medidos reales.

Este método basado en la utilización de operaciones con números difusos, permite confirmar la importancia de tomar en cuenta la imprecisión de los parámetros hidrogeológicos en el cálculo de abatimiento.

El soporte del número difuso informa sobre la imprecisión de los valores extremos con respecto a un valor observado o un valor calculado; un apoyo más limitado permite tener información más exacta sobre la imprecisión de los valores extremos alrededor del valor calculado y un soporte muy grande solo informa del modelado de los valores extremos que puede tomar el resultado en los casos más desfavorables.

Un número difuso de la forma “triángulo isósceles” con un soporte limitado por la desviación estándar, permite una buena representación de la imprecisión alrededor del valor calculado sin perder el modelado de los valores extremos.

Se demuestra en todos los casos estudiados, cómo afecta la transmisividad al abatimiento. Aun con valores estimados de transmisividad, es mayor su influencia sobre el abatimiento que la de los parámetros caudal y coeficiente de almacenamiento, definiendo así la transmisividad las características hidráulicas del acuífero. El coeficiente de almacenamiento no tiene influencia significativa sobre el abatimiento.

La noción de función de pertenencia de un determinado valor de la variable estudiada toma mayor fuerza si es utilizada con fines de gestión, aportando nuevos criterios al gestor para fundamentar decisiones.

El análisis de la imprecisión en el intervalo de abatimiento calculado con parámetros difusos y apoyo limitado por la desviación estándar, evidencia mayor imprecisión en el intervalo de abatimiento generado con transmisividad y caudal difusos, lo que implica que a mayor número de parámetros imprecisos mayor será la imprecisión en los resultados.

La imprecisión en el intervalo de abatimiento estimado con un parámetro difuso cuyo apoyo está limitado por valores extremos estimados es mayor que la imprecisión del intervalo de abatimiento calculado con la desviación estándar, lo que indica que un soporte más limitado permite una mejor estimación de la imprecisión alrededor del valor calculado.

No se tiene ningún grado de confiabilidad en los intervalos de abatimiento estimado con dos parámetros difusos y cuyo apoyo está limitado por valores extremos también estimados.

RECOMENDACIONES

Es conveniente realizar el análisis geoestadístico con un número considerable de datos, lo que podría ser un número mayor a 80 muestras. El análisis con un número menor de datos puede llevar a variogramas no representativos de la variabilidad espacial del parámetro en estudio.

Se recomienda tomar en cuenta la imprecisión en los parámetros hidrogeológicos, los cuales por su variabilidad espacial deben ser determinados por numerosas pruebas y medidas de campo muy costosas que son escasamente realizadas en la práctica, por lo que estos parámetros son generalmente estimados.

Las conclusiones basadas únicamente sobre el valor calculado del abatimiento podría originar errores de juicio concernientes al nivel de vulnerabilidad del recurso, por lo que se recomienda comparar la imprecisión alrededor del valor medio de la variable.

Este método se hace más complicado al ir aumentando el número de parámetros imprecisos, lo cual origina numerosas combinaciones para así evaluar desde diferentes planteamientos el comportamiento de las variables, recomendándose por ello realizar un software que permita generar un resultado y un intervalo de variación de este resultado.

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

C.C. Reconocimiento

LITERATURA CITADA

- Amstrong, M. 1984. **Improving the Estimation and Modelling of the Variogram**. In Verly et al. (Eds.). *Geoestistics for Natural Resources Characterization*: D. Reidel, Amsterdam. p.1-19.
- Bardossy, A. 1988. "Notes on the Robustness of the Kriging System", revista **Mathematical Geology**. vol. 20. pp. 189 – 203.
- Bardossy, A.; I. Bogardi y W.E, Kelly. 1990. "Kriging with Imprecise (Fuzzy) Variograms", revista **Mathematical Geology** vol. 22 N° 1. pp. 63-78.
- Caura y Aata INC. INC. 1997. **Estudio de impacto ambiental**. Proyecto: Perforación explotación exploratoria y producción temprana, bloque la Ceiba. Trujillo, Venezuela.
- Delhomme, J.P. 1978. **Aplication de la theorie des variables regionalisées dans les sciences de l'eau**. Orleáns. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM. III (4): 341-375.
- Deutsch, C. y A. Journel. 1992. **Geostatistical software library and user's guide**. Oxford University Press, Inc 340 p.
- Ewel, J. y A. Madrid. 1968. **Zonas de vida de Venezuela**. Ministerio de Agricultura y Cría. Caracas, Venezuela.
- Freissinet, Catherine. 1997. **Estimation des imprécisions dans la modélisation du devenir des produits phytosanitaires dans les sols : une méthode fondée sur la logique floue**. Tesis Doctorado, Francia, l' Université Joseph Fourier – Grenoble I.
- Grupo de Investigación de Suelos y Aguas. 1997. **Informe Técnico de aforamiento de pozos**. Proyecto 3D la Ceiba. GISA – NURR, Trujillo.
- Journel, A.G. 1985. "The Deterministic Side of Geostatistics", revista **Mathematical Geology**. vol . 17. pp. 1-15.
- Journel, Al y Ch. Huijbregts. 1981. **Mining Geostatistics**. London: Academic Press Inc. 600 p.
- Kaufman, A. 1973. **Introduction à la théorie des sous – ensembles flous – Eléments théoriques de base**. Editions Masson et Cie, p. 410.

- MARNR. 1992. **Plan de uso y evaluación del embalse Agua Viva, Estado Trujillo.** Serie de Informes Técnicos/ DGI / IT / 450. (elaborado por CIDIAT). Mérida, Venezuela. 364 pp + anexos.
- Miyashiro, V.. 1996. **Evaluación estocástica de políticas de explotación del agua subterránea.** Aplicación al acuífero del valle de Quibor. Tesis MSc. Mérida: CIDIAT.
- Mora, L. 1996. **Aplicación de métodos geoestadísticos para el análisis de parámetros de calidad de agua en acuíferos.** Tesis MSc. Mérida: CIDIAT.
- Rodríguez, R. 1996. **Simulación del comportamiento del acuífero de la cuenca baja del río Motatán, bajo diferentes políticas de explotación.** Tesis MSc. Mérida: CIDIAT.
- Samper, F. y J. Carrera. 1990. **Geoestadística: aplicación a la hidrología subterránea.** Editorial CIMINI. BARCELONA. p.481
- Samper, J. 1994. **Métodos estadísticos y geoestadísticos.** en: **Temas actuales de la hidrología subterránea.** Bocanegra, E. y Rapaccini, A-Editores. Universidad Nacional de Mar del Plata. La Plata. pp. 37-38.

www.bdigital.ula.ve

ANEXOS
www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

C.C. Reconocimiento

ANEXO I. Anexo correspondiente al capítulo 3.

www.bdigital.ula.ve

C.C. Reconocimiento

www.bdigital.ula.ve

C.C. Reconocimiento

Tabla I.1 Valores generados de transmisividad

UTMX	UTMY	TRANSMESTIMADA	LNTRAESTIM	IDENT
285139	1057725	1726,911198	7,454089657	TR5878006A
284838	1058587	2773,302305	7,927794057	TR5878005A
286551	1059407	1737,944687	7,460458479	TR5878004A
279911	1061012	902,3428456	6,804994543	TR5879001A
294433	1056321	329,9996692	5,799091652	TR5878008A
283226	1054017	2772,380942	7,927461776	TR5878015A
284172	1054196	1270,987837	7,147549701	TR5878016A
285116	1053853	1424,866993	7,26183375	TR5878017A
284936	1054438	2023,078815	7,612375796	TR5878018A
286556	1054859	2061,16557	7,631026912	TR5878019A
287449	1056421	513,5411519	6,241330166	TR5878021A
286409	1055843	583,6795577	6,36935213	TR5878022A
292926	1053963	562,1613518	6,331788911	TR5878026A
282190	1059647	2344,675234	7,759902178	TR5878024A
291961	1050435	1643,191422	7,404395619	TR5778003A
293572	1049289	1565,247445	7,355799202	TR5778004A
292937	1050307	4321,373874	8,371328657	TR5778006A
280604	1059503	1207,374146	7,096203153	TR5878003A
295250	1049341	416,7465242	6,032478181	TR5778007A
296651	1048996	2821,117862	7,94488849	TR5778008A
294603	1048239	2394,509795	7,78093381	TR5778031A
318651	1056536	654,499344	6,483870583	TR5876008A
319364	1058836	687,4993109	6,533060827	TR5876002A
294872	1069624	110,1850747	4,70216145	ZU5978027A
294987	1073987	164,8612957	5,105104488	ZU5978030A
295770	1072170	928,3678638	6,833428059	ZU5978031A
290009	1072478	98,1749016	4,586750598	ZU5978011A
289781	1075153	409,8818537	6,015868956	ZU5978013A
285923	1072317	734,6421208	6,59938347	ZU5978002A
285318	1073212	718,3529385	6,576961006	ZU5978003A
285698	1070321	122,2906099	4,80640026	ZU5978005A
278648	1053614	307,7583122	5,729314774	TR5879002A
278887	1052752	218,166448	5,385258294	TR5879006A
278887	1052813	1090,83224	6,994696207	TR5879007A

Tabla I.1 Valores generados de transmisividad (continuación)

UTMX	UTMY	TRANSMESTIMADA	LNTRAESTI	IDENT
278644	1052999	122,718627	4,809894149	TR5879008A
278491	1052938	490,874508	6,196188511	TR5879009A
278161	1053924	1924,998071	7,562680244	TR5879015A
277629	1061978	171,8748277	5,146766466	TR5879021A
279430	1062275	264,7651068	5,578843043	TR5879023A
279521	1062152	470,1577926	6,153068367	TR5879026A
278164	1064741	56,91298643	4,041523548	ZU5879027A
278650	1064523	296,1535493	5,690878068	ZU5879028A
277635	1057768	123,3973122	4,81540933	ZU5879031A
278351	1065508	233,7497657	5,454251166	ZU5879035A
277928	1066187	378,3233202	5,935749175	ZU5879039A
278541	1066613	306,1419876	5,724049006	ZU5879040A
279209	1066179	518,2188202	6,250397586	ZU5879041A
280062	1065990	260,4108796	5,56226069	ZU5879042A
278809	1065567	246,670607	5,508053872	ZU5879043A
279510	1065440	412,1532393	6,02139522	ZU5879044A
279298	1065687	487,7044292	6,189709545	ZU5879045A
280458	1065895	292,7233305	5,679227898	ZU5879046A
280582	1066325	365,950154	5,902497133	ZU5879047A
278235	1066554	72,20069983	4,279449739	ZU5879048A
278970	1066980	319,8296247	5,767788431	ZU5879049A
280069	1067188	162,0047881	5,087625891	ZU5879050A
279551	1067345	201,5084187	5,305831161	ZU5879051A
279125	1067440	338,5341434	5,824624954	ZU5879052A
277389	1067727	118,283014	4,773080176	ZU5879053A
278038	1069198	98,1749016	4,586750598	ZU5879057A
277750	1061855	377,4506021	5,933439705	TR5879019A
277629	1061978	160,4165059	5,077773595	TR5879020A
278649	1064308	264,7651068	5,578843043	ZU5879065A
278984	1064275	62,53178446	4,135674979	ZU5879068A
278629	1060835	316,183258	5,756321976	TR5879088A
278322	1060561	296,3284431	5,691468444	TR5879089A
274563	1059354	376,1490483	5,92998547	TR5879125A
274704	1057386	186,9998126	5,231107615	TR5879132A

Tabla I.2 Valores de Caudal

UTMX	UTMY	Caudal Aforado	LnCaudal	Identif
285139	1057725	80	4,3820266	TR5878006A
284838	1058587	90	4,4998097	TR5878005A
286551	1059407	90	4,4998097	TR5878004A
279911	1061012	30	3,4011974	TR5879001A
294433	1056321	60	4,0943446	TR5878008A
283226	1054017	51	3,9318256	TR5878015A
284172	1054196	85,6	4,4496853	TR5878016A
285116	1053853	91	4,5108595	TR5878017A
284936	1054438	91	4,5108595	TR5878018A
286556	1054859	65	4,1743873	TR5878019A
287449	1056421	29	3,3672958	TR5878021A
286409	1055843	60	4,0943446	TR5878022A
292926	1053963	47	3,8501476	TR5878026A
282190	1059647	50	3,912023	TR5878024A
291961	1050435	71	4,2626799	TR5778003A
293572	1049289	97	4,574711	TR5778004A
292937	1050307	51,8	3,9473901	TR5778006A
280604	1059503	58,3	4,0656021	TR5878003A
295250	1049341	90	4,4998097	TR5778007A
296651	1048996	90	4,4998097	TR5778008A
294603	1048239	2,8	1,0296194	TR5778031A
318651	1056536	5	1,6094379	TR5876008A
319364	1058836	4	1,3862944	TR5876002A
294872	1069624	12	2,4849066	ZU5978027A
294987	1073987	40	3,6888795	ZU5978030A
295770	1072170	3	1,0986123	ZU5978031A
290009	1072478	25	3,2188758	ZU5978011A
289781	1075153	44	3,7841896	ZU5978013A
285923	1072317	90	4,4998097	ZU5978002A
285318	1073212	20	2,9957323	ZU5978003A
285698	1070321	6	1,7917595	ZU5978005A
278648	1053614	2	0,6931472	TR5879002A
278887	1052752	30	3,4011974	TR5879006A
278887	1052813	1,5	0,4054651	TR5879007A

Tabla I.2 Valores de Caudal (continuación)

UTMX	UTMY	Caudal Aforado	LnCaudal	Identif
278644	1052999	1,5	0,4054651	TR5879008A
278491	1052938	2	0,6931472	TR5879009A
278161	1053924	2,5	0,9162907	TR5879015A
277629	1061978	5	1,6094379	TR5879021A
279430	1062275	37,9	3,6349511	TR5879023A
279521	1062152	1,5	0,4054651	TR5879026A
278164	1064741	40	3,6888795	ZU5879027A
278650	1064523	20	2,9957323	ZU5879028A
277635	1066980	10	2,3025851	ZU5879031A
278351	1065508	60	4,0943446	ZU5879035A
277928	1066187	38	3,6375862	ZU5879039A
278541	1066613	47	3,8501476	ZU5879040A
279209	1066179	30	3,4011974	ZU5879041A
280062	1065990	30	3,4011974	ZU5879042A
278809	1065567	30	3,4011974	ZU5879043A
279510	1065440	40	3,6888795	ZU5879044A
279298	1065687	39	3,6635616	ZU5879045A
280458	1065895	36,5	3,5973123	ZU5879046A
280582	1066325	8	2,0794415	ZU5879047A
278235	1066554	25	3,2188758	ZU5879048A
278970	1066980	17	2,8332133	ZU5879049A
280069	1067188	15	2,7080502	ZU5879050A
279551	1067345	30	3,4011974	ZU5879051A
279125	1067440	18	2,8903718	ZU5879052A
277389	1067727	6	1,7917595	ZU5879053A
278038	1069198	20	2,9957323	ZU5879057A
277750	1061855	2	0,6931472	TR5879019A
277629	1061978	5	1,6094379	TR5879020A
278649	1064308	1,5	0,4054651	ZU5879065A
278984	1064275	4	1,3862944	ZU5879068A
278629	1060835	2,3	0,8329091	TR5879088A
278322	1060561	18	2,8903718	TR5879089A
274563	1059354	1,5	0,4054651	TR5879125A
274704	1057386	2	0,6931472	TR5879132A

Tabla I.3 Valores estimados de Transmisividad

Coord. X	Coord. Y	LnTransestim	Transmisividad estim.
270000	1026000	5,857710141	349,9219539
270500	1026000	5,857710141	349,9219539
271000	1026000	5,857710141	349,9219539
271500	1026000	5,857710141	349,9219539
272000	1026000	5,857710141	349,9219539
272500	1026000	5,857710141	349,9219539
273000	1026000	5,857710141	349,9219539
273500	1026000	5,857710141	349,9219539
274000	1026000	5,853732836	348,5329717
274500	1026000	5,835905612	342,3746524
275000	1026000	5,804689024	331,8519792
275500	1026000	5,76102484	317,6737267
276000	1026000	5,701932179	299,4454246
276500	1026000	5,627091258	277,8527392
277000	1026000	5,552842445	257,9697797
277500	1026000	5,488288503	241,8429389
278000	1026000	5,435096127	229,3148906
278500	1026000	5,393719517	220,0202344
279000	1026000	5,364723052	213,7320339
279500	1026000	5,348833934	210,3628577
280000	1026000	5,346978194	209,972841
280500	1026000	5,360155246	212,7579737
281000	1026000	5,389493282	219,0923393
281500	1026000	5,436193575	229,5666898
282000	1026000	5,501403219	245,0355295
282500	1026000	5,585995995	266,6657482
283000	1026000	5,690247521	295,9668696
283500	1026000	5,813419654	334,7619405
284000	1026000	5,953309834	385,0256032
284500	1026000	6,105860168	448,4782423
285000	1026000	6,264982356	525,8323082
285500	1026000	6,42308389	615,8995549
286000	1026000	6,57490971	716,8808942
286500	1026000	6,734112474	840,5971012
287000	1026000	6,9078664	1000,111127

Tabla I.3 Valores estimados de Transmisividad (continuación)

Coord. X	Coord. Y	LnTransestim	Transmisividad estim.
287500	1026000	7,052512177	1155,758569
288000	1026000	7,150299299	1274,487351
288500	1026000	7,202585955	1342,898954
289000	1026000	7,216589209	1361,836191
289500	1026000	7,200333392	1339,877394
290000	1026000	7,16065146	1287,749577
290500	1026000	7,102754297	1215,309793
291000	1026000	7,03043225	1130,519171
291500	1026000	6,946400139	1039,401286
292000	1026000	6,852605567	946,343458
292500	1026000	6,750461235	854,4527748
293000	1026000	6,641008985	765,8673522
293500	1026000	6,525032779	682,0021283
294000	1026000	6,403493394	603,9511961
294500	1026000	6,287281091	537,6894111
295000	1026000	6,182295215	484,1017997
295500	1026000	6,089790534	441,3289583
296000	1026000	6,010956512	407,8732693
296500	1026000	5,946932755	382,5780768
297000	1026000	5,898820383	364,6071173
297500	1026000	5,867855195	353,4899996
298000	1026000	5,858783028	350,2975821
298500	1026000	5,858183684	350,0876964
299000	1026000	5,857920653	349,9956244
299500	1026000	5,857760544	349,9395917
300000	1026000	5,857710141	349,9219539
300500	1026000	5,857710141	349,9219539
301000	1026000	5,857710141	349,9219539
301500	1026000	5,857710141	349,9219539
302000	1026000	5,857710141	349,9219539
302500	1026000	5,857710141	349,9219539
303000	1026000	5,857710141	349,9219539
303500	1026000	5,857710141	349,9219539
304000	1026000	5,857710141	349,9219539
304500	1026000	5,857710141	349,9219539

Tabla I.4 Abatimiento calculado , abatimientos máximos y mínimos calculado
 Parámetro difuso: Transmisividad

x	y	s calculado	smax calc	smin cal
270000	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
270500	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
271000	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
271500	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
272000	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
272500	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
273000	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
273500	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
274000	1026000	10,643434	15,478335	5,8085336
274500	1026000	10,802485	15,637386	5,9675848
275000	1026000	11,086727	15,921628	6,2518264
275500	1026000	11,496672	16,331572	6,661771
276000	1026000	12,067432	16,902332	7,2325313
276500	1026000	12,821167	17,656067	7,986266
277000	1026000	13,621286	18,456187	8,7863855
277500	1026000	14,36173	19,19663	9,5268291
278000	1026000	14,994364	19,829265	10,159464
278500	1026000	15,496207	20,331108	10,661306
279000	1026000	15,845412	20,680313	11,010512
279500	1026000	16,019134	20,854034	11,184233
280000	1026000	15,992475	20,827376	11,157574
280500	1026000	15,753719	20,588619	10,918818
281000	1026000	15,298745	20,133646	10,463845
281500	1026000	14,632571	19,467472	9,7976708
282000	1026000	13,771523	18,606424	8,9366228
282500	1026000	12,745008	17,579908	7,9101072
283000	1026000	11,595981	16,430881	6,7610803
283500	1026000	10,379049	15,21395	5,5441486
284000	1026000	9,155587	13,990488	4,3206864
284500	1026000	7,9864326	12,821333	3,151532
285000	1026000	6,9239108	11,758811	2,0890102
285500	1026000	6,0043605	10,839261	1,1694599
286000	1026000	5,2353961	10,070297	0,4004955

Tabla I.4 Abatimiento calculado , abatimientos máximos y mínimos calculado
 Parámetro difuso: Transmisividad (continuación)

x	y	s calculado	smax calc	smin cal
286500	1026000	4,5567735	9,3916741	0,2781271
287000	1026000	3,9474274	8,782328	0,8874732
287500	1026000	3,5094152	8,3443158	1,3254854
288000	1026000	3,2425755	8,0774761	1,5923251
288500	1026000	3,1106664	7,945567	1,7242342
289000	1026000	3,0814529	7,9163535	1,7534477
289500	1026000	3,1324952	7,9673958	1,7024054
290000	1026000	3,2500496	8,0849502	1,584851
290500	1026000	3,4268142	8,2617148	1,4080864
291000	1026000	3,6600347	8,4949353	1,1748659
291500	1026000	3,9502406	8,7851412	0,88466
292000	1026000	4,3005016	9,1354022	0,534399
292500	1026000	4,716042	9,5509426	0,1188586
293000	1026000	5,2040866	10,038987	0,369186
293500	1026000	5,7738598	10,60876	0,9389592
294000	1026000	6,434778	11,269679	1,5998774
294500	1026000	7,137621	11,972522	2,3027204
295000	1026000	7,840564	12,675465	3,0056634
295500	1026000	8,5196569	13,354558	3,6847563
296000	1026000	9,1477132	13,982614	4,3128126
296500	1026000	9,6955903	14,530491	4,8606897
297000	1026000	10,133956	14,968856	5,2990552
297500	1026000	10,434296	15,269196	5,5993951
298000	1026000	10,548011	15,382912	5,7131106
298500	1026000	10,576092	15,410993	5,7411915
299000	1026000	10,593953	15,428854	5,7590525
299500	1026000	10,60484	15,43974	5,7699393
300000	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
300500	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
301000	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
301500	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
302000	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688
302500	1026000	10,608269	15,44317	5,7733688

Tabla I.5 Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado
 Parametro difuso: Transmisividad

Coord. X	Coord. Y	Imprecisión
270000	1026000	0,9115343
270500	1026000	0,9115343
271000	1026000	0,9115343
271500	1026000	0,9115342
272000	1026000	0,9115343
272500	1026000	0,9115343
273000	1026000	0,9115343
273500	1026000	0,9115343
274000	1026000	0,9085227
274500	1026000	0,895146
275000	1026000	0,8721962
275500	1026000	0,8410957
276000	1026000	0,8013139
276500	1026000	0,7542061
277000	1026000	0,7099037
277500	1026000	0,6733034
278000	1026000	0,6448957
278500	1026000	0,6240109
279000	1026000	0,6102588
279500	1026000	0,6036407
280000	1026000	0,604647
280500	1026000	0,6138107
281000	1026000	0,632065
281500	1026000	0,6608409
282000	1026000	0,7021591
282500	1026000	0,7587128
283000	1026000	0,8338924
283500	1026000	0,9316654
284000	1026000	1,0561639
284500	1026000	1,2107789
285000	1026000	1,3965811
285500	1026000	1,610463
286000	1026000	1,8470047

Tabla I.5 Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado
 Parametro difuso: Transmisividad (continuación)

Coord. X	Coord. Y	Imprecisión
286500	1026000	2,122072
287000	1026000	2,4496464
287500	1026000	2,7553883
288000	1026000	2,982136
288500	1026000	3,1085948
289000	1026000	3,1380657
289500	1026000	3,0869326
290000	1026000	2,9752782
290500	1026000	2,8218051
291000	1026000	2,6419972
291500	1026000	2,4479019
292000	1026000	2,2485285
292500	1026000	2,0504063
293000	1026000	1,8581168
293500	1026000	1,674755
294000	1026000	1,5027404
294500	1026000	1,3547652
295000	1026000	1,2333042
295500	1026000	1,1349989
296000	1026000	1,0570731
296500	1026000	0,9973401
297000	1026000	0,9541981
297500	1026000	0,9267325
298000	1026000	0,9167416
298500	1026000	0,9143076
299000	1026000	0,9127661
299500	1026000	0,9118291
300000	1026000	0,9115343
300500	1026000	0,9115343
301000	1026000	0,9115343
301500	1026000	0,9115343
302000	1026000	0,9115343
302500	1026000	0,9115343

Tabla I.6 Caudal estimado

Coord. X	Coord. Y	Caudal estim.
270000	1026000	46,7967107
270500	1026000	46,7967107
271000	1026000	46,7967107
271500	1026000	46,7967107
272000	1026000	46,7967107
272500	1026000	46,7967107
273000	1026000	46,7967107
273500	1026000	46,7967107
274000	1026000	46,7967107
274500	1026000	46,7967107
275000	1026000	43,655294
275500	1026000	43,2416523
276000	1026000	42,5967562
276500	1026000	40,9907917
277000	1026000	40,8779333
277500	1026000	41,1188071
278000	1026000	41,098161
278500	1026000	40,2732375
279000	1026000	40,1043596
279500	1026000	38,6359445
280000	1026000	38,8065521
280500	1026000	39,5740706
281000	1026000	39,2922347
281500	1026000	39,1087563
282000	1026000	39,9473532
282500	1026000	41,8233667
283000	1026000	44,7980708
283500	1026000	48,7515065
284000	1026000	52,6372595
284500	1026000	57,1082547
285000	1026000	61,6652164
285500	1026000	66,3632125
286000	1026000	70,507172
286500	1026000	70,8355564

Tabla I.6 Caudal estimado (continuación)

Coord. X	Coord. Y	Caudal estim.
287000	1026000	65,2268813
287500	1026000	58,7243777
288000	1026000	53,1227933
288500	1026000	48,2027641
289000	1026000	43,860991
289500	1026000	39,9955338
290000	1026000	37,038788
290500	1026000	34,5787838
291000	1026000	32,9855949
291500	1026000	32,0252378
292000	1026000	31,7044262
292500	1026000	31,5517066
293000	1026000	31,7984945
293500	1026000	33,3392922
294000	1026000	34,4162829
294500	1026000	37,166222
295000	1026000	39,1542623
295500	1026000	40,6429458
296000	1026000	41,0044533
296500	1026000	41,0044533
297000	1026000	41,7650095
297500	1026000	41,7650095
298000	1026000	41,7650095
298500	1026000	41,7650095
299000	1026000	41,7650095
299500	1026000	41,7650095
300000	1026000	41,7650095
300500	1026000	43,655294
301000	1026000	43,655294
301500	1026000	43,655294
302000	1026000	43,655294
302500	1026000	43,655294
303000	1026000	43,655294
303500	1026000	42,2007753

Tabla I.7 Abatimiento calculado, abatimientos máximo y mínimo calculado
 Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal

Coord. X	Coord. Y	s calculado	smax calc.	smin calc.
270000	1026000	19,869992	26,553621	13,186364
270500	1026000	19,869992	26,553621	13,186364
271000	1026000	19,869992	26,553621	13,186364
271500	1026000	19,869992	26,553621	13,186364
272000	1026000	19,869992	26,553621	13,186364
272500	1026000	19,869992	26,553621	13,186364
273000	1026000	19,869992	26,553621	13,186364
273500	1026000	19,869992	26,553621	13,186364
274000	1026000	19,935858	26,619487	13,25223
274500	1026000	20,233772	26,9174	13,550143
275000	1026000	19,372162	26,055791	12,688534
275500	1026000	19,898129	26,581757	13,2145
276000	1026000	20,574496	27,258125	13,890868
276500	1026000	21,035444	27,719072	14,351815
277000	1026000	22,286654	28,970283	15,603026
277500	1026000	23,636604	30,320233	16,952976
278000	1026000	24,665406	31,349035	17,981778
278500	1026000	24,979272	31,662901	18,295644
279000	1026000	25,435071	32,1187	18,751443
279500	1026000	24,772417	31,456046	18,088789
280000	1026000	24,840399	31,524027	18,15677
280500	1026000	24,95351	31,637138	18,269881
281000	1026000	24,060263	30,743892	17,376635
281500	1026000	22,905115	29,588744	16,221487
282000	1026000	22,019519	28,703147	15,33589
282500	1026000	21,33521	28,018838	14,651581
283000	1026000	20,7924	27,476029	14,108772
283500	1026000	20,252724	26,936352	13,569095
284000	1026000	19,289337	25,972965	12,605708
284500	1026000	18,255324	24,938953	11,571696
285000	1026000	17,089508	23,773136	10,405879
285500	1026000	15,948946	22,632575	9,2653175
286000	1026000	14,774768	21,458397	8,0911395

Tabla I.7 Abatimiento calculado, abatimientos máximo y mínimo calculado
Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal (continuación)

Coord. X	Coord. Y	s calculado	smax calc.	smin calc.
286500	1026000	12,919526	19,603154	6,2358974
287000	1026000	10,305726	16,989354	3,6220974
287500	1026000	8,2488042	14,932433	1,5651757
288000	1026000	6,8945961	13,578225	0,2109676
288500	1026000	6,0015469	12,685175	0,6820816
289000	1026000	5,4096827	12,093311	1,2739458
289500	1026000	5,0146397	11,698268	1,6689888
290000	1026000	4,8181974	11,501826	1,8654311
290500	1026000	4,7428359	11,426464	1,9407926
291000	1026000	4,8322273	11,515856	1,8514012
291500	1026000	5,0635341	11,747163	1,6200944
292000	1026000	5,4572875	12,140916	1,226341
292500	1026000	5,9557758	12,639404	0,7278527
293000	1026000	6,6235208	13,307149	0,0601077
293500	1026000	7,7047834	14,388412	1,0211549
294000	1026000	8,8641146	15,547743	2,1804861
294500	1026000	10,617927	17,301555	3,9342983
295000	1026000	12,287518	18,971147	5,6038898
295500	1026000	13,859422	20,54305	7,1757932
296000	1026000	15,013481	21,697109	8,3298522
296500	1026000	15,912672	22,5963	9,2290434
297000	1026000	16,940624	23,624253	10,256996
297500	1026000	17,442694	24,126322	10,759065
298000	1026000	17,632788	24,316417	10,94916
298500	1026000	17,67973	24,363359	10,996102
299000	1026000	17,709588	24,393216	11,025959
299500	1026000	17,727787	24,411416	11,044159
300000	1026000	17,73352	24,417149	11,049892
300500	1026000	18,536139	25,219768	11,852511
301000	1026000	18,536139	25,219768	11,852511
301500	1026000	18,536139	25,219768	11,852511
302000	1026000	18,536139	25,219768	11,852511
302500	1026000	18,536139	25,219768	11,852511

Tabla I.8 Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado
Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal

Coord. X	Coord. Y	Imprecisión
270000	1026000	0,672736
270500	1026000	0,6727358
271000	1026000	0,672736
271500	1026000	0,6727359
272000	1026000	0,6727359
272500	1026000	0,6727359
273000	1026000	0,6727367
273500	1026000	0,6727343
274000	1026000	0,6705133
274500	1026000	0,6606416
275000	1026000	0,690024
275500	1026000	0,6717846
276000	1026000	0,6497003
276500	1026000	0,6354635
277000	1026000	0,5997875
277500	1026000	0,5655321
278000	1026000	0,5419435
278500	1026000	0,535134
279000	1026000	0,5255443
279500	1026000	0,5396025
280000	1026000	0,5381257
280500	1026000	0,5356864
281000	1026000	0,555574
281500	1026000	0,5835926
282000	1026000	0,607064
282500	1026000	0,626535
283000	1026000	0,6428914
283500	1026000	0,6600226
284000	1026000	0,6929868
284500	1026000	0,7322387
285000	1026000	0,7821907
285500	1026000	0,8381276
286000	1026000	0,9047349

Tabla I.8 Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado
 Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal (continuación)

Coord. X	Coord. Y	Imprecisión
286500	1026000	1,0346555
287000	1026000	1,2970704
287500	1026000	1,6205079
288000	1026000	1,9388013
288500	1026000	2,2273014
289000	1026000	2,4709867
289500	1026000	2,6656466
290000	1026000	2,7743278
290500	1026000	2,8184105
291000	1026000	2,7662726
291500	1026000	2,6399064
292000	1026000	2,4494325
292500	1026000	2,2444189
293000	1026000	2,0181497
293500	1026000	1,7349294
294000	1026000	1,5080195
294500	1026000	1,2589331
295000	1026000	1,0878729
295500	1026000	0,9644888
296000	1026000	0,8903503
296500	1026000	0,8400385
297000	1026000	0,7890652
297500	1026000	0,7663528
298000	1026000	0,7580909
298500	1026000	0,7560788
299000	1026000	0,7548033
299500	1026000	0,7540269
300000	1026000	0,7537848
300500	1026000	0,7211458
301000	1026000	0,7211457
301500	1026000	0,7211441
302000	1026000	0,7211457
302500	1026000	0,7211464

Tabla I.9 Valores de Coeficiente de Almacenamiento

COOR X	COOR Y	Cota Terreno	Espesor	Cofic Almacén	Identif
306283	1059301	152,82	1	0,003301511	TR5877064C
302223	1046939	158,83	4	0,002908669	TR5777007A
296651	1048996	136,65	8	0,002386697	TR5778008A
295250	1049342	134,36	0	0,003982777	TR5778007A
296511	1056986	135,73	6	0,002513723	TR5878007A
305509	1063023	148,84	1	0,003263687	TR5877149A
300617	1066367	134,83	5	0,002584779	TR5877278A
296355	1072026	125,28	0	0,003888724	ZU5978025A
293572	1049289	131,55	7	0,002399674	TR5778004A
292937	1050307	128,82	0	0,003925847	TR5778006A
291961	1050435	127,97	8	0,002297771	TR5778003A
291943	1047178	129,83	13	0,002056487	TR5778151A
290015	1072522	121,11	0	0,003844204	ZU5978011A
288536	1059949	124,62	5	0,002478971	TR5878071A
286433	1069825	119,33	0	0,003824928	ZU5978006A
284549	1066794	121,32	0	0,003846467	ZU5878036A
287205	1061862	124,1	10	0,002142289	TR5878103A
284700	1061138	122,84	10	0,002128855	TR5878119A
286551	1059407	124,49	12	0,002046362	TR5878004A
287523	1058819	124,5	6	0,002397541	TR5878093A
285138	1057725	123,74	0	0,003872384	TR5878006A
284838	1058587	123,2	6	0,002383705	TR5878005A
286470	1055935	125,7	0	0,00389316	TR5878088A
287502	1055007	125,11	9	0,002208189	TR5878020A
285116	1053853	125,48	0	0,003890837	TR5878017A
285924	1051083	123,98	1	0,003013138	TR5878030A
286461	1048867	123,76	0	0,003872597	TR5778064A
285051	1047677	120,97	0	0,003842694	TR5778104A
282839	1050332	121,17	0	0,003844851	TR5778142A
283609	1051711	122,25	0	0,003856462	ZU5878062A
283226	1054017	122,72	0	0,003861497	TR5878015A
282819	1057523	121,3	0	0,003846252	TR5878011A
283739	1058501	122,36	6	0,002374719	TR5878073A
282949	1058967	122,1	0	0,003854853	TR5878072A

Tabla I.9 Valores de Coeficiente de Almacenamiento (continuación)

COOR X	COOR Y	Cota Terreno	Espesor	Coefic Almacen	Identif
282190	1059647	120,3	0	0,003835453	TR5878024A
283489	1062651	121,15	10	0,00211071	ZU5878061A
283989	1064861	121,97	8	0,002234241	ZU5878051A
280068	1067180	114,41	4	0,002460042	ZU5879050A
278541	1066613	112,33	6	0,002264524	ZU5879040A
277140	1066920	111,4	6	0,002254019	ZU5879049A
279227	1065720	113,46	6	0,00227722	ZU5879045A
278324	1070131	110,93	0	0,003731613	ZU5979009A
277868	1071504	110,8	0	0,003730136	ZU5979052A
277173	1072430	110,99	0	0,003732294	ZU5979032A
277500	1074246	111	0	0,003732407	ZU5979030A
278241	1072731	111,3	0	0,003735809	ZU5979027A
278785	1071836	110,94	0	0,003731726	ZU5979056A
279970	1071122	111,89	0	0,003742483	ZU5979044A
278846	1070803	110,87	0	0,003730931	ZU5979017A
279838	1069464	111,95	0	0,00374316	ZU5979043A
276500	1069532	111	0	0,003732407	ZU5979001A
274108	1064826	111	0	0,003732407	ZU5879033A
277188	1064838	111,43	0	0,003737281	ZU5879066A
279901	1063392	115,58	0	0,003783762	ZU5879094A
278401	1063541	112,57	0	0,003750149	ZU5879078A
279165	1062690	112,98	0	0,003754759	ZU5879077A
278960	1064104	113,49	0	0,003760478	ZU5879069A
276751	1063120	111,7	0	0,003740336	ZU5879061A
280301	1059904	114,96	0	0,003776881	TR5879096A
278624	1060037	111,18	0	0,003734449	TR5879107A
275476	1058887	112,78	0	0,003752511	TR5879122A
274016	1059634	111,3	0	0,003735809	TR5879127A
277366	1058815	112,61	0	0,003750599	TR5879117A
279835	1058523	114,89	8	0,002156886	TR5879227A
279495	1057757	114,85	5	0,002372893	TR5879225A
279337	1056775	115,3	5	0,002377892	TR5879222A
279088	1055824	115,91	6	0,002304494	TR5279210A
278535	1055202	116,51	0	0,003794043	TR5879202A

Tabla I.9 Valores de Coeficiente de Almacenamiento (continuación)

COOR X	COOR Y	Cota Terreno	Espesor	Coefic Almacen	Identif
278142	1055798	115,33	0	0,00378099	TR5879205A
277402	1054481	115,69	0	0,003784981	TR5879193A
277672	1053742	114,98	0	0,003777103	TR5879191A
276759	1054147	114,43	0	0,003770981	TR5879182A
277129	1054790	115,78	0	0,003785977	TR5879195A
276675	1055438	113,94	0	0,003765513	TR5879154A
274395	1056773	112,8	0	0,003752736	TR5879133A
276626	1057405	113,42	0	0,003759694	TR5879140A
276212	1054458	114,6	0	0,003772875	TR5879166A
274809	1054435	112,39	0	0,003748123	TR5879173A
275683	1052770	112,88	10	0,00201971	TR5879248A
278887	1052752	115,27	10	0,002046399	TR5879006A
277510	1052237	113,47	10	0,002026329	TR5879229A
278176	1051250	113,83	0	0,003764283	TR5879255A
274152	1051919	111,81	5	0,002338814	TR5879235A
272713	1050903	111,13	2	0,002671498	TR5879239A
274971	1051115	111,92	0	0,003742822	TR5879249A
274000	1047838	111,2	0	0,003734675	TR5779004A

Tabla I.10 Coeficiente de Almacenamiento estimado

Coord. X	Coord. Y	S estimado
270000	1026000	0,0032332
270500	1026000	0,0032332
271000	1026000	0,0032332
271500	1026000	0,0032332
272000	1026000	0,0032332
272500	1026000	0,0032332
273000	1026000	0,0032332
273500	1026000	0,0032332
274000	1026000	0,0032332
274500	1026000	0,0032332
275000	1026000	0,0032332
275500	1026000	0,0032332
276000	1026000	0,0032332
276500	1026000	0,0032332
277000	1026000	0,0032332
277500	1026000	0,0032332
278000	1026000	0,0032332
278500	1026000	0,0032332
279000	1026000	0,0032332
279500	1026000	0,0032332
280000	1026000	0,0032332
280500	1026000	0,0032332
281000	1026000	0,0032332
281500	1026000	0,0032332
282000	1026000	0,0032332
282500	1026000	0,0032332
283000	1026000	0,0032332
283500	1026000	0,0032332
284000	1026000	0,0032332
284500	1026000	0,0032332
285000	1026000	0,0032332
285500	1026000	0,0032332
286000	1026000	0,0032332
286500	1026000	0,0032332

Tabla I.10 Coeficiente de Almacenamiento estimado (continuación)

Coord. X	Coord. Y	S estimado
287000	1026000	0,0032332
287500	1026000	0,0032332
288000	1026000	0,0032332
288500	1026000	0,0032332
289000	1026000	0,0032332
289500	1026000	0,0032332
290000	1026000	0,0032332
290500	1026000	0,0032332
291000	1026000	0,0032332
291500	1026000	0,0032332
292000	1026000	0,0032332
292500	1026000	0,0032332
293000	1026000	0,0032332
293500	1026000	0,0032332
294000	1026000	0,0032332
294500	1026000	0,0032332
295000	1026000	0,0032332
295500	1026000	0,0032332
296000	1026000	0,0032332
296500	1026000	0,0032332
297000	1026000	0,0032332
297500	1026000	0,0032332
298000	1026000	0,0032332
298500	1026000	0,0032332
299000	1026000	0,0032332
299500	1026000	0,0032332
300000	1026000	0,0032332
300500	1026000	0,0032332
301000	1026000	0,0032332
301500	1026000	0,0032332
302000	1026000	0,0032332
302500	1026000	0,0032332
303000	1026000	0,0032332
303500	1026000	0,0032332

Tabla I.11 Abatimiento calculado, abatimiento máximo y mínimo calculado
 Parámetros difusos: Transmisividad, Caudal y Coeficiente de Almacenamiento

Coord. X	Coord. Y	s calculado	s max calc.	s min calc.
270000	1026000	18,805215	25,117358	12,493072
270500	1026000	18,805215	25,117358	12,493072
271000	1026000	18,805215	25,117358	12,493072
271500	1026000	18,805215	25,117358	12,493072
272000	1026000	18,805215	25,117358	12,493072
272500	1026000	18,805215	25,117358	12,493072
273000	1026000	18,805215	25,117358	12,493072
273500	1026000	18,805215	25,117358	12,493072
274000	1026000	18,867382	25,179525	12,555239
274500	1026000	19,148558	25,460701	12,836415
275000	1026000	18,331866	24,644009	12,019723
275500	1026000	18,827724	25,139867	12,515581
276000	1026000	19,465124	25,777267	13,152981
276500	1026000	19,897898	26,210041	13,585755
277000	1026000	21,07791	27,390054	14,765767
277500	1026000	22,351347	28,663491	16,039204
278000	1026000	23,321392	29,633536	17,009249
278500	1026000	23,61597	29,928113	17,303827
279000	1026000	24,045382	30,357525	17,733239
279500	1026000	23,418212	29,730356	17,106069
280000	1026000	23,482588	29,794732	17,170445
280500	1026000	23,590518	29,902661	17,278375
281000	1026000	22,747939	29,060082	16,435796
281500	1026000	21,658502	27,970645	15,346359
282000	1026000	20,824628	27,136771	14,512485
282500	1026000	20,181785	26,493929	13,869642
283000	1026000	19,673427	25,98557	13,361283
283500	1026000	19,16857	25,480713	12,856427
284000	1026000	18,262907	24,57505	11,950764
284500	1026000	17,290179	23,602322	10,978036
285000	1026000	16,192042	22,504186	9,8798992
285500	1026000	15,116931	21,429075	8,8047883
286000	1026000	14,00889	20,321033	7,6967465

Tabla I.11 Abatimiento calculado, abatimiento máximo y mínimo calculado
 Parámetros difusos: Transmisividad, Caudal y Coeficiente de Almacenamiento

Coord. X	Coord. Y	s calculado	s max calc.	s min calc.
286500	1026000	12,254086	18,56623	5,9419432
287000	1026000	9,7783888	16,090532	3,4662456
287500	1026000	7,8289695	14,141113	1,5168263
288000	1026000	6,5449394	12,857083	0,2327962
288500	1026000	5,6977507	12,009894	0,6143925
289000	1026000	5,1359629	11,448106	1,1761803
289500	1026000	4,7607203	11,072864	1,5514229
290000	1026000	4,5738189	10,885962	1,7383243
290500	1026000	4,5017028	10,813846	1,8104404
291000	1026000	4,5858146	10,897958	1,7263286
291500	1026000	4,8044281	11,116571	1,5077151
292000	1026000	5,1769467	11,48909	1,1351965
292500	1026000	5,6485301	11,960673	0,6636131
293000	1026000	6,2802731	12,592416	0,0318701
293500	1026000	7,3035758	13,615719	0,9914326
294000	1026000	8,4002027	14,712346	2,0880595
294500	1026000	10,059525	16,371668	3,7473818
295000	1026000	11,638451	17,950594	5,3263078
295500	1026000	13,124443	19,436587	6,8123001
296000	1026000	14,214612	20,526755	7,9024686
296500	1026000	15,063611	21,375754	8,7514678
297000	1026000	16,034806	22,34695	9,7226631
297500	1026000	16,508727	22,820871	10,196584
298000	1026000	16,688154	23,000297	10,376011
298500	1026000	16,732461	23,044604	10,420317
299000	1026000	16,760642	23,072785	10,448499
299500	1026000	16,777819	23,089962	10,465676
300000	1026000	16,78323	23,095374	10,471087
300500	1026000	17,542839	23,854983	11,230696
301000	1026000	17,542839	23,854983	11,230696
301500	1026000	17,542839	23,854983	11,230696
302000	1026000	17,542839	23,854983	11,230696
302500	1026000	17,542839	23,854983	11,230696

Tabla I.12 Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado
 Parámetros difusos: Transmisividad, Caudal y Coeficiente de Almacenamiento

Coord. X	Coord. Y	Imprecisión
270000	1026000	0,672736
270500	1026000	0,6727358
271000	1026000	0,672736
271500	1026000	0,6727359
272000	1026000	0,6727359
272500	1026000	0,6727359
273000	1026000	0,6727367
273500	1026000	0,6727343
274000	1026000	0,6705133
274500	1026000	0,6606416
275000	1026000	0,690024
275500	1026000	0,6717846
276000	1026000	0,6497003
276500	1026000	0,6354635
277000	1026000	0,5997875
277500	1026000	0,5655321
278000	1026000	0,5419435
278500	1026000	0,535134
279000	1026000	0,5255443
279500	1026000	0,5396025
280000	1026000	0,5381257
280500	1026000	0,5356864
281000	1026000	0,555574
281500	1026000	0,5835926
282000	1026000	0,607064
282500	1026000	0,626535
283000	1026000	0,6428914
283500	1026000	0,6600226
284000	1026000	0,6929868
284500	1026000	0,7322387
285000	1026000	0,7821907
285500	1026000	0,8381276
286000	1026000	0,9047349

Tabla I.12 Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento calculado (continuación)
 Parámetros difusos: Transmisividad, Caudal y Coeficiente de Almacenamiento

Coord. X	Coord. Y	Imprecisión
286500	1026000	1,0346555
287000	1026000	1,2970704
287500	1026000	1,6205079
288000	1026000	1,9388013
288500	1026000	2,2273014
289000	1026000	2,4709867
289500	1026000	2,6656466
290000	1026000	2,7743278
290500	1026000	2,8184105
291000	1026000	2,7662726
291500	1026000	2,6399064
292000	1026000	2,4494325
292500	1026000	2,2444189
293000	1026000	2,0181497
293500	1026000	1,7349294
294000	1026000	1,5080195
294500	1026000	1,2589331
295000	1026000	1,0878729
295500	1026000	0,9644888
296000	1026000	0,8903503
296500	1026000	0,8400385
297000	1026000	0,7890652
297500	1026000	0,7663528
298000	1026000	0,7580909
298500	1026000	0,7560788
299000	1026000	0,7548033
299500	1026000	0,7540269
300000	1026000	0,7537848
300500	1026000	0,7211458
301000	1026000	0,7211457
301500	1026000	0,7211441
302000	1026000	0,7211457
302500	1026000	0,7211464

ANEXO II. Anexo correspondiente al capítulo 4.

www.bdigital.ula.ve

C.C. Reconocimiento

Tabla II.1 Transmisividad máxima y mínima estimada
Caso I. Parámetro difuso: Transmisividad

Coord. X	Coord. Y	T max	T min
270000	1026000	3158,256	30,3779999
270500	1026000	3158,256	30,3779999
271000	1026000	3158,256	30,3779999
271500	1026000	3158,256	30,3779999
272000	1026000	3158,256	30,3779999
272500	1026000	3158,256	30,3779999
273000	1026000	3158,256	30,3779999
273500	1026000	3158,256	30,3779999
274000	1026000	3143,5071	30,3779999
274500	1026000	3078,0853	30,3779999
275000	1026000	2637,203	30,3779999
275500	1026000	2484,8089	30,3779999
276000	1026000	2286,2775	30,3779999
276500	1026000	1985,8335	30,3779999
277000	1026000	1810,8901	30,3779999
277500	1026000	1671,9981	30,3779999
278000	1026000	1547,3494	30,3779999
278500	1026000	1431,8551	30,3779999
279000	1026000	1359,8216	30,3779999
279500	1026000	1284,875	30,3779999
280000	1026000	1227,3955	30,3779999
280500	1026000	1184,4176	30,3779999
281000	1026000	1156,4655	30,3779999
281500	1026000	1144,4159	30,3779999
282000	1026000	1149,4671	30,3779999
282500	1026000	1172,9877	30,3779999
283000	1026000	1216,1566	30,3779999
283500	1026000	1279,2891	30,3779999
284000	1026000	1355,7406	30,3779999
284500	1026000	1451,6579	30,3779999
285000	1026000	1550,8697	30,3779999
285500	1026000	1643,761	48,79248161
286000	1026000	1736,8541	142,9412645

Tabla II.1 Transmisividad máxima y mínima estimada
 Caso I. Parámetro difuso: Transmisividad (continuación)

Coord. X	Coord. Y	T max	T min
286500	1026000	1958,7765	205,1545257
287000	1026000	2473,1879	175,1181268
287500	1026000	3114,0977	76,98835181
288000	1026000	3731,1971	30,3779999
288500	1026000	4243,201	30,3779999
289000	1026000	4620,4843	30,3779999
289500	1026000	4862,748	30,3779999
290000	1026000	5027,9388	30,3779999
290500	1026000	5066,8267	30,3779999
291000	1026000	5021,1396	30,3779999
291500	1026000	4919,8278	30,3779999
292000	1026000	4766,2058	30,3779999
292500	1026000	4521,0363	30,3779999
293000	1026000	4215,6342	30,3779999
293500	1026000	3990,8628	30,3779999
294000	1026000	3615,1625	30,3779999
294500	1026000	3409,424	30,3779999
295000	1026000	3176,0785	30,3779999
295500	1026000	2987,4563	30,3779999
296000	1026000	2828,4909	30,3779999
296500	1026000	2706,2458	30,3779999
297000	1026000	2644,6121	30,3779999
297500	1026000	2595,321	30,3779999
298000	1026000	2595,4103	30,3779999
298500	1026000	2610,856	30,3779999
299000	1026000	2621,2189	30,3779999
299500	1026000	2626,9175	30,3779999
300000	1026000	2628,6153	30,3779999
300500	1026000	2801,1669	30,3779999
301000	1026000	2801,1669	30,3779999
301500	1026000	2801,1669	30,3779999
302000	1026000	2801,1669	30,3779999
302500	1026000	2801,1669	30,3779999

Tabla II.2 Caso I. Abatimiento máximo y mínimo estimado
 Parámetro difuso: Transmisividad

Coord. X	Coord. Y	s max estim.	s min estim.
270000	1026000	110,00013	1,3108029
270500	1026000	110,00013	1,3108029
271000	1026000	110,00013	1,3108029
271500	1026000	110,00013	1,3108029
272000	1026000	110,00013	1,3108029
272500	1026000	110,00013	1,3108029
273000	1026000	110,00013	1,3108029
273500	1026000	110,00013	1,3108029
274000	1026000	110,00013	1,316697
274500	1026000	110,00013	1,3435077
275000	1026000	110,00013	1,5580367
275500	1026000	110,00013	1,649474
276000	1026000	110,00013	1,7864473
276500	1026000	110,00013	2,0445305
277000	1026000	110,00013	2,2332915
277500	1026000	110,00013	2,4106061
278000	1026000	110,00013	2,596189
278500	1026000	110,00013	2,7962869
279000	1026000	110,00013	2,937889
279500	1026000	110,00013	3,1016716
280000	1026000	110,00013	3,2405149
280500	1026000	110,00013	3,3529277
281000	1026000	110,00013	3,4304191
281500	1026000	110,00013	3,464965
282000	1026000	110,00013	3,4503971
282500	1026000	110,00013	3,3841786
283000	1026000	110,00013	3,2691613
283500	1026000	110,00013	3,1146293
284000	1026000	110,00013	2,9463515
284500	1026000	110,00013	2,7597676
285000	1026000	110,00013	2,5905478
285500	1026000	70,154978	2,4502352
286000	1026000	25,239687	2,3243578

Tabla II.2 Caso I. Abatimiento máximo y mínimo estimado
 Parámetro difuso: Transmisividad (continuación)

Coord. X	Coord. Y	s max estim.	s min estim.
286500	1026000	17,888475	2,0715682
287000	1026000	20,801336	1,6568987
287500	1026000	45,480006	1,328613
288000	1026000	110,00013	1,1172035
288500	1026000	110,00013	0,9876057
289000	1026000	110,00013	0,9101322
289500	1026000	110,00013	0,8665956
290000	1026000	110,00013	0,839266
290500	1026000	110,00013	0,833086
291000	1026000	110,00013	0,8403561
291500	1026000	110,00013	0,8569491
292000	1026000	110,00013	0,8834258
292500	1026000	110,00013	0,9293249
293000	1026000	110,00013	0,9937981
293500	1026000	110,00013	1,0474104
294000	1026000	110,00013	1,1515599
294500	1026000	110,00013	1,2180957
295000	1026000	110,00013	1,3037518
295500	1026000	110,00013	1,3825455
296000	1026000	110,00013	1,4569237
296500	1026000	110,00013	1,5199289
297000	1026000	110,00013	1,553854
297500	1026000	110,00013	1,5821193
298000	1026000	110,00013	1,5820671
298500	1026000	110,00013	1,5730983
299000	1026000	110,00013	1,5671389
299500	1026000	110,00013	1,5638814
300000	1026000	110,00013	1,5629135
300500	1026000	110,00013	1,4705396
301000	1026000	110,00013	1,4705396
301500	1026000	110,00013	1,4705396
302000	1026000	110,00013	1,4705396
302500	1026000	110,00013	1,4705396

Tabla II.3 Caso I. Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento estimado
 Parámetro difuso: Transmisividad

Coord. X	Coord. Y	Imprecisión
270000	1026000	10,245718
270500	1026000	10,245705
271000	1026000	10,245716
271500	1026000	10,245722
272000	1026000	10,245725
272500	1026000	10,24572
273000	1026000	10,245733
273500	1026000	10,245732
274000	1026000	10,211328
274500	1026000	10,058499
275000	1026000	9,781269
275500	1026000	9,4245382
276000	1026000	8,9674297
276500	1026000	8,4201212
277000	1026000	7,9116616
277500	1026000	7,4914156
278000	1026000	7,1629656
278500	1026000	6,9180807
279000	1026000	6,7566815
279500	1026000	6,6731838
280000	1026000	6,6756265
280500	1026000	6,7696629
281000	1026000	6,9659224
281500	1026000	7,2806975
282000	1026000	7,7369723
282500	1026000	8,3653234
283000	1026000	9,2041484
283500	1026000	10,298213
284000	1026000	11,692744
284500	1026000	13,427825
285000	1026000	15,51287
285500	1026000	11,275941
286000	1026000	4,3770106

Tabla II.3 Caso I. Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento estimado
 Parámetro difuso: Transmisividad (continuación)

Coord. X	Coord. Y	Imprecisión
286500	1026000	3,4710782
287000	1026000	4,8498554
287500	1026000	12,580846
288000	1026000	33,579167
288500	1026000	35,044801
289000	1026000	35,402184
289500	1026000	34,839222
290000	1026000	33,587495
290500	1026000	31,856763
291000	1026000	29,82484
291500	1026000	27,629542
292000	1026000	25,373058
292500	1026000	23,12765
293000	1026000	20,946325
293500	1026000	18,870025
294000	1026000	16,915693
294500	1026000	15,24068
295000	1026000	13,863357
295500	1026000	12,749075
296000	1026000	11,865628
296500	1026000	11,188629
297000	1026000	10,701294
297500	1026000	10,39056
298000	1026000	10,278546
298500	1026000	10,252104
299000	1026000	10,235381
299500	1026000	10,225181
300000	1026000	10,221967
300500	1026000	10,230675
301000	1026000	10,230675
301500	1026000	10,230675
302000	1026000	10,230675
302500	1026000	10,230675

Tabla II.4 Caso II. Caudal máximo y mínimo estimado
 Parámetro difuso: Transmisividad

Coord. X	Coord. Y	Q max estim.	Q min estim.
270000	1026000	243,33923	0
270500	1026000	243,33923	0
271000	1026000	243,33923	0
271500	1026000	243,33923	0
272000	1026000	243,33923	0
272500	1026000	243,33923	0
273000	1026000	243,33923	0
273500	1026000	243,33923	0
274000	1026000	243,33923	0
274500	1026000	243,33923	0
275000	1026000	212,44358	0
275500	1026000	209,83718	0
276000	1026000	204,15217	0
276500	1026000	189,41208	0
277000	1026000	188,48675	0
277500	1026000	190,63731	0
278000	1026000	190,52135	0
278500	1026000	184,23534	0
279000	1026000	185,38486	0
279500	1026000	174,12043	0
280000	1026000	172,63586	0
280500	1026000	172,63258	0
281000	1026000	166,99474	0
281500	1026000	160,83908	0
282000	1026000	157,90419	0
282500	1026000	157,69601	0
283000	1026000	159,6401	0
283500	1026000	162,27231	0
284000	1026000	160,63842	0
284500	1026000	158,14146	0
285000	1026000	152,02344	0
285500	1026000	142,79982	0
286000	1026000	130,9209	10,09344

Tabla II.4 Caso II. Caudal máximo y mínimo estimado
 Parámetro difuso: Transmisividad (continuación)

Coord. X	Coord. Y	Q max estim.	Q min estim.
286500	1026000	123,95938	17,711733
287000	1026000	128,15657	2,2971928
287500	1026000	132,40253	0
288000	1026000	134,81333	0
288500	1026000	134,98928	0
289000	1026000	133,47095	0
289500	1026000	130,57742	0
290000	1026000	129,32574	0
290500	1026000	127,24188	0
291000	1026000	127,33594	0
291500	1026000	128,77182	0
292000	1026000	132,14693	0
292500	1026000	134,00508	0
293000	1026000	136,24696	0
293500	1026000	146,60532	0
294000	1026000	150,82798	0
294500	1026000	168,08225	0
295000	1026000	178,55861	0
295500	1026000	186,92468	0
296000	1026000	188,7913	0
296500	1026000	188,7913	0
297000	1026000	195,041	0
297500	1026000	195,041	0
298000	1026000	195,041	0
298500	1026000	195,041	0
299000	1026000	195,041	0
299500	1026000	195,041	0
300000	1026000	195,041	0
300500	1026000	212,44358	0
301000	1026000	212,44358	0
301500	1026000	212,44358	0
302000	1026000	212,44358	0
302500	1026000	212,44358	0

Tabla II.5. Abatimientos estimados s_1, s_3 y s_4
 Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal

Coord X	Coord Y	S1(qminTmin)	S3(qminTmax)	S4(qmaxTmax)
270000	1026000	0	0	12,76695529
270500	1026000	0	0	12,76695529
271000	1026000	0	0	12,76695529
271500	1026000	0	0	12,76695529
272000	1026000	0	0	12,76695529
272500	1026000	0	0	12,76695529
273000	1026000	0	0	12,76695529
273500	1026000	0	0	12,76695529
274000	1026000	0	0	12,82436305
274500	1026000	0	0	13,08549382
275000	1026000	0	0	13,2482684
275500	1026000	0	0	13,85369832
276000	1026000	0	0	14,59761891
276500	1026000	0	0	15,50026424
277000	1026000	0	0	16,84860981
277500	1026000	0	0	18,39382211
278000	1026000	0	0	19,79783891
278500	1026000	0	0	20,62018237
279000	1026000	0	0	21,79954789
279500	1026000	0	0	21,6164003
280000	1026000	0	0	22,39148374
280500	1026000	0	0	23,16779895
281000	1026000	0	0	22,92914229
281500	1026000	0	0	22,30633693
282000	1026000	0	0	21,80723268
282500	1026000	0	0	21,36051908
283000	1026000	0	0	20,88892805
283500	1026000	0	0	20,22966125
284000	1026000	0	0	18,94400546
284500	1026000	0	0	17,46851909
285000	1026000	0	0	15,76304038
285500	1026000	0	0	14,00468229
286000	1026000	10,196732	0,93903121	14,78107044

Tabla II.5. Abatimientos estimados S1, S3 y S4
 Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal (continuación)

Coord X	Coord Y	S1(qminTmin)	S3(qminTmax)	S4(qmaxTmax)
312000	1041500	0	0	11,69262134
312500	1041500	0	0	11,63845053
313000	1041500	0	0	11,73003325
313500	1041500	0	0	11,73003325
314000	1041500	0	0	11,73003325
314500	1041500	0	0	11,73003325
315000	1041500	0	0	11,93201042
315500	1041500	0	0	11,93201042
316000	1041500	0	0	12,0601884
316500	1041500	0	0	12,0601884
317000	1041500	0	0	12,21827268
317500	1041500	0	0	12,21827268
318000	1041500	0	0	12,28429937
318500	1041500	0	0	12,42970672
319000	1041500	0	0	12,51193841
319500	1041500	0	0	13,55003942
320000	1041500	0	0	13,55003942
270000	1042000	0	0	11,42221599
270500	1042000	0	0	11,35043007
271000	1042000	0	0	11,07401449
271500	1042000	0	0	11,00940989
272000	1042000	0	0	10,89259819
272500	1042000	0	0	10,68777491
273000	1042000	0	0	10,36520249
273500	1042000	0	0	9,905454777
274000	1042000	0	0	9,305788821
274500	1042000	0	0	8,597008738
275000	1042000	0	0	7,759083986
275500	1042000	0	0	6,818822879
276000	1042000	1,91124766	1,30361618	8,722947196
276500	1042000	1,0754392	0,0690829	8,353987639
277000	1042000	2,68504004	0,19966302	9,488935368
277500	1042000	0	0	9,179179935

Caso II. Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento

Tabla II.6 estimado

Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal

Coord. X	Coord. Y	Imprec[s ₄ -s ₁]	Imprec[s ₄ -s ₃]
270000	1026000	1,17259723	1,17259723
270500	1026000	1,17259681	1,17259681
271000	1026000	1,17259599	1,17259599
271500	1026000	1,17259661	1,17259661
272000	1026000	1,17259664	1,17259664
272500	1026000	1,17259625	1,17259625
273000	1026000	1,17259675	1,17259675
273500	1026000	1,17259672	1,17259672
274000	1026000	1,17397798	1,17397798
274500	1026000	1,18024523	1,18024523
275000	1026000	1,18044387	1,18044387
275500	1026000	1,20779251	1,20779251
276000	1026000	1,22541148	1,22541148
276500	1026000	1,23558555	1,23558555
277000	1026000	1,26706006	1,26706006
277500	1026000	1,29581843	1,29581843
278000	1026000	1,30264888	1,30264888
278500	1026000	1,29357025	1,29357025
279000	1026000	1,35989383	1,35989383
279500	1026000	1,46066836	1,46066836
280000	1026000	1,48871842	1,48871842
280500	1026000	1,35196714	1,35196714
281000	1026000	1,30905588	1,30905588
281500	1026000	1,3274234	1,3274234
282000	1026000	1,3712951	1,3712951
282500	1026000	1,43570126	1,43570126
283000	1026000	1,47180422	1,47180422
283500	1026000	1,46824019	1,46824019
284000	1026000	1,45272224	1,45272224
284500	1026000	1,43030926	1,43030926
285000	1026000	1,40371886	1,40371886
285500	1026000	1,37356676	1,37356676
286000	1026000	0,67565708	0,67565708

Caso II. Imprecisión relativa del intervalo de abatimiento
Tabla II.6 estimado
 Parámetros difusos: Transmisividad y Caudal (continuación)

Coord. X	Coord. Y	Imprec[s4-s1]	Imprec[s4-s3]
286500	1026000	0,02579264	0,02579264
287000	1026000	1,23146201	1,23146201
287500	1026000	1,18320103	1,18320103
288000	1026000	1,15880136	1,15880136
288500	1026000	1,15106702	1,15106702
289000	1026000	1,14456019	1,14456019
289500	1026000	1,13269152	1,13269152
290000	1026000	1,11639069	1,11639069
290500	1026000	1,08604619	1,08604619
291000	1026000	1,05259771	1,05259771
291500	1026000	1,02228854	1,02228854
292000	1026000	0,99809172	0,99809172
292500	1026000	0,97359934	0,97359934
293000	1026000	0,95176121	0,95176121
293500	1026000	0,94773863	0,94773863
294000	1026000	0,9437884	0,9437884
294500	1026000	0,97797365	0,97797365
295000	1026000	0,99614684	0,99614684
295500	1026000	1,08563864	1,08563864
296000	1026000	1,1625581	1,1625581
296500	1026000	1,20127768	1,20127768
297000	1026000	1,19762311	1,19762311
297500	1026000	1,18430903	1,18430903
298000	1026000	1,1715026	1,1715026
298500	1026000	1,16176846	1,16176846
299000	1026000	1,15541738	1,15541738
299500	1026000	1,15183077	1,15183077
300000	1026000	1,15074572	1,15074572
300500	1026000	1,16440297	1,16440297
301000	1026000	1,16440283	1,16440283
301500	1026000	1,16440279	1,16440279
302000	1026000	1,16440302	1,16440302
302500	1026000	1,16440278	1,16440278

Tabla II.7 Caso III. Intervalo de abatimiento estimado[s₃-s₆]
 Parametro difusos: Transmisividad, Caudal y Coeficiente de Almacenamiento

Coord. X	Coord. Y	s ₃ (QmaxTmaxCmin)	s ₆ (QmaxTmaxCmax)
270000	1026000	12,20711216	12,08924673
270500	1026000	12,20711216	12,08924673
271000	1026000	12,20711216	12,08924673
271500	1026000	12,20711216	12,08924673
272000	1026000	12,20711216	12,08924673
272500	1026000	12,20711216	12,08924673
273000	1026000	12,20711216	12,08924673
273500	1026000	12,20711216	12,08924673
274000	1026000	12,26189322	12,14347478
274500	1026000	12,51106922	12,39013391
275000	1026000	12,6629373	12,53970581
275500	1026000	13,24009035	13,11090566
276000	1026000	13,94879536	13,81219662
276500	1026000	14,80721133	14,66130086
277000	1026000	16,09231645	15,93309178
277500	1026000	17,56535805	17,39093906
278000	1026000	18,9031814	18,71482651
278500	1026000	19,68526024	19,48842832
279000	1026000	20,80895803	20,60040621
279500	1026000	20,63173096	20,42442562
280000	1026000	21,36949043	21,15432716
280500	1026000	22,10874166	21,8857752
281000	1026000	21,87990997	21,65901199
281500	1026000	21,2851406	21,07014512
282000	1026000	20,80907617	20,59893133
282500	1026000	20,38366701	20,17800746
283000	1026000	19,93513529	19,73433048
283500	1026000	19,30798739	19,11394467
284000	1026000	18,08306252	17,90180566
284500	1026000	16,6769606	16,51031146
285000	1026000	15,05078328	14,90082969
285500	1026000	13,37344807	13,24055247
286000	1026000	11,6323648	11,51705471

Tabla II.7 Caso III. Intervalo de abatimiento estimado[s₃-s₆]
 Parametro difusos: Transmisividad, Caudal y Coeficiente de Almacenamiento (continuación)

Coord. X	Coord. Y	s ₃ (QmaxTmaxCmin)	s ₆ (QmaxTmaxCmax)
286500	1026000	9,818357114	9,72154802
287000	1026000	8,122616113	8,043346744
287500	1026000	6,732037661	6,666996891
288000	1026000	5,765878038	5,710605899
288500	1026000	5,104903126	5,05623694
289000	1026000	4,652263538	4,608073855
289500	1026000	4,334095277	4,293017405
290000	1026000	4,157431683	4,118084231
290500	1026000	4,060378828	4,021962518
291000	1026000	4,098772619	4,059978103
291500	1026000	4,22667696	4,186637099
292000	1026000	4,471209747	4,42879607
292500	1026000	4,76918831	4,723845868
293000	1026000	5,184708469	5,135267664
293500	1026000	5,879245925	5,823050033
294000	1026000	6,648795494	6,584972713
294500	1026000	7,836637492	7,761221668
295000	1026000	8,909304523	8,823301999
295500	1026000	9,889251193	9,793534715
296000	1026000	10,5242364	10,42213097
296500	1026000	10,9784267	10,87170902
297000	1026000	11,59449042	11,48167056
297500	1026000	11,80496914	11,69000656
298000	1026000	11,80458075	11,68962212
298500	1026000	11,73779464	11,62351611
299000	1026000	11,69341786	11,57959112
299500	1026000	11,66916063	11,55558082
300000	1026000	11,66195305	11,5484466
300500	1026000	11,95319585	11,83717761
301000	1026000	11,95319585	11,83717761
301500	1026000	11,95319585	11,83717761
302000	1026000	11,95319585	11,83717761
302500	1026000	11,95319585	11,83717761

APÉNDICE A

CONCEPTOS ESTADÍSTICOS BÁSICOS

Espacio Muestral.

Es el conjunto de todos los resultados posibles de un experimento. El espacio muestral puede ser finito, infinito y discreto e infinito y no discretizable.

Variable Aleatoria

Es una función real valorada definida en un espacio muestral. Los puntos de muestra son las variables independientes.

En esta definición se debe observar que la variable aleatoria x es una función. En notación matemática, una función se indica así:

$$y = f(x) \tag{A.1}$$

en la que x es la variable independiente e y el valor de la función $f(x)$. Por ejemplo si se tiene, $y=x+1$, se puede escribir la variable aleatoria x como

$$x=x(w) \tag{A.2}$$

en la que w es la variable independiente y x es el valor individual que toma la variable aleatoria $x(w)$. Entonces, según la definición w es el conjunto de puntos de la muestra del espacio muestral. Es decir que $x(w)$ está definida para un espacio muestral.

Esperanza Matemática

La esperanza matemática de una variable x , es la media aritmética ponderada presentada en términos de probabilidad.

Sea x una variable con n resultados, la esperanza matemática de la variable x , que se representa por $E(x)$ se define como:

$$E(x) = x_1P(x = x_1) + x_2P(x = x_2) + \dots + x_nP(x = x_n) \tag{A.3}$$

Varianza.

Es una medida de la dispersión de los valores con respecto a su media. La varianza se formula como:

$$Var(x) = \sigma^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (\text{A.4})$$

donde μ representa la media.

Desviación Típica o Estándar.

Se llama desviación a la diferencia entre un valor individual x_i y la media μ . En símbolos:

$$e = x_i - \mu \quad (\text{A.5})$$

donde e es la desviación o desvío.

La desviación típica se utiliza para obtener la información del grado en que un dato se aparta de la media y del grado en que se aparta de todos los demás datos de la misma distribución.

La desviación típica de la variable x es la raíz cuadrada de la varianza y se expresa de la manera siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (\text{A.6})$$

Coefficiente de Variación.

El coeficiente de variación mide la dispersión relativa de una distribución de frecuencia y se usa para comparar la dispersión de dos distribuciones de frecuencia del mismo tipo. Su expresión es:

$$V = \frac{\sigma}{\mu} \quad (\text{A.7})$$

donde V es el coeficiente de variación

Teoría de la Probabilidad

Se tienen dos enfoques diferentes de la probabilidad. El primero está basado en el principio de razón insuficiente y el segundo es la teoría de la frecuencia de la probabilidad.

El principio de razón insuficiente señala que cuando no hay fundamentos para preferir uno de los posibles resultados o sucesos a cualquier otro, todos deben considerarse que tienen la misma probabilidad de ocurrir.

El principio de la razón insuficiente lo estableció Laplace (1749-1827) de la siguiente manera: “La teoría de la probabilidad consiste en reducir todos los elementos de la misma clase a cierto número de casos igualmente posibles, es decir, que nosotros debemos estar igualmente indecisos ante su existencia y para determinar la cantidad de casos favorables para el uso cuya probabilidad se busca. La relación de este número con el de todos los casos posibles, es la medida de la probabilidad, que es, por tanto, sencillamente una fracción cuyo numerador es el número de todos los casos posibles”. Según esta teoría, la probabilidad de que

$$P(A) = \frac{m}{n} \quad (\text{A.8})$$

donde m es el número de casos favorables y n es el número de casos posibles.

El segundo enfoque es el de la primera teoría de la frecuencia para explicar la probabilidad lo explica Kolmogorov (1933) que se postula como sigue: dado un experimento E y un evento A , podemos asignar un número P al evento A . Este número P tiene las siguientes características; cuando el experimento se repite una gran cantidad de veces n y el evento ocurre m veces, la frecuencia relativa m/n será prácticamente igual a ese número P .

Axiomas de la teoría probabilística

a.- Dado un experimento E con resultados posibles mutuamente excluyentes E_1, E_2, \dots, E_n se asigna un número positivo tal que:

$$P(E_i) \geq 0 \quad (\text{A.9})$$

y se llama la probabilidad del suceso E_i ,

b.- La suma de las probabilidades de todos los sucesos posibles mutuamente excluyentes es la unidad:

$$P(E_1) + P(E_2) + \dots + P(E_n) = 1 \quad (\text{A.10})$$

c.- La probabilidad de que ocurra uno de dos sucesos mutuamente excluyentes E_i o E_j , es igual a la suma de sus probabilidades:

$$P(E_i \cup E_j) = P(E_i) + P(E_j) \quad (\text{A.11})$$

Distribución Normal

Un gran número de fenómenos aleatorios están distribuidos aproximadamente en forma normal y se sabe por experiencia que una gran cantidad de fenómenos aleatorios tienen distribuciones prácticamente normales. Por esto, la distribución normal tiene una gran aplicación en estadística y es una de las distribuciones de mayor interés.

La curva normal es la expresión gráfica de la distribución normal, que es una distribución de frecuencias que tiene muchas observaciones cercanas al centro de la distribución y luego disminuyen gradual y simétricamente.

Las propiedades de la curva normal son:

- Es simétrica y tiene forma de campana
- La media está en la mitad y divide el área en dos mitades, y la media, la mediana y la moda tienen el mismo valor.
- La curva es asintótica con el eje horizontal.

Distribución Log-normal

Existen procesos hidrológicos cuya distribución de frecuencia presentan una asimetría positiva y no una distribución normal.

Sin embargo en muchos casos, cuando la variable es estrictamente positiva es posible hacer la transformación:

(A.12)

$$y = \ln(x)$$

la cual describe una distribución normal.

La relación entre los momentos de primer y segundo orden se expresan como:

$$m_x = e^{\left(m_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right)} \quad (\text{A.13})$$

$$\sigma_x^2 = m_{(x)}^2 (e^{\sigma_y^2} - 1) \quad (\text{A.14})$$

donde m_x y m_y es la media de los datos originales sin y con transformación logarítmica respectivamente, σ_x^2 y σ_y^2 son las varianzas de los datos sin y con transformación logarítmica.

www.bdigital.ula.ve