

---

**EL RADAR METEOROLÓGICO COMO HERRAMIENTA PARA LA MEDICIÓN  
DE LA PRECIPITACIÓN ESPACIALMENTE DISTRIBUIDA**

**LEIDY LIZETH ACOSTA CASTILLO  
JESÚS DANIEL PÉREZ HERNÁNDEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2011**

**EL RADAR METEOROLÓGICO COMO HERRAMIENTA PARA LA MEDICIÓN  
DE LA PRECIPITACIÓN ESPACIALMENTE DISTRIBUIDA**

**LEIDY LIZETH ACOSTA CASTILLO  
JESÚS DANIEL PÉREZ HERNÁNDEZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil**

**Director**

**Ing. LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA (M. Sc.)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2011**

## DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, mi inspiración y fortaleza en momentos de debilidad e incertidumbre, mi apoyo incondicional y amigo fiel a lo largo de mi existencia, a mi familia por el gran apoyo que me han brindado en cada instante de mi vida, a mis amigos cercanos que de una u otra forma me han llenado de ánimo para continuar en el camino y a mis amigos lejanos que aunque no están presentes siempre han tenido una palabra de apoyo para mí y a todos aquellos que directa o indirectamente me han brindado su mano y han hecho posible la realización de esta meta.*

**Leidy Acosta Castillo**

## DEDICATORIA

*Este trabajo de grado, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha disposición por parte de los autores y su director de proyecto, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación.*

*Primero y antes que nada, dedicarle este trabajo a Dios agradeciéndole, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.*

*Para mis padres Misael y Ligia, por su comprensión y ayuda en los altibajos de mi vida. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.*

*A mis hermanos Melissa, Erika, Johanna y Sebastián por acompañarme día tras día en el transcurso de esta vida, brindándome su apoyo y colaboración en los momentos buenos como en los malos, a mis dos razones de ser Juan Camilo y Chiara Melania que con su inocencia y ternura hacen de mi una mejor persona.*

*Finalmente a mis amigos quienes regalaron muchos buenos momentos en la vida que con su apoyo y comprensión ayudaron a forjar lo que hoy en día soy.*

*A todos ellos, Muchas gracias de todo corazón.*

**Jesús Daniel Pérez Hernández**

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Al Padre Eterno muchas gracias porque sin su favor no hubiese sido posible la realización de este objetivo.

A nuestros padres, por su esfuerzo y empeño en hacer de nosotros personas llenas de valores y virtudes, por su apoyo y comprensión en todo momento y sobre todo por creer en nosotros siempre.

Al ingeniero Luis Alberto Capacho, por su disposición y colaboración en la realización de este documento.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
1. EL RADAR METEOROLOGICO	26
1.1 RESEÑA HISTORICA	26
1.2 FUNDAMENTOS	28
1.2.1 Radar Meteorológico	28
1.2.2 Funcionamiento Básico	29
1.2.3 Captación de la energía por una gota de lluvia	30
1.2.3.1 Ecuación del radar	31
1.2.3.2 Principio de la medida de lluvia por radar	32
1.3 PROCESO DE ADQUISICIÓN DE LOS DATOS RADAR Y FORMAS HABITUALES DE REPRESENTACIÓN	32
1.3.1 Proceso de toma de datos	32
1.3.2 Formas de representación	34
1.3.3 Muestreo Vertical	36
1.3.4 Muestreo vertical en RHI (Range Height Indicator)	37
1.4 TIPOS DE RADARES METEOROLÓGICOS	40
1.5 OTRO TIPO DE MEDIDAS QUE REALIZA EL RADAR	43
1.5.1 Medida de la velocidad del viento (Radar Doppler)	43
1.5.2 Doble polarización	46
1.5.3 Sistema Biestático	47
1.6 INTEGRACIÓN DE TODOS LOS DATOS DE RADAR EN SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN EN TIEMPO REAL	48
1.7 APLICACIONES METEOROLÓGICAS	49
1.7.1 Consulta en tiempo real de los datos de radar	49
1.8 ESTUDIOS DE LOS DIVERSOS TIPOS DE PRECIPITACIÓN	52
1.8.1 Simulación para la lluvia de tipo estratiforme	54
1.8.2 Simulación para la lluvia de tipo convectivo	55

2. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN DE UNA CUENCA HIDROLÓGICA	58
2.1 MODELADOR HIDROLÓGICO-HMS	58
2.1.1 HEC-HMS	58
2.1.2 HEC-GEOHMS	60
2.2 COMPONENTES DEL HMS	61
2.2.1 Componentes del modelo de la cuenca	62
2.2.2 Componentes del modelo meteorológico	64
2.2.3 Componentes de las especificaciones de control	66
2.2.4 Componentes de la entrada de datos	67
2.2.5 Interfaz del usuario	68
2.3 PRECIPITACIÓN DISTRIBUIDA Y OBTENCIÓN DE DATOS DE RADAR MEDIANTE LA HERRAMIENTA NOAA ( <i>NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION'S WEATHER AND CLIMATE TOOLKIT</i> )	69
2.3.1 Instalacion, manejo y obtencion de datos de radar por medio del programa NOAA <i>Weather And Climate Toolkit</i>	70
2.4 MODELO DISTRIBUIDO DE LA CUENCA AMERICANRIVER MEDIANTE LA HERRAMIENTA ARCVIEW 3.2 CON EXTENSION GEOHEC-HMS	81
2.4.1 Obtención de la dirección de flujo	84
2.4.2 Acumulación del flujo	85
2.4.3 Stream Definition	86
2.4.4 Stream Segmentation	88
2.4.5 Delineación de la cuenca	88
2.4.6 Watershed Polygon processing	89
2.4.7 Stream Segment Processing	90
2.4.8 Watershed Aggregation	91
2.4.9 Configuración del modelo hidrológico	92
2.4.10 Centroides de las subcuencas	94
2.4.11 Camino más largo del flujo	95

2.4.12 Centroides al camino más largo de flujo	96
2.4.13 Número de curva de las subcuencas	97
2.4.14 Proceso de Modclark	98
2.4.15 Modclark Grid CN	98
2.4.16 Creación del proyecto para Hec-Hms	99
2.4.16.1 Autonombrado de tramos de cauces	99
2.4.16.2 Basin AutoName	100
2.4.16.3 Map to HMS Units	100
2.4.16.4 HMS Check Data	100
2.4.16.5 Esquema HMS	100
2.4.16.6 Regular Legend	101
2.4.16.7 Add Coordinates	101
2.4.16.8 Modelo de cuenca agregado	101
2.4.16.9 Grid Cell Parameter File	101
2.4.16.10 Distributed Basin Model	101
2.4.16.11 HMS Project Setup	101
3. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CUENCA HIDROLÓGICA ANTE UN MISMO EVENTO DE PRECIPITACIÓN, MODELADA EN HEC-HMS CON DATOS DE LLUVIA DISTRIBUIDOS TOMADOS DE RADAR Y CON DATOS PUNTUALES DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS	102
3.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA VS MODELACIÓN AGREGADA	105
3.2 DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA O CUENCA DE ESTUDIO	107
3.3 DATOS DE PRECIPITACION PARA EL MODELO DE LA CUENCA	108
3.4 MODELO EN HEC-HMS- MODELO DISTRIBUIDO	109
3.5 MODELO EN HEC-HMS-Modelo agregado	117
3.6 PRESENTACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y COMPARACION ENTRE ELLOS	124

4. PRESUPUESTO NECESARIO PARA LA POSIBLE IMPLEMENTACIÓN DE UN RADAR (LAWR) EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER	125
4.1 PRINCIPIO DEL RADAR METEOROLOGICO LAWR (LOCAL AREA WEATHER RADAR)	125
4.2 CÓMO FUNCIONA EL RADAR LAWR	126
4.3 RANGO Y PRECISIÓN	127
4.4 SOFTWARE DE APOYO	128
4.5 EQUIPO DEL RADAR LAWR- HADWARE	129
4.5.1 Especificaciones Técnicas	131
4.6 ¿QUIÉN PUEDE BENEFICIARSE DE UNA INSTALACIÓN LAWR?	132
4.7 APLICACIONES HIDROLOGÍA URBANA	133
4.7.1 LAWR: Opciones de hidrología urbana	133
4.7.1.1 Mayor facilidad de uso	134
4.8 ALGUNOS RADARES LAWR INSTALADOS EN EL MUNDO	135
4.9 ZONAS DE COVERTURA DEL RADAR LAWR SOBRE ESTACIONES METEOROLOGICAS DE SANTANDER MEDIANTE ARCVIEW GIS 3.2.	141
4.10 COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y EL RADAR (LAWR)	144
4.10.1 Costos totales de radares meteorológicos	149
4.10.2 Costos primer mantenimiento de radares	149
4.10.3 Determinación de la relación beneficio –costo de la implementación de los radares meteorológicos	150
CONCLUSIONES	152
BIBLIOGRAFÍA	155
ANEXOS	158

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Descripción de los elementos hidrológicos	63
Tabla 2. Métodos de cálculos para subcuencas	64
Tabla 3. Descripción de los métodos incluidos en el modelo meteorológico	66
Tabla 4. Componentes de los datos de entrada	68
Tabla 5. Cuadro comparativo entre los dos tipos de modelación.	106
Tabla 6. Ubicación estaciones de precipitación.	108
Tabla 7. Datos de precipitación en mm	109
Tabla 8. Tiempos de concentración para cada subcuenca	114
Tabla 9. Tiempos de retardo para cada río	114
Tabla 10. Tabla de datos del modelo distribuido.	117
Tabla 11. Tabla de datos del modelo puntual, con 15 puntos de registro de precipitación	120
Tabla 12. Tabla resumen de resultados	124
Tabla 13. Especificaciones técnicas	131
Tabla 14. Ubicación geográfica de radares	143
Tabla 15. Costos de estaciones meteorológicas por categoría.	145
Tabla 16. Características del radar vs. Estaciones meteorológicas.	145
Tabla 17. Interés efectivo anual he incremento anual en los costos de mantenimiento	146
Tabla 18. Interés efectivo anual.	147

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Imágenes recogidas en el MIT, en Cambridge Massachusetts, en 1942 por un radar de banda S	28
Figura 2. Esquema de la emisión de un pulso de duración $t$ y de longitud de onda $\lambda$	29
Figura 3. Esquema de la distribución de la energía emitida por el radar en un lóbulo central y una serie de lóbulos secundarios	30
Figura 4. Esquema de la energía captada y reflejada por una gota	30
Figura 5. Volumen de tamaño radial $c \cdot t/2$ que se corresponde con la energía medida en un instante determinado y asociada a una distancia dada	31
Figura 6. Toma de datos	33
Figura 7. Volúmenes muestreados en una exploración radar, dada por el ángulo de tiro $j$ respecto a la horizontal	34
Figura 8. Proyección del PPI sobre la horizontal	35
Figura 9. Imagen del PPI sobre la horizontal	35
Figura 10. Esquemmatización de los fragmentos de elevación utilizados para generar una imagen CAPPI	35
Figura 11. Esquemmatización de los fragmentos de elevación utilizados para generar una imagen CAPPI	36
Figura 12. Radar vertical de alta resolución de la universidad de Brixtol	37
Figura 13. Registro medido por el radar vertical punto al de la universidad de Bristol durante la experiencia HIRE	37
Figura 14. Ejemplo de Muestreo en RHI registrado por el radar CP-2 del NCAR, que muestra una célula convectiva de gran desarrollo vertical	38
Figura 15. PPI de la primera elevación registrado por el radar del INM de Barcelona el 14 de Septiembre de 1999	39
Figura 16. Corte vertical de la información volumétrica radar a lo largo de la traza A-B marcada en la Figura 15	39

Figura 17. Corte vertical de la información volumétrica radar a lo largo de la traza C-D marcada en la Figura 15	39
Figura 18. Radar banda s.	40
Figura 19. Radar de banda C del INM instalado en el Pico de les Agulles, Corbera, a unos 25 km de Barcelona	41
Figura 20. Radar de banda X del LTHE de Grenoble instalado junto a Marsella durante la experiencia HIRE	42
Figura 21. En el instante $T_1$ la gota de agua devuelve una onda en dirección al radar indicando una distancia $D$	43
Figura 22. En el instante $t_2$ la misma gota de agua devuelve una onda en dirección al radar que indica una distancia $d+s$	43
Figura 23. Viento que registraría un radar Doppler en caso de que el campo de viento fuera en dirección este-oeste y decreciera con la altura	44
Figura 24. Campo de viento en dirección al radar registrado por el radar de banda S del MRO	45
Figura 25. Ilustración de una onda polarizada en el eje vertical (polarización habitual en la mayoría de radares sin doble polarización)	46
Figura 26. Ilustración de una onda polarizada en el eje horizontal	46
Figura 27. Concepto del radar Biestático formado por un radar emisor y receptor, y cuatro elementos receptores	47
Figura 28. Sistema Biestático instalado en la universidad de McGill	47
Figura 29. Imagen del aspecto del gestor de información radar utilizado en el mro de la universidad de McGill (rapid-browser)	48
Figura 30. Aspecto del gestor de información radar creado por la UPC en colaboración con el INM (VisRad)	49
Figura 31. Red de radares Doppler de banda S de EEUU (NEXRAD)	50
Figura 32. Animación de la lluvia registrada sobre EEUU por la red de radares NEXRAD	51
Figura 33. También es posible consultar la información con mucho más detalle especificando un área mucho más reducida	51

Figura 34. Lluvia estratiforme registrada por el radar vertical de alta resolución de la Universidad de Brixtol el 18/11/98 en Marsella	53
Figura 35. Lluvia convectiva registrada por el radar vertical de alta resolución de la Universidad de Brixtol el 04/09/98 en Marsella	53
Figura 36. Visualización de la degradación del campo de lluvia con la distancia al radar	54
Figura 37. Simulación de la degradación del campo de lluvia con la distancia al radar cuando se simula el caso de un muestreo vertical continuo y uno con un número limitado de elevaciones	56
Figura 38. Interfaz del modelador Hec-Hms	60
Figura 39. Visualización extensión Hec-GeoHms	61
Figura 40. Visualización de los componentes del modelo de la cuenca del software Hec-hms	62
Figura 41. Visualización de los componentes del modelo meteorológico	65
Figura 42. Visualización de la ventana de especificaciones de control	67
Figura 43. Ventana de la interfaz del programa Hec-Hms	69
Figura 44. Portal de descarga del programa weather and climate toolkit	70
Figura 45. Esquema de la ejecución del programa	70
Figura 46. Orden de las imágenes de radar mediante el programa weather and climate toolkit	71
Figura 47. Manejo del programa weather and climate toolkit	71
Figura 48. Portal en la web, en donde se solicita las imágenes de radar del programa weather and climate toolkit en norte America,Puerto rico,Hawaii y Corea del Sur	72
Figura 49. Localización del radar meteorológico California.	73
Figura 50. Ubicación de las imágenes de radar del día 27/02/2010 del radar meteorológico en Sacramento-California	74
Figura 51. Visualización de la lluvia en forma análoga antes de descargar los archivos de lluvia	74
Figura 52. Espera de los datos en inventario del nexrad	75



Figura 53. Orden enviada a la cuenta de correo	75
Figura 54. Opción Load data	76
Figura 55. Número de orden de la solicitud	76
Figura 56. Visualización de las diferentes opciones de información	77
Figura 57. Selección de la información	78
Figura 58. Exportación de la información	78
Figura 59. Imágenes en formato .shp vistas en Arcview de los datos de radar	79
Figura 60. Clasificación de la precipitación	80
Figura 61. Imagen en Arcview clasificada la precipitación	80
Figura 62. Interfaz software arcview 3.2	81
Figura 63. Extensiones del software arcview 3.2	82
Figura 64. Nuevas vistas de trabajo del software arcview 3.2	83
Figura 65: MDE sin corregir, con depresiones	84
Figura 66. DEM Filling Sinks Operations	84
Figura 67. Flow Direction Computation	85
Figura 68. Grid visualizando la dirección del flujo	85
Figura 69. Flow Accumulation Computation	86
Figura 70. Grid visualizando la acumulación del flujo	86
Figura 71. Cambio de unidades de la vista en arcview.	87
Figura 72. Stream GRID Definition.	87
Figura 73. Stream Threshold Definition.	88
Figura 74. Stream Link GRID Definition	88
Figura 75. GRID Watershed Definition	89
Figura 76. Visualización del delineado de subcuencas	89
Figura 77. Watershed Polygon Processing.	90
Figura 78. Subcuencas delineadas. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.	90
Figura 79. Stream Segment Processing.	91
Figura 80. Cauces de la cuenca. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.	91
Figura 81. Creating Aggregated Watersheds.	92
Figura 82. Watershed Aggregation Fuente: Modelo en Arcview 3.2.	92



Figura 83. Generate the New Project	93
Figura 84. Delimitación del área de estudio.	93
Figura 85. Project manager Theme	94
Figura 86. Área de estudio	94
Figura 87. Centroides de la subcuenca	95
Figura 88: Camino más largo del flujo	96
Figura 89. Centro geométrico del camino más largo	96
Figura 90. Atributos finales de la cuenca preparada para exportar a HEC-HMS	99
Figura 91. Autonombrado de tramos.	100
Figura 92. Ubicación geográfica Cuenca Americanriver- Sacramento, California	107
Figura 93. Ubicación estaciones de precipitación en la cuenca	109
Figura 94. Información de archivo .hms	110
Figura 95. Información de archivo .basin	111
Figura 96. Información de archivo .mod	112
Figura 97. Vista del proyecto abierto en Hec-Hms	115
Figura 98. Hidrograma de salida de la cuenca para el modelo de lluvia distribuido con malla 2000X2000	116
Figura 99. Cuadro de resultados del modelo distribuido	116
Figura 100. Esquema de subcuencas en Hec-Hms.	117
Figura 101. Esquema de subcuencas con ubicación de pluviógrafos en los Centroides de la cuenca en Hec-Hms.	119
Figura 102. Hidrograma de salida de la cuenca para el modelo de lluvia puntual, con 15 puntos de registro.	119
Figura 103. Cuadro de resultados del modelo puntual, con 15 pluviógrafos de registro	120
Figura 104. Esquema de subcuencas con ubicación de un único pluviógrafos en el Centroide de la cuenca en Hec-Hms	121
Figura 105. Hidrograma de salida de la cuenca para el modelo de lluvia puntual, con 1 punto de registro	122

Figura 106. Cuadro de resultados del modelo puntual con un único pluviógrafos	122
Figura 107. Tabla de datos del modelo puntual, con 1 punto de registro de precipitación	123
Figura 108. Presentación gráfica de precipitación observada con un LAWR.	128
Figura 109. Esquema de la estructura del sistema del radar LAWR.	129
Figura 110. Gabinete donde se almacena los datos en 2 PC del radar LAWR.	130
Figura 111: Antena del radar LAWR	131
Figura 112. Evento de lluvia simulada en Mike urbano para un sistema de drenaje	134
Figura 113. Radar LAWR de Horn Reefs	135
Figura 114: Radar LAWR de Egedal	136
Figura 115. Radar LAWR de Aarhus	136
Figura 116. Radar LAWR de Klein Matterhorn	137
Figura 117. Radar LAWR de Belgrade	137
Figura 118. Radar LAWR de Omega	138
Figura 119. Radar LAWR de Dortmund	138
Figura 120. Radar LAWR de Gandía	139
Figura 121. Radar LAWR de Vejle	139
Figura 122. Radar LAWR de Toenda	140
Figura 123. Radar LAWR de Monte Cerro de Consuelo	140
Figura 124. Radar LAWR de Génova	141
Figura 125. Representación de las estaciones meteorológicas de Santander	142
Figura 126. Representación de las posiciones geográficas de los radares de Santander	143
Figura 127. Representación de las áreas de cobertura del radar	144

## RESUMEN

**TITULO:** EL RADAR METEREOLÓGICO COMO HERRAMIENTA PARA LA MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ESPACIALMENTE DISTRIBUIDA\*

**AUTORES:** ACOSTA CASTILLO, Leidy Lizeth.  
PÉREZ HERNÁNDEZ, Jesús Daniel\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Precipitación, radar meteorológico, modelo hidrológico, cuenca hidrológica.

### DESCRIPCIÓN

En primer lugar, se han investigado los diferentes tipos de radares meteorológicos y la importancia de su información en la hidrología de una región, no obstante se han tenido en cuenta los diferentes modelos y modeladores hidrológicos existentes. Entre ellos se encuentra el software gratuito formado por el conjunto Hms más la extensión en arcview 3.2-geohms, que ofrecen la posibilidad de trabajar con información espacializada, tanto de las propiedades del terreno como de las características hidrológicas y la precipitación.

Seguidamente, se han presentado las posibilidades de obtener información espacializada de dichos parámetros, con el objetivo de realizar un análisis hidrológico distribuido con datos reales de radar y compararlo con un modelo agregado realizado con datos de estaciones meteorológicas. Se ha llevado a un ejemplo práctico en el American River, estudiando la respuesta hidrológica de la cuenca de drenaje que constituye el cauce principal de dicho río desde su nacimiento hasta el punto de salida de la cuenca.

Para la realización de este ejemplo se han obtenido datos de precipitación procedentes de la red de radares Nexrad mediante el software libre wather a climate toolkit y se han transformado a un formato legible por el modelo del Hec, asimismo, se ha obtenido información distribuida de los parámetros que caracterizan la cuenca: usos del suelo, tipología del suelo y número de curva. Con todo esto, se ha estudiado la respuesta hidrológica de la cuenca para diversos casos, 1.dentro de la modelación distribuida y otros 2.para la modelación “clásica”, así mismo se ha discretizado la factibilidad económica de implementar una red de radar en Santander, determinando el beneficio-costado de dicho sistema.

---

\* Trabajo de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Luis Alberto Capacho Silva M.Sc.

## ABSTRACT

**TITLE:** EL RADAR METEREOLÓGICO COMO HERRAMIENTA PARA LA MEDICIÓN DE LA PRECIPITACION ESPACIALMENTE DISTRIBUIDA

**AUTHORS:** ACOSTA CASTILLO, Leidy Lizeth.  
PÉREZ HERNÁNDEZ, Jesús Daniel\*\*

**KEYWORDS:** Precipitation, meteorological radars, hydrologic models, hydrologic basin.

## DESCRIPTION

In the first place, research has been done on the different types of meteorological radars and the importance of their information in the hydrology of a region, even if the different and existing types of the hydrologic models and [modelarodes] have been kept in mind. Among these is the software created by the Hms group, as well as the version arcview 3.2-geohms, that offer the possibility of working with specialized information, like the properties of the terrain and the characteristics of hydrology and precipitation.

Next are the possibilities of gaining specialized information in the parameters before mentioned, with the purpose of conducting a hydrologic analysis together with specific radar data, and comparing the data with a specific model complete with meteorological stages. In the American River, a case study has been completed where they took the hydrological data collected and studied the information, from the basin of the river, up its course and to its source.

For this project we collected the necessary precipitation information from the radar center Nexrad, and its networks, using the [Weather and Climate Toolkit] software, and we have converted the data into a comprehensive report using the model provided by Hec. Likewise, we have collected the information of the parameters that characterizes the channel of the river: erosion, typology of the ground floor, and the curvature. With all of this, we have studied the hydrological model of the rivers channel for a variety of scenarios: 1. within distributed model-types, 2. for the "classic" model-type. In the same sense we have [discretizado] the economical feasibility of implementing a radar network in Santander, determined by the profit-cost of the project.

---

\* Trabajo de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director: Luis Alberto Capacho Silva M.Sc.

## INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales se han convertido en uno de los fenómenos más frecuentes en nuestra actualidad; uno de estos hechos más destacados y con alto impacto negativo son las inundaciones como producto de frecuentes tormentas de fuerte intensidad que ocasionan lluvias intensas, incrementos repentinos en el nivel de lagos y desbordamientos del cauce de los ríos.

Anualmente las inundaciones son las causantes de generar graves daños a la infraestructura y a la economía de un país, sin contar con las miles de pérdidas de vidas humanas, lo que atrae la atención y el interés nacional e internacional.

En efecto es generalmente conocido que las lluvias forman el principal factor de control de la dinámica de los procesos hidrológicos, por lo tanto su acertada medición en el tiempo y en el espacio constituye un aspecto de fundamental importancia para la realización de pronósticos de crecientes seguros y confiables.

En Colombia como en la mayoría de países de Latinoamérica las medidas tomadas para mitigar dichos eventos naturales son deficientes por carecer de los conocimientos, el presupuesto y las herramientas adecuadas para su eventual prevención, sin embargo en muchos países europeos a raíz de muchos eventos extremos de lluvia de los que se destacan los ocurridos en el noroeste de Italia durante noviembre de 1994 y en el norte y centro de Europa durante enero de 1995, se han implementado tecnologías como la tecnología de la teledetección la cual juega un papel importante a la hora de alertar, prevenir y mitigar los efectos que causan una precipitación severa, esta tecnológicas de teledetección es el radar meteorológico, el cual permite mediante su funcionalidad estimar datos de lluvia en tiempo real distribuyéndola espacialmente. Así mismo esta captura de datos permite evaluar el comportamiento de una cuenca en eventos de

precipitación.

Uno de los objetivos a plantear en la utilización del radar meteorológico es la medida o mejor dicho la estimación cualitativa de la intensidad de la precipitación en superficie. Esta estimación está condicionada por mucho y varios factores, algunos de ellos relacionados con las características propias del radar y otros con las de los sistemas de precipitación. Entre los primeros se deben considerar, por ejemplo, la estrategia de muestreo o la longitud de onda utilizada y entre los segundos las distribuciones de tamaños de las gotas de lluvia o la estructura tridimensional de la precipitación.

La cuenca hidrográfica es la base para el manejo integrado del recurso hídrico. En ella se realizan las observaciones del ciclo hidrológico, se evalúan las potencialidades de los recursos hídricos y se define el desarrollo hidráulico: el uso del agua para riego, para el consumo humano, entre otros, y se establecen las medidas de alerta y prevención contra las inundaciones.

La precipitación en una cuenca varía en el espacio y en el tiempo, es decir la lluvia no es uniforme en toda el área de la cuenca y esta a su vez cambia su intensidad a través del tiempo. Por lo tanto, en el análisis hidrológico espacial de una cuenca debe tenerse en cuenta un tratamiento distribuido de la precipitación para intervalos de tiempos dados en función de las mediciones de las estaciones meteorológicas.

Dado que uno de los objetivos de la ingeniería es dotar al ser humano de las herramientas necesarias para protegerse del poder de los fenómenos naturales y de su carácter, a veces, destructivo, los modelos distribuidos podrían utilizarse para realizar predicciones de avenidas más ajustadas a la realidad. Dentro de este marco, se podrían mencionar las grandes avenidas provocadas por episodios de lluvia especialmente intensos y/o duraderos que se han sucedido a lo largo de la

historia y que han causado multitud de pérdidas tanto materiales como de vidas humanas. Estos sucesos, en algunos casos, han provocado las peores catástrofes que han asolado, en los últimos años, algunos puntos de la geografía mundial.

## 1. EL RADAR METEOROLOGICO

En este capítulo se hablará acerca de los principios básicos del radar meteorológico, sus características, funcionamiento, funcionalidad, aplicaciones etc. y el impacto que puede llegar a tener en la ingeniería civil, en lo que respecta principalmente a la rama de la hidrología, siempre y cuando se le dé el uso indicado.

### 1.1 RESEÑA HISTORICA<sup>1</sup>

El radar se fundamenta en las leyes de la reflexión de las ondas de radio, implícitas en las ecuaciones que controlan el comportamiento de las ondas electromagnéticas, planteadas por el físico británico James Clark Maxwell en 1864. El ingeniero alemán Christian Hulsmeier fue el primero en sugerir el aprovechamiento de este tipo de eco mediante su aplicación a un dispositivo de detección diseñado para evitar colisiones en la navegación marítima. En 1922 el inventor italiano Guglielmo Marconi desarrollo un aparato similar.

Todos los sistemas de radar usan un transmisor de radio de alta frecuencia que emite un haz de luz electromagnética, con una radiación de longitud de onda, comprendida entre algunos centímetros y cerca de 1[m]. Los objetos que se hallan en la trayectoria del haz reflejan las ondas de nuevo hacia el transmisor.

El primer experimento satisfactorio de detección a distancia tuvo lugar en 1924, cuando el físico británico Edward Víctor Appleton utilizó el eco de las ondas de radio para averiguar la altura de la ionosfera una capa ionizada de la atmosfera más alta capaz de reflejar las ondas de radio más largas.

---

<sup>1</sup> Fuente: Corrales Carlos, Sánchez Rafael. “curso de postgrado de climatología aplicada: El radar meteorológico y sus aplicaciones hidrológicas” (2000) Universidad Politécnica de Cataluña

El primer sistema útil de radar fue construido en 1935 por el físico británico Robert Watson Watt. Sus observaciones proporcionaron a Inglaterra una ventaja de partida en la aplicación de esta tecnología estratégica; en 1939, ya disponía de una cadena de estaciones de radar en las costas meridionales y orientales capaces de detectar ataques y amenazas tanto por aire como por mar. Ese mismo año, dos científicos británicos lograron el avance más importante para la tecnología del radar durante la segunda guerra mundial. El físico Henry Boot y el biofísico John T. Randall inventaron un tubo de electrones denominado magnetón de resonancia o magnetón de cavidad resonante. Este tipo de tubos es capaz de generar impulsos de radio de alta frecuencia con mucha energía, lo que permitió el desarrollo del radar de microondas, que trabaja en la banda de longitudes de onda muy pequeñas, inferiores a 1 [cm] usando el láser.

En los años 40, se inició el desarrollo de los radares que funcionan en frecuencias de microondas y que mostraron en forma fortuita la posibilidad de observar la lluvia de forma remota. Posteriormente se desarrollaron radares específicamente diseñados para la observación de la lluvia. En general, la medida radar se utiliza principalmente a nivel cualitativo y con propósitos hidrológicos.

En los últimos años se han producido avances tecnológicos principalmente por lo que se refiere a la digitalización de los sistemas radar y la adquisición de datos.

### **Aportes del radar meteorológico**

- Posibilidad de observar la lluvia de forma remota.
- Sobre grandes extensiones.
- Con una detallada discretización espacial (1x1, 2x2 km<sup>2</sup>).
- A intervalos de tiempo breves (entre 5 y 10 minutos).
- La información que se recoge se almacena en un punto.
- Permite estudiar la dinámica hidrológica de una región.
- Es una herramienta indispensable para la eventual prevención de desastres

naturales como resultado de fuertes eventos de lluvia.

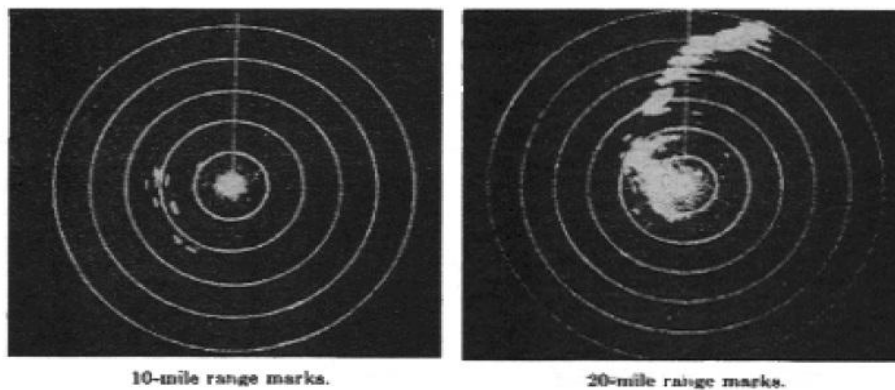
## 1.2 FUNDAMENTOS<sup>2</sup>

### 1.2.1 Radar Meteorológico

❖ La capacidad de los radares meteorológicos para detectar la lluvia ya era conocida a principios de los años 40 (ver Figura 1). Su desarrollo inicial se produjo durante la segunda guerra mundial consecuenta a la invención del magnetrón de resonancia, con el que fue posible emitir una cantidad considerable de potencia a unas longitudes de onda de varios centímetros.

❖ Una de las consecuencias fortuitas fue que la lluvia y la nieve se hicieron claramente visibles en las imágenes de radar. Esa nueva habilidad para detectar la lluvia y los fenómenos meteorológicos de forma remota, observar su patrón en el espacio y su evolución en el tiempo fue la impulsora del desarrollo de los radares meteorológicos

Figura 1. Imágenes recogidas en el MIT, en Cambridge Massachusetts, en 1942 por un radar de banda S



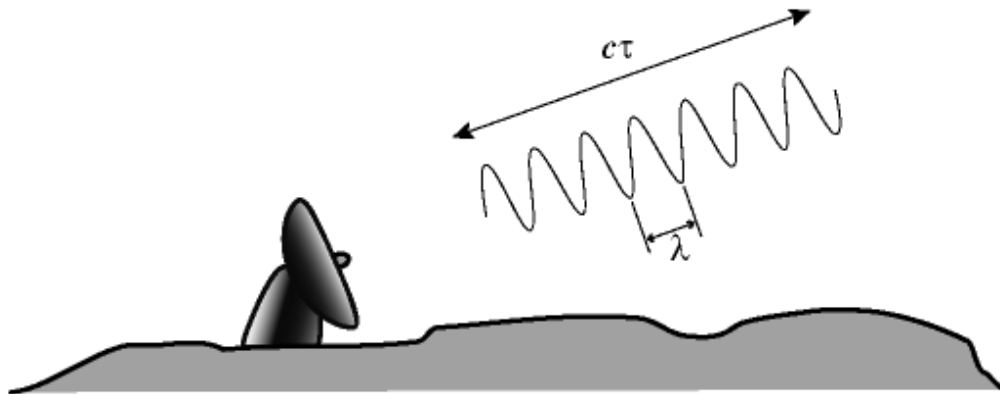
Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC. Extraída de El Radar en la meteorología, (Battan memorial and 40th anniversary of the radar meteorology, Ed. AMS).

<sup>2</sup> Curso de postgrado de climatología aplicada.(Universidad Politécnica de Cataluña, España)

### 1.2.2 Funcionamiento Básico

- El principio de funcionamiento del radar meteorológico es el de emitir a través de una antena un pulso de energía electromagnética de duración  $t$  (del orden de los ms) y de longitud de onda  $\lambda$  (del orden de los centímetros, ya que el blanco deseado son las gotas de agua. Figura 2).

Figura 2. Esquema de la emisión de un pulso de duración  $t$  y de longitud de onda  $\lambda$

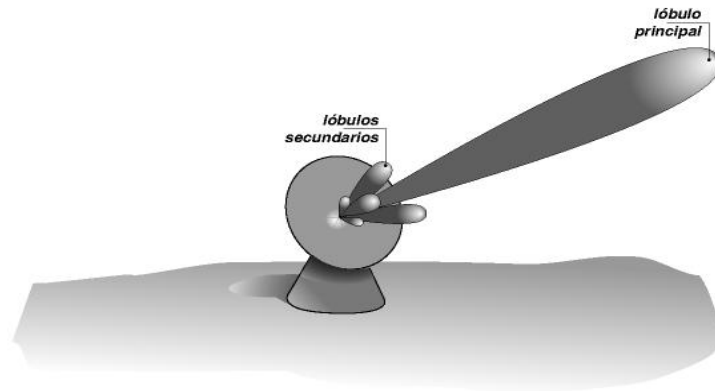


Pulso que al ser emitido a la velocidad de la luz,  $c$ , se extenderá por un intervalo  $c.t$ .

Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

- Esa energía se concentra en un haz que al emitirse al exterior y por efecto de la difracción toma una forma cónica. En el interior de ese cono la energía no se distribuye de forma uniforme sino en forma de lóbulo: es mucho mayor en el centro y decrece rápidamente al alejarse de éste.
- Debido a que es imposible confinar toda la energía en dicho cono parte de ésta escapa fuera de él. Como resultado la energía emitida se distribuye en forma de un lóbulo central (que es el que contiene la mayor parte de la energía) y una serie de lóbulos secundarios de menor energía (ver Figura 3).

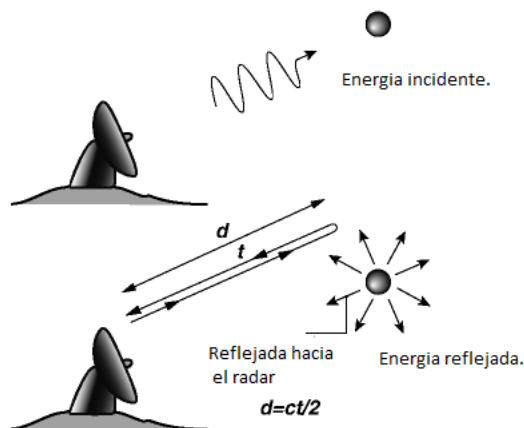
Figura 3. Esquema de la distribución de la energía emitida por el radar en un lóbulo central y una serie de lóbulos secundarios



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

**1.2.3 Captación de la energía por una gota de lluvia.** Cuando la energía proveniente del radar es interceptada por un 'objetivo' (por ejemplo, una gota de agua) se dispersa en todas direcciones (ver Figura 4), de forma que una fracción es devuelta en dirección al radar y es captada por el receptor (normalmente localizado en la misma antena). La distancia al 'objetivo' se determina registrando el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de la energía y sabiendo que dicha energía se transmite a la velocidad de la luz.

Figura 4. Esquema de la energía captada y reflejada por una gota



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

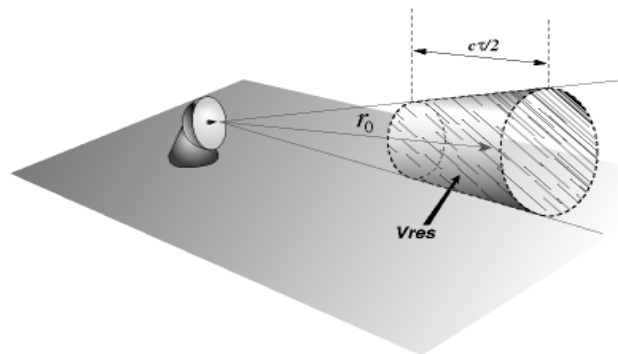
**1.2.3.1 Ecuación del radar.** En realidad lo que registra el radar es la energía devuelta en su dirección por las gotas de agua situadas en el interior de un cierto volumen  $V_{res}$  (ver Figura 5). Esa energía, que se mide en forma de potencia, se puede expresar como:

$$\overline{P}(r_0) = \frac{C}{L^2(r_0)r_0^2} Z(r_0)$$

Donde  $P$  es la potencia media devuelta por las gotas situadas en el interior del volumen  $V_{res}$  situado a una distancia  $r_0$  del radar. La potencia se expresa como media debido a que el radar usualmente emite un tren de  $n$  pulsos; así para un volumen situado a una distancia  $r_0$  se miden  $n$  valores de potencia que luego se promedian.

El motivo de tomar  $n$  medidas de un volumen es que de esta forma la medida final es más robusta (ya que la potencia varía en el tiempo debido al movimiento de las gotas en el interior del volumen); Por otro lado la constante  $C$  agrupa toda una serie de características relacionadas con el radar, es lo que se conoce como la constante del radar. Finalmente la reflectividad,  $Z$ , es la variable relacionada con las gotas que se puede derivar una vez medida la potencia  $P$ . Posteriormente se muestra cómo se define dicha variable y cómo es posible relacionarla con la intensidad de lluvia.

Figura 5. Volumen de tamaño radial  $c \cdot t/2$  que se corresponde con la energía medida en un instante determinado y asociada a una distancia dada



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

**1.2.3.2 Principio de la medida de lluvia por radar.** La reflectividad  $Z$  se define como la suma de los diámetros a la sexta potencia de las gotas contenidas en el interior de un volumen, es decir,

$$Z = \int_0^{\infty} N(D)D^6 dD$$

Donde  $N(D)$  es función de distribución de las gotas de agua.

Por su parte la intensidad de lluvia se puede expresar como, el flujo de agua a través de una superficie, y también se puede formular en función de  $N(D)$  como,

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^{\infty} V(D)N(D)D^3 dD$$

A partir de datos experimentales de  $Z$  y  $R$  se ha comprobado que la relación entre ambas variables suele responder a una función potencial del tipo,

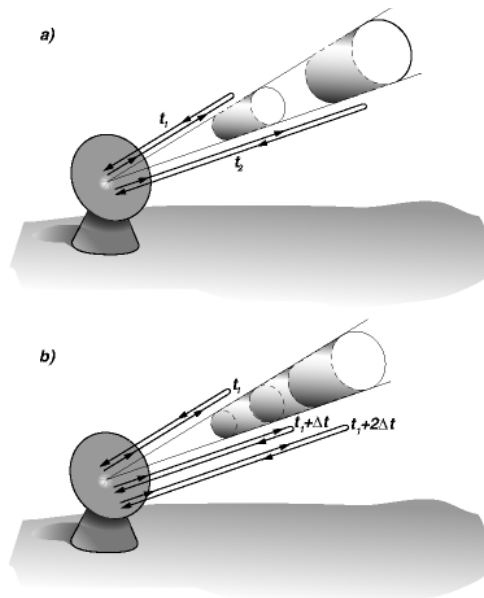
$$Z = aR^b, \text{ como } Z = 200R^{1.6}$$

## 1.3 PROCESO DE ADQUISICIÓN DE LOS DATOS RADAR Y FORMAS HABITUALES DE REPRESENTACIÓN

**1.3.1 Proceso de toma de datos.** Tras emitir un pulso, la potencia que el radar capta en distintos instantes se corresponde con la energía devuelta por diferentes volúmenes situados a lo largo del eje del haz y a distancia creciente de éste (Figura 6a).

Para que el muestreo espacial tenga una cierta continuidad lo que se suele hacer es registrar la potencia cada cierto  $dt$ , de forma que  $dt$  sea el tiempo que tarda en llegar al radar la potencia devuelta por volúmenes  $V_{res}$  consecutivos, es decir  $dt=t/2$  (Figura 6b)

Figura 6. Toma de datos



(a) Potencia registrada en los instantes  $t_1$  y  $t_2$ ,

(b) Si ésta se registra en instantes de tiempo separados  $dt = t / 2$ , se corresponderá con volúmenes  $V_{res}$  consecutivos

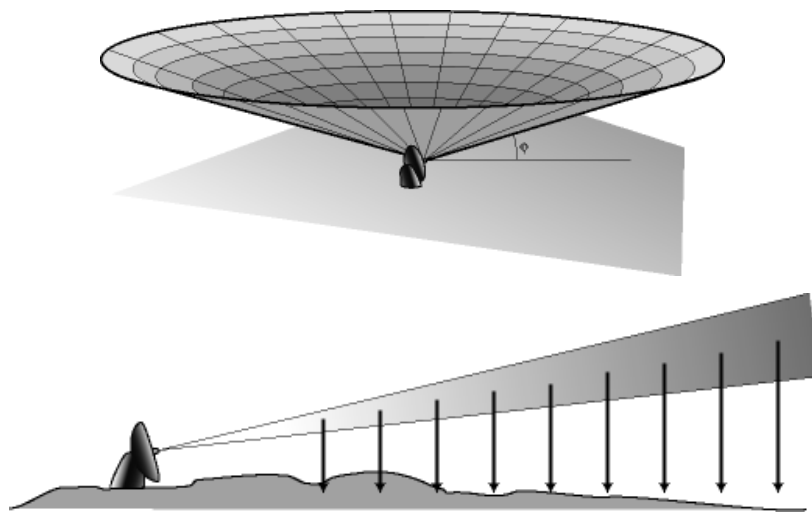
Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC (Universidad Politécnica de Cataluña).

Así, el radar emite un tren de  $n$  pulsos, como ya comentamos, y a continuación se produce un periodo de escucha en el que se registran las potencia devuelta por  $m$  volúmenes consecutivos para cada uno de los  $n$  pulsos. Como resultado para cada volumen se determinan  $n$  lecturas de potencia que finalmente se promedian para determinarlo (con  $i = 1$  hasta  $m$ ).

El procedimiento anterior de emisión-escucha se repite para cada dirección radial en la que se realiza un muestreo. De esta forma, fijado un cierto ángulo de la antena respecto a la horizontal, usualmente llamado elevación, el radar efectúa un barrido de la atmósfera girando 360 grados y realizando un número determinado de muestreos radiales (el tiempo de emisión-escucha es tan breve que no es necesario parar el movimiento para realizar cada medida por lo que la rotación del radar es de hecho continua y uniforme).

El resultado de una exploración es la reflectividad de los volúmenes de atmósfera situados sobre un cierto cono (ver figura 7), que también se suele denominar como información muestreada en una cierta elevación (donde elevación se refiere a un ángulo de tiro del radar). Este proceso se suele repetir para diversas elevaciones de manera que finalmente se obtiene un volumen semi-esférico de información.

Figura 7. Volúmenes muestreados en una exploración radar, dada por el ángulo de tiro  $\theta$  respecto a la horizontal



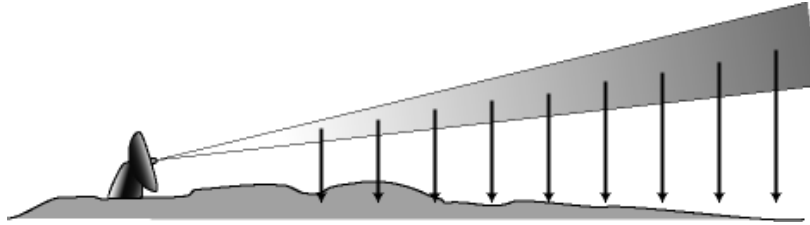
Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

**1.3.2 Formas de representación.** A partir de dicha información registrada en las diversas elevaciones se suelen generar dos tipos de imágenes:

1. **PPI**, (Plan Position Indicator), correspondiente con la reflectividad registrada en cada una de las elevaciones y que se proyecta sobre el plano horizontal. (Ver figura 8 y figura 9).
2. **CAPPI**, (Constant Altitud Plan Position Indicator), este segundo tipo de imagen trata de representar la reflectividad registrada sobre un plano a una altura constante. Para generar este segundo tipo de imagen se utilizan aquellos fragmentos de información de las diversas elevaciones que se encuentran más

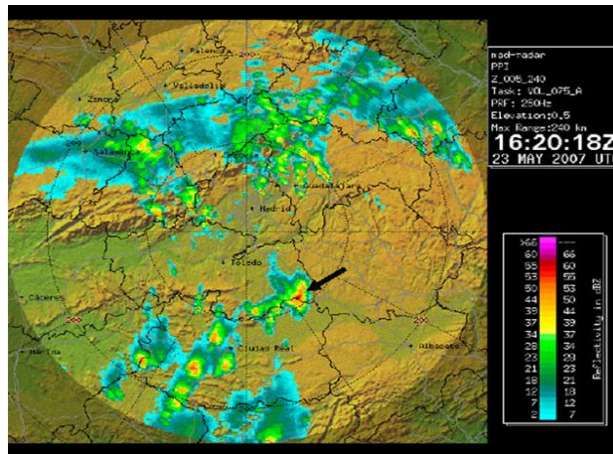
cerca de la altura para la que se quiere generar el CAPPI (ver figuras 10 y 11).

Figura 8. Proyección del PPI sobre la horizontal



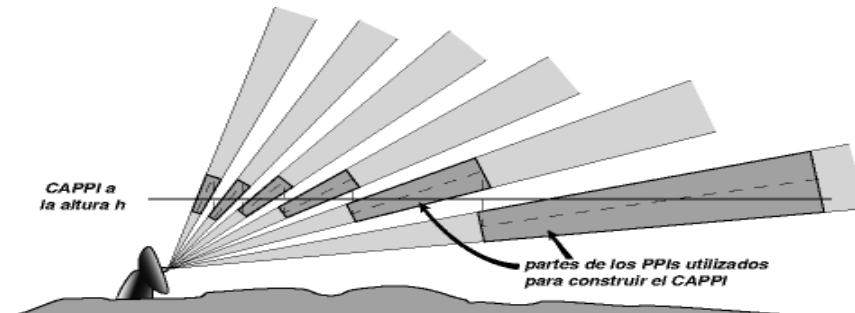
Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

Figura 9. Imagen del PPI sobre la horizontal



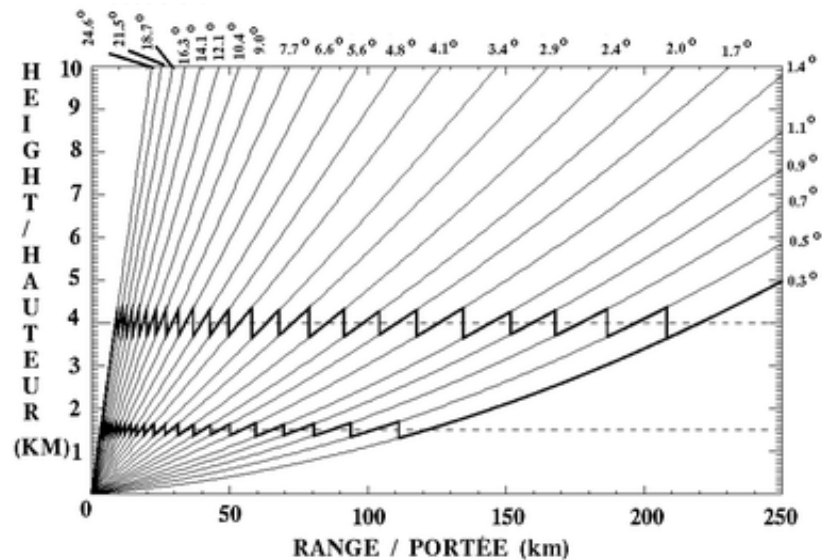
Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

Figura 10. Esquematación de los fragmentos de elevación utilizados para generar una imagen CAPPI



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

Figura 11. Esquematación de los fragmentos de elevación utilizados para generar una imagen CAPPI



Como ejemplo algunas imágenes recogidas en el radar del INM<sup>3</sup> en Barcelona.

Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

**1.3.3 Muestreo Vertical.** Otra manera es medir la reflectividad sobre la vertical del radar a lo largo del tiempo. Para esto es necesario el uso de radares verticales de alta resolución que generan registros muy detallado de lo que acontece en la vertical del radar. En la figura 12 se muestra el ejemplo de un radar vertical de la Universidad de Brixton situado en la ciudad de Marsella, durante el barrido del radar (experiencia HIRE) se obtuvo una imagen de precipitación en donde esta debería tener coordenadas vs. Tiempo, pero en este caso para otros fines, se ha transformado el tiempo en distancia suponiendo que el campo de lluvia se desplaza a una cierta velocidad constante. De esta manera la imagen representa un corte vertical del campo de lluvia con una gran resolución (ver figura 13).

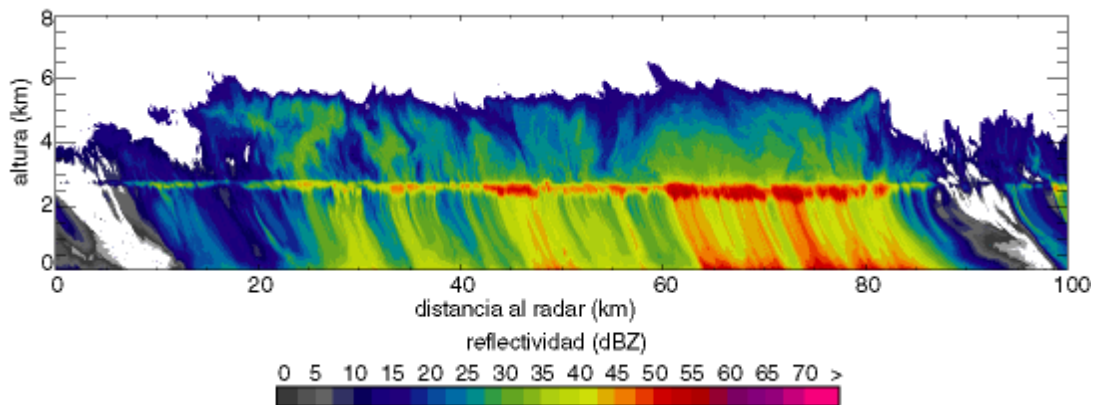
<sup>3</sup> INM: Instituto Nacional de Meteorología.

Figura 12. Radar vertical de alta resolución de la universidad de Brixtol



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

Figura 13. Registro medido por el radar vertical punto al de la universidad de Bristol durante la experiencia HIRE

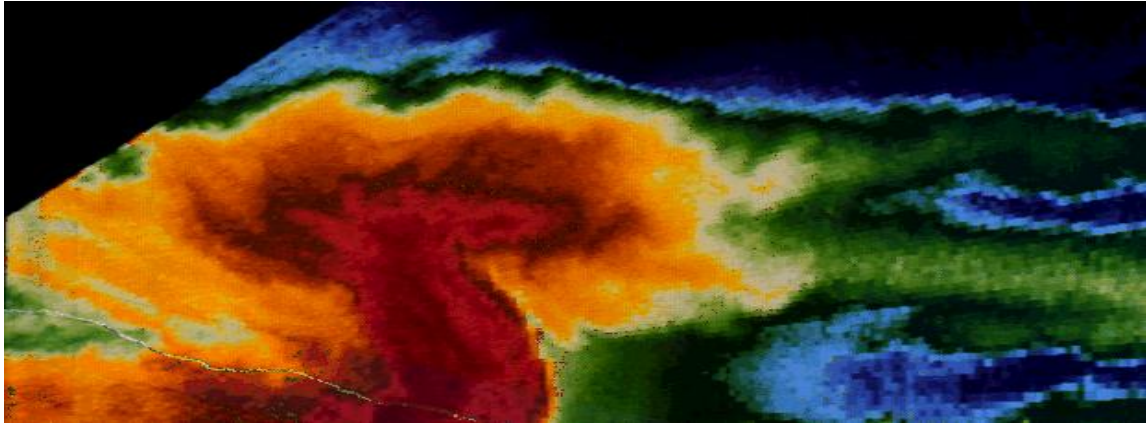


Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

**1.3.4 Muestreo vertical en RHI (Range Height Indicator).** Otro posible muestreo es mantener la antena fija en una dirección (o azimut respecto al noreste) y realizar una lectura incrementando el ángulo de elevación de la antena. Es lo que se conoce como muestreo en *Range Height Indicator (RHI)*.

El resultado es un corte vertical del campo de precipitación, que tiene coordenadas altura-distancia al radar (en la figura 14 inferior se enseña un ejemplo).

Figura 14. Ejemplo de Muestreo en RHI registrado por el radar CP-2 del NCAR, que muestra una célula convectiva de gran desarrollo vertical



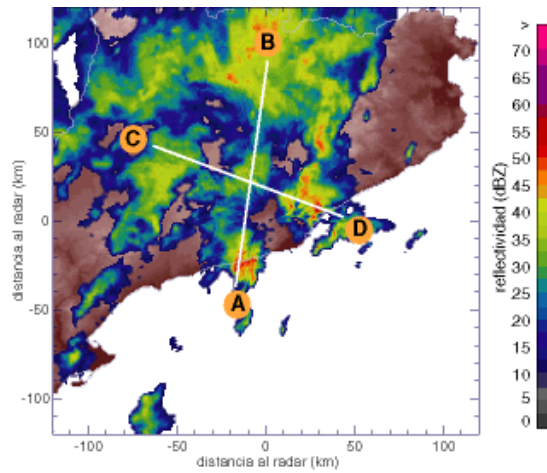
Fuente: Figura extraída de “El radar en meteorología”, (battan memorial and 40th anniversary of the radar meteorology, Ed. AMS).

### **Cortes verticales de la información volumétrica medida por el radar**

Otra manera de poder ver la información radar es a partir de cortes verticales de la información registrada por éste en las diversas elevaciones que realiza.

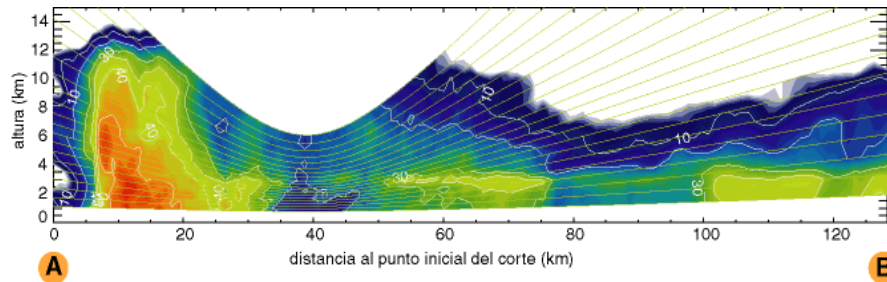
Como ejemplo en la figura 15 se muestra el PPI registrada en el radar del INM. Por su parte las figuras 16 y 17 presentan los cortes verticales a lo largo de las líneas A-B y C-D. Para generar dichos cortes lo que se hace es establecer los valores medidos por el radar que se encuentran sobre dichos planos. En las figuras 16 y 17 se han marcado también las líneas de las elevaciones que realiza el radar sobre los planos de corte (en este caso el radar realiza 20 elevaciones). Notar que evidentemente en los cortes mostrados la resolución es mucho menor que la generada por un radar vertical puntual, pero por contra este último no abarca una zona de gran tamaño como hace el radar de muestreo volumétrico.

Figura 15. PPI de la primera elevación registrado por el radar del INM de Barcelona el 14 de Septiembre de 1999



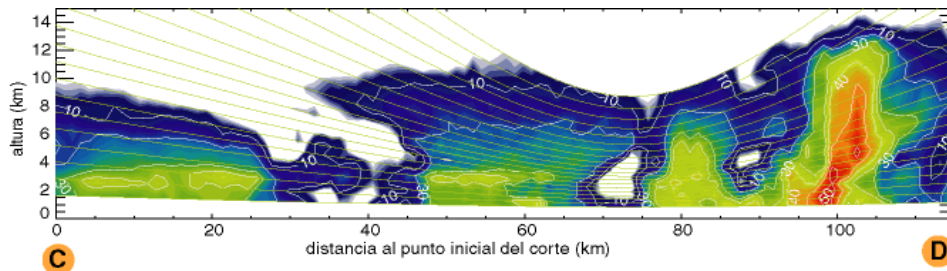
Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

Figura 16. Corte vertical de la información volumétrica radar a lo largo de la traza A-B marcada en la Figura 15



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

Figura 17. Corte vertical de la información volumétrica radar a lo largo de la traza C-D marcada en la Figura 15



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

## 1.4 TIPOS DE RADARES METEOROLÓGICOS

### BANDA S

- Frecuencia: entre 2-4 GHz
- Longitud de onda: 8-15 cm
- Utilizados a muy diversos rangos de distancia al radar ( $0 < r < 240\text{km}$ )

#### Ventajas:

- No se ven afectados por la atenuación<sup>4</sup>

#### Desventajas:

- Necesitan de un disco de grandes dimensiones, así como toda la maquinaria
- Precio elevado

Figura 18. Radar banda s.



Radars de banda S del Marshall radar Observatory (MRO), en Montreal, Canadá, con un disco de unos 10 m de diámetro



Vista interior del radar de banda S del NSSL donde es posible observar el ródomo y el reflector (o disco) de unos 9 m de diámetro

<sup>4</sup> Es la pérdida de potencia del haz de radiación electromagnética emitido por el radar al atravesar el medio en el que viaja. La atenuación afecta al camino de ida y vuelta del haz del radar.

## BANDA C

- Frecuencia: entre 4-8 GHz
- Longitud de onda: 4-8 cm
- Utilizados en rangos intermedios y próximos al radar (< 120 km)

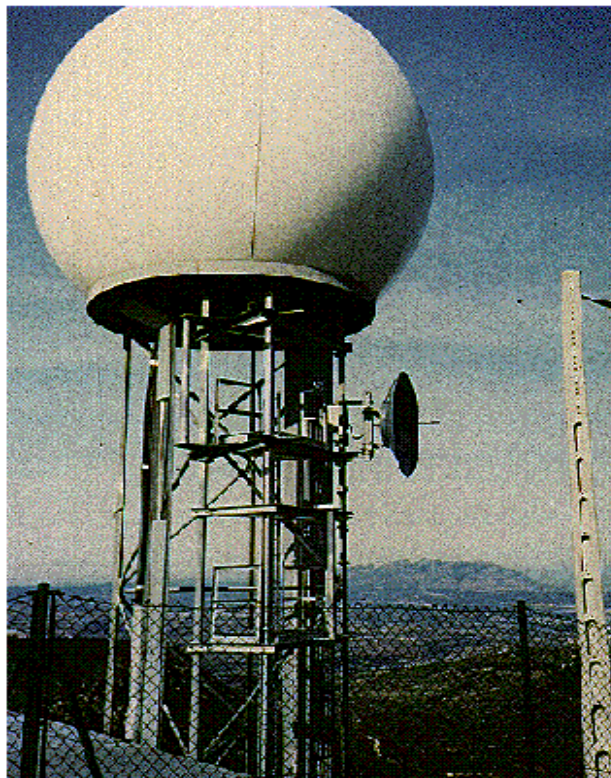
### Ventajas:

- Pequeño tamaño del disco: portabilidad
- Precio

### Desventajas:

- Afectados por la atenuación.

Figura 19. Radar de banda C del INM instalado en el Pico de les Agulles, Corbera, a unos 25 km de Barcelona



## **BANDA X**

- Frecuencia: entre 8-12 GHz
- Longitud de onda: 2.5-4 cm.
- Utilizados en rangos próximos al radar (< 60 km)

### **Ventajas:**

- Muy sensitivos a las partículas de pequeño tamaño.
- Útiles para el estudio del desarrollo de nubes.
- Pequeño tamaño del disco: portabilidad.
- Precio.

### **Desventajas:**

- Muy afectados por la atenuación.

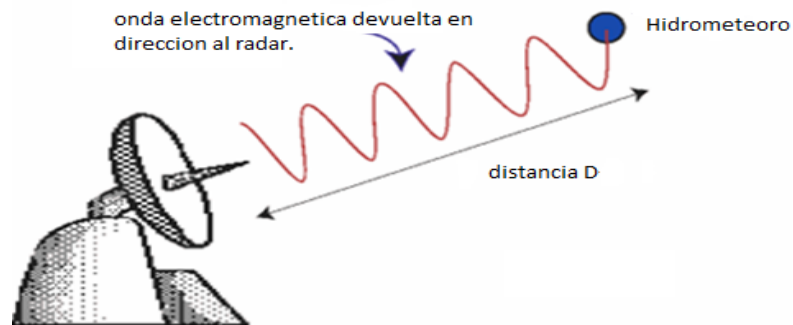
Figura 20. Radar de banda X del LTHE de Grenoble instalado junto a Marsella durante la experiencia HIRE



## 1.5 OTRO TIPO DE MEDIDAS QUE REALIZA EL RADAR

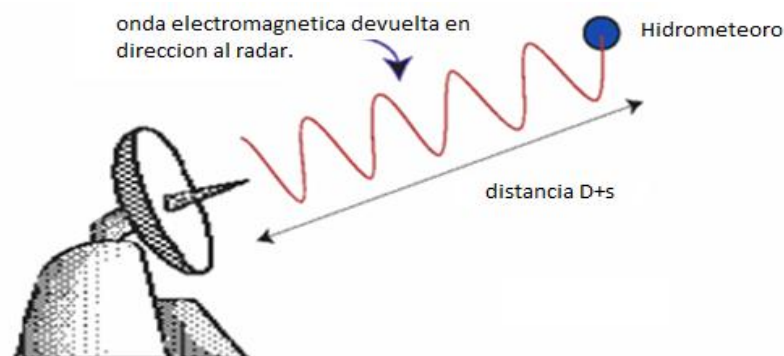
**1.5.1 Medida de la velocidad del viento (Radar Doppler).** El radar Doppler tiene la capacidad de medir información relativa a la velocidad en la dirección del radar de los blancos que detecta. Para ello utiliza el efecto Doppler al registrar la variación de la fase de la onda que le devuelven las gotas de agua.

Figura 21. En el instante  $T_1$  la gota de agua devuelve una onda en dirección al radar indicando una distancia  $D$



Fuente: Trabajo de grado Julián Andrés Cogollo Briceño “Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidro-climatológicos en Colombia”. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. 2005.

Figura 22. En el instante  $t_2$  la misma gota de agua devuelve una onda en dirección al radar que indica una distancia  $D+s$

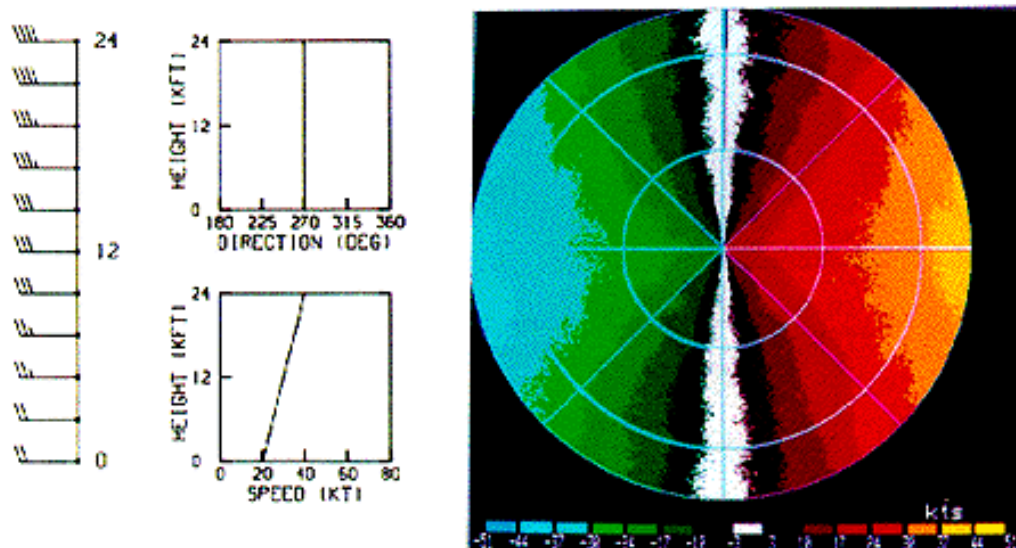


Fuente: Trabajo de grado Julián Andrés Cogollo Briceño “Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidro-climatológicos en Colombia”. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. 2005.

Esa información se relaciona con la velocidad del viento en dirección al radar aunque en muchos casos es difícil de interpretar.

Se supone, por ejemplo, el caso hipotético en el que la dirección del viento fuera constante, por ejemplo de este a oeste, y lloviera en toda el área muestreada por el radar. La imagen que se muestra representaría la información de viento que registraría el radar. Los colores cálidos, viento en dirección al radar, los fríos cuando es en dirección opuesta a éste.

Figura 23. Viento que registraría un radar Doppler en caso de que el campo de viento fuera en dirección este-oeste y decreciera con la altura



Fuente: Imagen extraída de la web sobre radar meteorológico de la [universidad de Illinois](#)

En este ejemplo se ha supuesto que la dirección del viento es constante (este-oeste) en altura pero su intensidad se incrementa con ésta. Esto permite entender que a medida que los alejamos del radar y aumenta la altura del haz aumenta la intensidad del viento registrado.

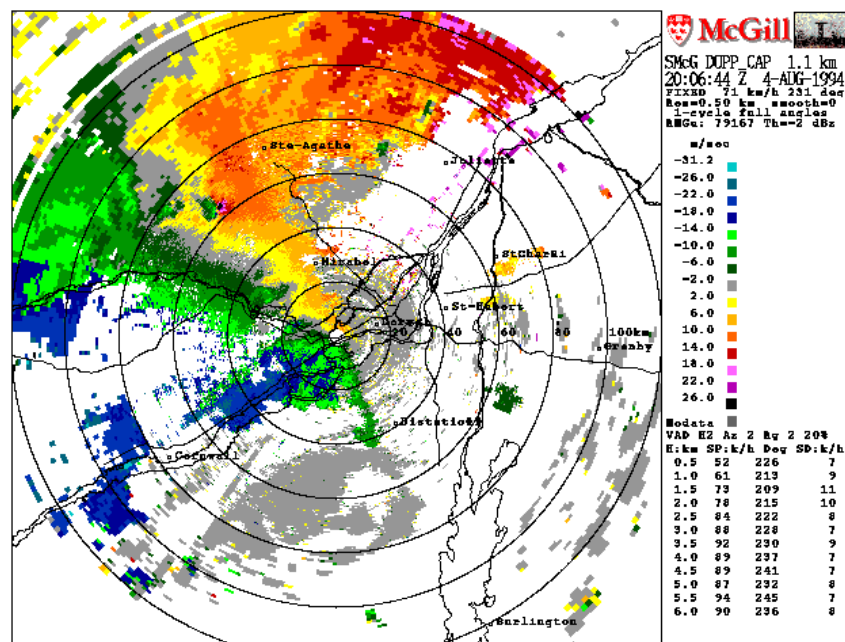
Además aparecerá una línea perpendicular a la dirección del viento en la cual la velocidad en dirección al radar es cero.

A pesar de la valiosa información que proporcionan las imágenes de viento en muchos casos son difíciles de interpretar ya que:

- a) El viento es rara vez uniforme.
- b) Sólo es posible medir esa velocidad allí donde se intercepte algo (en las áreas donde no llueve no se registrará información Doppler).

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de viento noreste-suroeste que sólo se visualiza en zonas en donde se registra lluvia (figura. 24, imagen recogida por el radar de banda S del MRO).

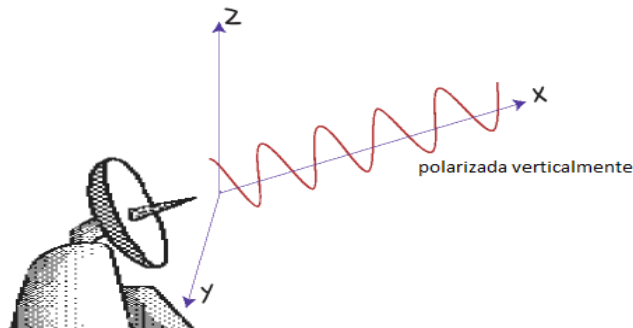
Figura 24. Campo de viento en dirección al radar registrado por el radar de banda S del MRO



Fuente: grahi (UPC).

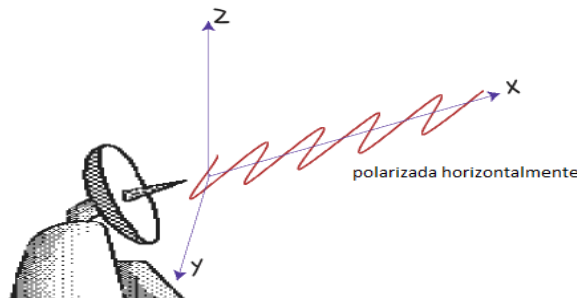
**1.5.2 Doble polarización.** Este es un campo en el que se tienen puestas grandes esperanzas. La idea es emitir una onda electromagnética polarizada verticalmente y horizontalmente. Los hidrometeoros en función de su forma devuelven diferentes cantidades de energía para cada una de las ondas (horizontal o vertical), lo cual permite extraer más información sobre las propiedades de los objetivos o blancos interceptados; comparando la energía recibida de las dos ondas es posible distinguir si los blancos son redondeados (como el granizo o los copos de nieve) o si son achatados como las gotas de agua.

Figura 25. Ilustración de una onda polarizada en el eje vertical (polarización habitual en la mayoría de radares sin doble polarización)



Fuente: Trabajo de grado Julián Andrés Cogollo Briceño “Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidro-climatológicos en Colombia”. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. 2005.

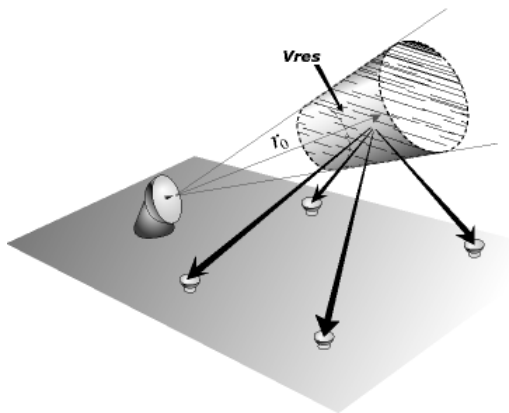
Figura 26. Ilustración de una onda polarizada en el eje horizontal



Fuente: Trabajo de grado Julián Andrés Cogollo Briceño “Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidro-climatológicos en Colombia”. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. 2005.

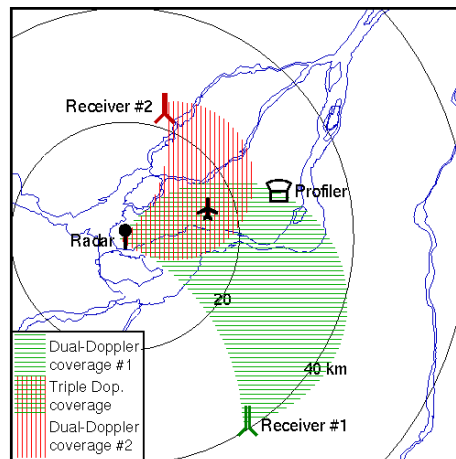
**1.5.3 Sistema Biestático.** Es una evolución del sistema Doppler y todavía se encuentra en una fase de investigación. El objetivo de este sistema es medir diferentes componentes del viento para así llegar a determinar el campo tridimensional de viento. Para ello se utiliza un sistema formado por un radar (que emite y recibe las ondas electromagnéticas) y diversos receptores.

Figura 27. Concepto del radar Biestático formado por un radar emisor y receptor, y cuatro elementos receptores



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

Figura 28. Sistema Biestático instalado en la universidad de McGill

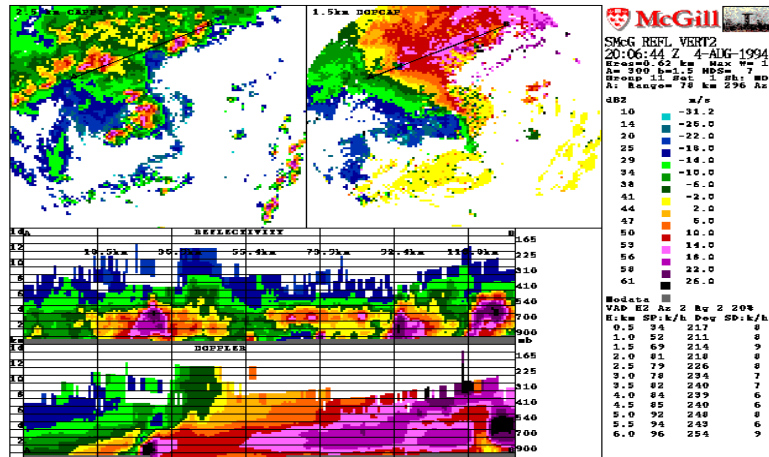


Fuente: Imagen extraída de la web del MRO, McGill University

## 1.6 INTEGRACIÓN DE TODOS LOS DATOS DE RADAR EN SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN EN TIEMPO REAL

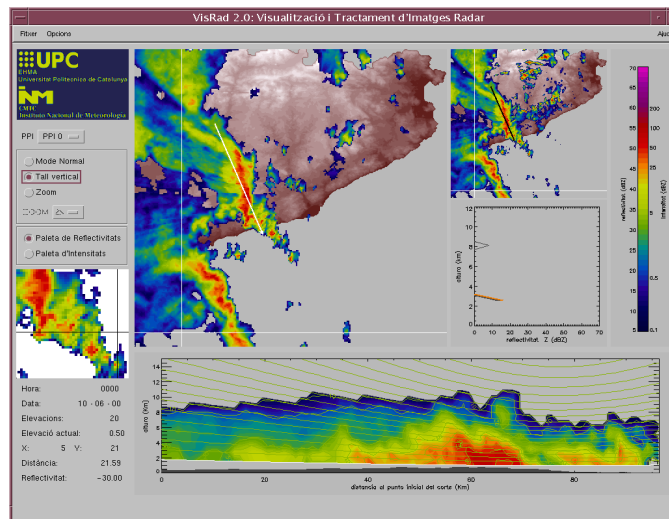
El conjunto de medidas realizado por el radar son usualmente integradas en programas que permiten de forma interactiva consultar en tiempo real los datos que el radar está recogiendo y manipularlos (realizar cortes verticales, obtener una previsión, aplicar algoritmos de ajuste de la imagen, etc.). En las siguientes imágenes se muestran algunos ejemplos de ese tipo de programas.

Figura 29. Imagen del aspecto del gestor de información radar utilizado en el mro de la universidad de McGill (rapid-browser)



Fuente: grahi (upc).

Figura 30. Aspecto del gestor de información radar creado por la UPC en colaboración con el INM (VisRad)



Fuente: Universidad Pontificia de Cataluña.

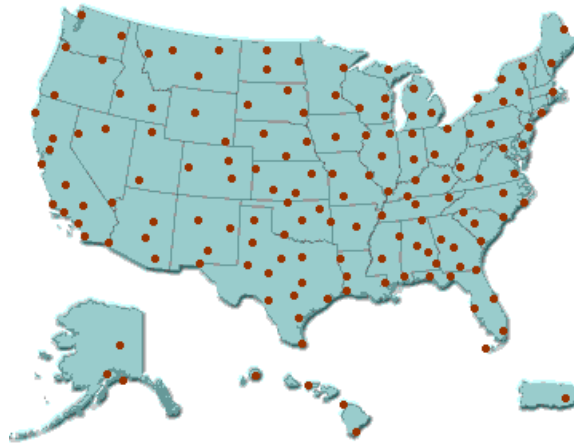
## 1.7 APLICACIONES METEOROLÓGICAS

**1.7.1 Consulta en tiempo real de los datos de radar.** En la actualidad existe una amplia gama de tecnología relacionada con el radar meteorológico y a nivel operacional muchos países han desarrollado redes de radares destinadas a la previsión meteorológica.

Así el radar meteorológico se ha convertido en un instrumento usual en medios como la televisión. En internet es posible consultar casi en tiempo real los productos radar proporcionados por servicios meteorológicos, universidades y centros de investigación.

Un caso ejemplar es el de la red de radares NEXRAD (*Next Generation Radar*) de EEUU, que a través de diversos canales proporciona de forma gratuita la información de todos los radares.

Figura 31. Red de radares Doppler de banda S de EEUU (NEXRAD)



Fuente: extraída de la web <http://www.Intellicast.com>.

Existen diferentes direcciones en internet que procesan y muestran gratuitamente la información de la red NEXRAD, como por ejemplo:

- <http://www.intellicast.com/National/Radar/Current.aspx>
- <http://www.weather.com/maps/dopplerradarusnational.html>

Dos ejemplos de lo que se puede consultar a través de esas webs se presentan en las figuras 32 y 33.

**a)** La primera imagen presenta un pantallazo de una animación de las imágenes de la red *NEXRAD* que proporciona el *Weather Channel*.

**b)** La segunda imagen presenta una información mucho más detallada de la lluvia radar registrada en un área, indicando la dirección e intensidad (en nudos) de los diversos núcleos de lluvia.



## 1.8 ESTUDIOS DE LOS DIVERSOS TIPOS DE PRECIPITACIÓN

Los registros proporcionados por los radares meteorológicos han permitido obtener imágenes del campo de lluvia con gran resolución, lo que ha facilitado una mayor comprensión de la estructura del campo en función del tipo de precipitación y también de los mecanismos que las generan.

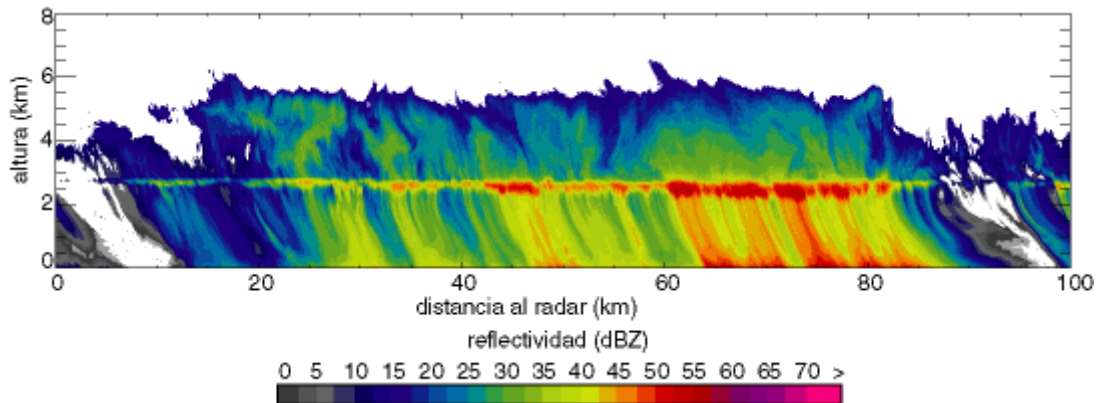
Un ejemplo claro es la distinción entre la lluvia de origen convectivo y estratiforme. En las Figuras 34 y 35 se muestran dos ejemplos obtenidos por el radar vertical puntual de la **Universidad de Brixton** en Marsella durante la experiencia HIRE. Para ambos cortes se ha supuesto una cierta velocidad del campo de lluvia para transformar los registros en el tiempo a registros en el espacio.

El primero corresponde a una situación de lluvia estratiforme registrada el 18/11/98 (figura 34). Esta primera imagen muestra algunas de las características relacionadas en general con la lluvia estratiforme, como el fenómeno de la banda brillante, correspondiente a la franja de reflectividad más intensa que se sitúa de forma prácticamente horizontal a la altura de 2.7 km. Ese incremento de intensidad es debido al cambio de fase de la precipitación al pasar de sólido a líquido.

Se nota que por debajo de esa banda el campo de lluvia presenta un patrón relativamente homogéneo, donde los incrementos de intensidad se producen en franjas verticales (asociados a zonas donde la banda brillante es también más intensa).

Otro efecto interesante que se puede observar es el producido por el viento de cizalladura en los niveles bajos de la atmósfera que 'inclina' el campo de lluvia.

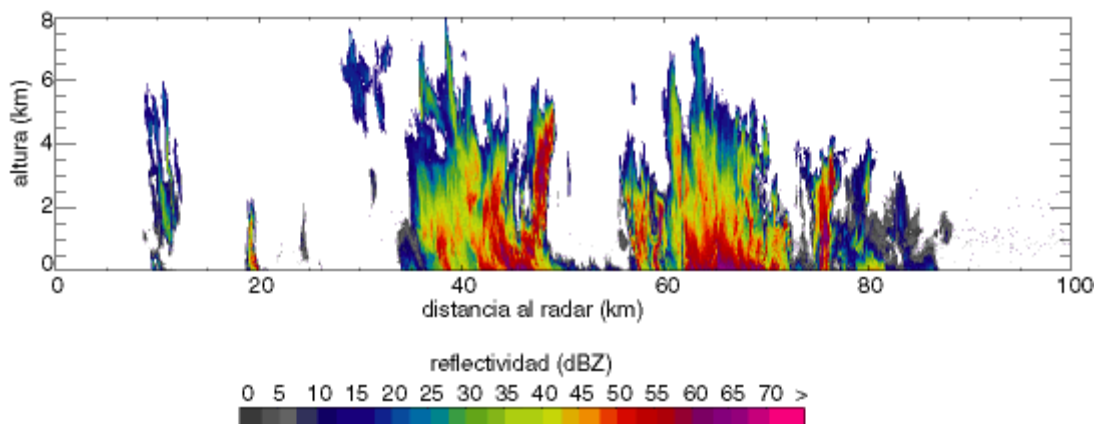
Figura 34. Lluvia estratiforme registrada por el radar vertical de alta resolución de la Universidad de Brixtol el 18/11/98 en Marsella



Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

El segundo ejemplo que se presenta es una imagen similar a la anterior pero correspondiente a un caso de lluvia convectiva registrada el 4/09/98 (figura 35). La figura es un buen ejemplo de las características asociadas a la lluvia convectiva: la estructura de la precipitación es mucho menos organizada y más compleja que el caso estratiforme. Además la variación de la reflectividad, principalmente en el sentido horizontal, es muy importante y los valores son mucho más elevados.

Figura 35. Lluvia convectiva registrada por el radar vertical de alta resolución de la Universidad de Brixtol el 04/09/98 en Marsella

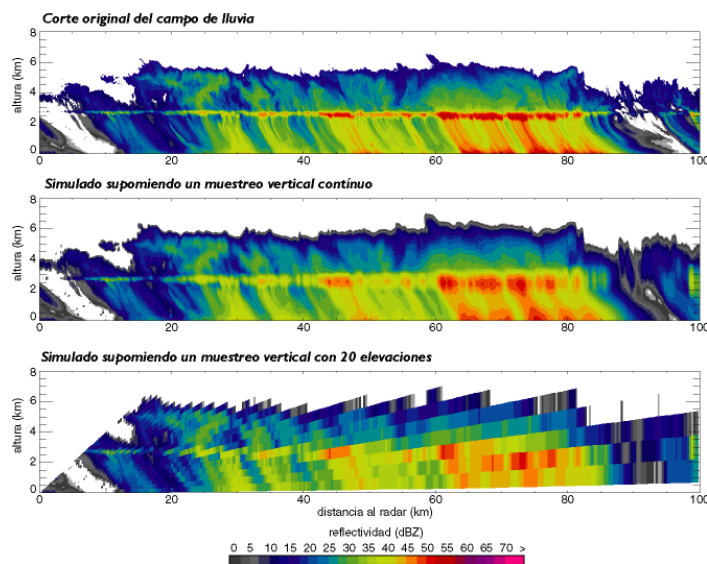


Fuente: Curso de Climatología Aplicada. UPC.

**1.8.1 Simulación para la lluvia de tipo estratiforme.** La imagen intermedia de la Figura 36 que representa el caso de un muestreo vertical continuo, es bastante similar a la figura original. Las principales diferencias son debidas a la variación del volumen de resolución con la distancia, que aumenta de tamaño en la dirección vertical, mientras que conserva la misma extensión en rango.

Así, las variaciones horizontales del campo de lluvia son degradadas de forma similar independientemente de la distancia al radar. Por el contrario las variaciones verticales se verán cada vez más suavizadas a medida que aumenta la distancia. Ese efecto es claramente visible en la forma que toma la banda brillante, que se extiende verticalmente de forma progresiva a medida que aumenta la distancia al radar. La pérdida de resolución también introduce una suavización general del campo, tanto más evidente en las zonas de elevados gradientes de reflectividad (como por ejemplo en los máximos de la banda brillante).

Figura 36. Visualización de la degradación del campo de lluvia con la distancia al radar\*



\*Cuando se simula el caso de un muestreo vertical continuo y uno con un número limitado de elevaciones

Las diferencias se hacen todavía más acusadas cuando la información registrada por el radar se limita al número de elevaciones disponibles en un radar convencional (en este caso utilizamos 20), como ocurre en la imagen inferior de la Figura 36.

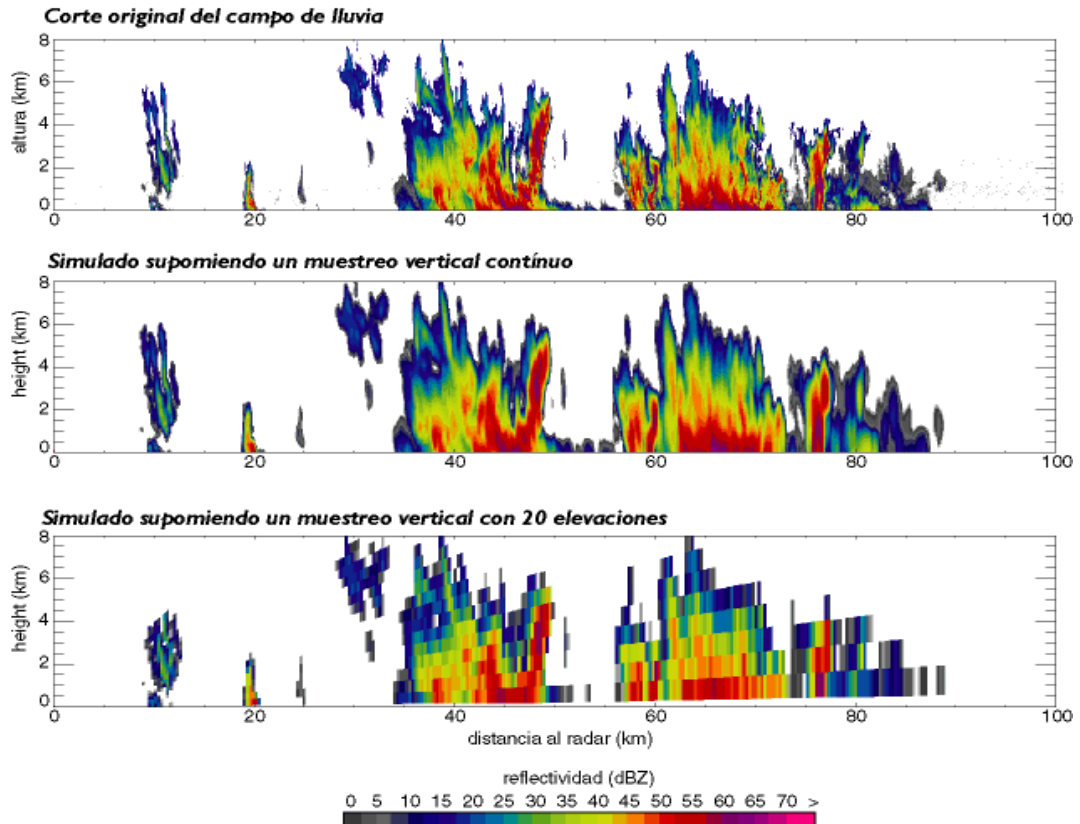
Se puede notar que hasta unos 50 km del radar todavía es posible distinguir la estructura de la precipitación, pero más allá es bastante más complicado. A partir de esa distancia los incrementos de reflectividad asociados a la banda brillante se producen de forma fragmentada, y en el caso mostrado, se combinan con el efecto de 'inclinación' del campo debido al viento de cizalladura, de forma que es difícil identificar su presencia.

De todas formas, y a pesar de que la banda brillante se sitúa a una altura de unos 2.7 km, a partir de una cierta distancia (sobre los 75 km) ésta 'contamina' la reflectividad de la segunda elevación con la consiguiente sobrestimación que se produciría en caso de convertir en lluvia la reflectividad de esa elevación.

Desde el punto de vista hidrológico es interesante observar la pérdida de información junto al suelo debido al aumento de altura del haz. Esa pérdida puede conducir a una importante infravaloración de la lluvia en aquellos casos en las que la precipitación se intensifica en los niveles bajos de la atmósfera y no se registra en la primera elevación, como ocurre en el ejemplo entre 60 y 85 km del radar.

**1.8.2 Simulación para la lluvia de tipo convectivo.** En la Figura 37a. se presentan los resultados de la simulación para el registro correspondiente a la precipitación convectiva. Como la precipitación tiende a agruparse en columnas verticales de elevada intensidad y dado que la pérdida de resolución del radar es mayoritariamente en el sentido vertical las Figuras 37b.y 37c. Presentan bastantes similitudes con la lluvia original.

Figura 37. Simulación de la degradación del campo de lluvia con la distancia al radar cuando se simula el caso de un muestreo vertical continuo y uno con un número limitado de elevaciones



(a. Corte original de campo de lluvia); (b. Simulado suponiendo un muestreo vertical continuo); (c. simulado suponiendo un muestreo vertical con 20 elevaciones)

De nuevo son evidentes los problemas de infravaloración de la lluvia cuando ésta se intensifica junto al suelo y la primera elevación se sitúa por encima, como ocurre entre 60 y 70 km del radar en las figuras simuladas. Evidentemente el problema se agravaría en aquellos casos en los que el radar ya se encuentra a una cierta altura (por ejemplo, el radar de Barcelona se sitúa a unos 600 m sobre el nivel del mar, aunque en esta simulación no se ha considerado ese efecto).

Finalmente, es importante recalcar que los ejemplos simulados representan una situación relativamente rica en términos de información radar, ya que muchos de

los radares utilizados en gran parte de los países Europeos no están preparados para efectuar más de diez elevaciones en cada muestreo volumétrico.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS UTILIZADAS EN LA MODELACIÓN DE UNA CUENCA HIDROLÓGICA

Existen diversos modeladores hidrológicos, entre los que se encuentra el software gratuito formado por el conjunto *HMS* más *GeoHMS*, que ofrecen la posibilidad de trabajar con información espacializada, tanto de las propiedades del terreno como de las características hidrológicas y la precipitación, siendo por tanto el software ideal en el estudio de nuestra cuenca American River. Además existen otras herramientas como el software Arcview y el programa *NOAA WEATHER AND CLIMATE TOOLKIT*, los cuales son complemento para un buen modelo y análisis hidrológico, además que permiten el pre-tratamiento de los datos del terreno. La descripción y uso de todas estas herramientas de apoyo se presenta en el contenido de este capítulo.

### 2.1 MODELADOR HIDROLÓGICO-HMS

El modelo HMS fue desarrollado por los ingenieros del *U.S. Army Corps of Engineers*. A su vez, a partir de 1970, el *Hydrologic Engineering Center, HEC*, participó en el desarrollo de algunas primeras aplicaciones para sistemas de información geográfica, como son: *Hydrologic Parameters (HYPAR)* y *Spatial Analysis Methodology (SAM)*, para conocer las necesidades de la modelización en las investigaciones sobre fenómenos hidrológicos. Estas aplicaciones iniciales tenían la propiedad de acceder a los datos de las celdas de las mallas multivariadas geográficas. La capacidad de obtener datos espaciales de Internet acoplados con los poderosos algoritmos en software y hardware hizo del GIS una herramienta muy atractiva para los proyectos de investigación referentes al agua.

**2.1.1 HEC-HMS.** *HEC-HMS* es un programa práctico que calcula el hidrograma producido por una cuenca si se le facilita datos físicos de la misma, datos de

precipitación, etc.

El sistema de modelado hidrológico (*HEC-HMS*) está diseñado para simular los procesos de escorrentía, la precipitación de los sistemas de cuencas dendríticas. Está diseñado para ser aplicable en una amplia gama de áreas geográficas para resolver el mayor número posible de problemas. Esto incluye las cuencas hidrográficas de gran abastecimiento de agua, la hidrología de inundación y la escorrentía de cuencas urbanas naturales o pequeñas.

Los hidrogramas producidos por el programa se utilizan directamente o en conjunto con otro software para los estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, la previsión de flujo, el impacto de la futura urbanización, el diseño del aliviadero depósito, la reducción de daños por inundaciones, regulación de llanura de inundación, y la operación de los sistemas hidráulicos, como box culverts, acueductos, alcantarillados etc.

El software es un sistema de modelado generalizado capaz de representar muchas cuencas hidrográficas diferentes. Un modelo de la cuenca se construye mediante la separación del ciclo hidrológico en trozos manejables y la construcción de límites en torno a la cuenca de interés. Cualquier flujo de masa o energía en el ciclo puede ser representado por un modelo matemático.

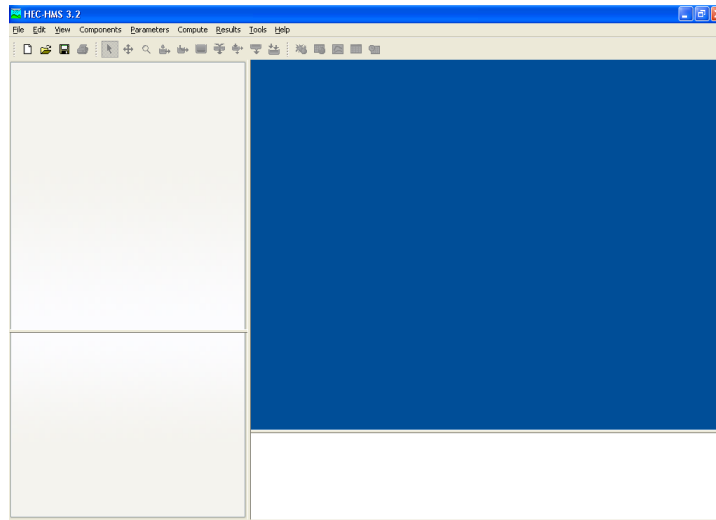
En la mayoría de los casos, varias opciones modelo están disponibles para la representación de cada flujo. Cada modelo matemático incluido en el programa es adecuado en entornos diferentes y bajo condiciones diferentes. Hacer la elección correcta requiere el conocimiento de la cuenca, los objetivos del estudio hidrológico, y herramientas de la ingeniería.

El programa cuenta con un entorno de trabajo totalmente integrado que incluya una base de datos, servicios de entrada de datos, motor de cálculo, y los

resultados de herramientas de reporte. Una interfaz gráfica de usuario permite la circulación fluida entre las diferentes partes del programa. El programa de funcionalidad y apariencia son los mismos en todas las plataformas soportadas.

Este software se puede bajar gratuitamente desde la página web de los autores, es decir de la página de *US Army Corps of Engineers* <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

Figura 38. Interfaz del modelador Hec-Hms

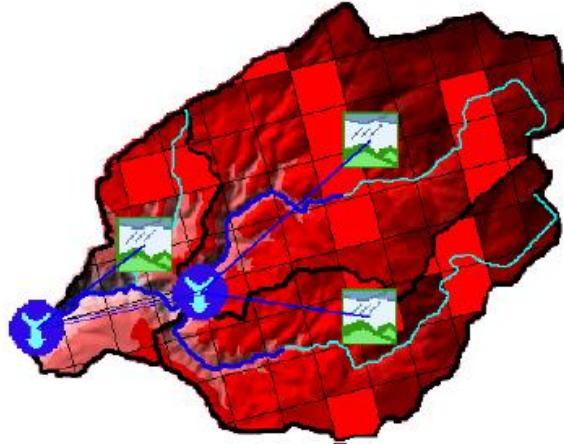


Fuente: Inicialización del programa Hec-Hms

**2.1.2 HEC-GEOHMS.** El *Geospatial Hydrologic Modeling Extension (HEC-GEOHMS)* ha sido desarrollado como un conjunto de herramientas hidrológicas geoespaciales para los ingenieros e hidrólogos con poca experiencia en SIG. *HEC-GEOHMS* utiliza *Arcview 3.2* y la extensión *Spatial Analyst* para desarrollar una serie de productos de modelos hidrológicos para la Ingeniería Hidrológica del *Hydrologic Modeling System, HEC-HMS*. *Arcview GIS* y su extensión *Spatial Analyst* están disponibles de forma gratuita en el *Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI)*. *HEC-GEOHMS* transforma las trayectorias de drenaje y los límites de las cuencas hidrográficas en una estructura de datos

hidrológicos que representa la red de drenaje.

Figura 39. Visualización extensión Hec-GeoHms



El programa permite a los usuarios visualizar la información espacial, las cuencas hidrográficas características del documento, el análisis espacial y delinear subcuencas y arroyos. Trabajar con *HEC-GEOHMS* a través de sus interfaces, menús, herramientas, botones y sensible ayuda en línea de contexto permite al usuario crear convenientemente las entradas hidrológicas de *HEC-HMS*.

## 2.2 COMPONENTES DEL HMS

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, *HEC-HMS* utiliza los siguientes componentes: modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar, que para el análisis de nuestra cuenca corresponde a un intervalo de 9 horas, desde las 00:00 hasta las 09:00. Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas son requeridos como

parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico.

**2.2.1 Componentes del modelo de la cuenca.** El modelo de la cuenca representa la cuenca física. El usuario desarrolla el modelo de la cuenca incluyendo y conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos que se producen en la cuenca. La Tabla 1 describe tales elementos hidrológicos. Los métodos de cálculo que se usan en las subcuencas se describen en la Tabla 2. Los métodos de cálculo que se usan en los tramos son los relativos a la propagación de caudales y son: Onda cinemática, Retardo, Pulso modificado (embalse a nivel), Muskingum y Muskingum-Cunge.

Figura 40. Visualización de los componentes del modelo de la cuenca del software Hec-hms



Tabla 1. Descripción de los elementos hidrológicos







Elemento	Descripción
<b>Subcuenca</b> <b>(Subbasin)</b> 	<p>Se usa para representar la cuenca física. Dada la precipitación, la salida de agua de la subcuenca se calcula restando las pérdidas a la precipitación y transformando el exceso de precipitación en caudal en el punto de salida de la subcuenca, sumando finalmente el caudal base.</p>
<b>Tramo (Reach)</b> 	<p>Se usa para transportar el agua generada en algún punto de la cuenca hacia aguas abajo hasta otro punto de la cuenca, definidos ambos en el modelo de la cuenca. La respuesta de este transporte es un retardo y una atenuación del hidrograma de entrada.</p>
<b>Unión (Junction)</b> 	<p>Se usa para sumar flujos de agua que provienen de elementos hidrológicos situados aguas arriba de la unión. La respuesta es simplemente la suma de los hidrogramas de todos los elementos conectados a la unión.</p>
<b>Fuente (Source)</b> 	<p>Se usa para introducir agua dentro del modelo de la cuenca. Este elemento no tiene entrada y la salida está definida por el usuario.</p>
<b>Sumidero (Sink)</b> 	<p>Se usa para representar el punto de salida de la cuenca. La entrada puede provenir de uno o más elementos situados aguas arriba del sumidero. Este elemento no tiene salida</p>
<b>Depósito</b> <b>(Reservoir)</b> 	<p>Se usa para modelar la retención y atenuación de un hidrograma causado por un embalse o depósito de retención. La entrada puede provenir de uno o varios elementos hidrológicos situados aguas arriba del depósito. La salida puede calcularse de 2 maneras: el usuario define una relación almacenamiento-salida, cota-almacenamiento-salida o cota-área-salida o bien el usuario define una relación cota-almacenamiento o cota-área y una o más estructuras de salida.</p>

Tabla 2. Métodos de cálculos para subcuencas

Tipo de modelo	Método
<b>Pérdidas</b>	Déficit y tasa constante (DC) Inicial y tasa constante Exponencial Número de curva CN SCS Green y Ampt Consideración de la humedad del suelo (SMA) DC por celdas CN SCS por celdas SMA por celdas
<b>Transformación lluvia-caudal</b>	Hidrograma Unitario (HU) de Clark Onda cinemática ModClark HU SCS HU Snyder HU especificado por el usuario Hidrograma en S del usuario
<b>Flujo base</b>	Recesión restringida Constante mensual Depósito lineal Recesión

**2.2.2 Componentes del modelo meteorológico.** El modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca. El modelo meteorológico puede usar precipitación puntual (para modelo agregado o clásico) o por celdas (para modelo distribuido) y puede modelar precipitación sólida (nieve) y líquida junto con la evapotranspiración. Los métodos de

evapotranspiración incluyen el método constante mensual y el de Priestley Taylor. Un método de evapotranspiración se requiere únicamente cuando se desee una respuesta de la cuenca continua o a largo plazo. Una breve descripción de los métodos disponibles para calcular la precipitación media en la cuenca o celda a celda se incluye en la Tabla 3.

Figura 41. Visualización de los componentes del modelo meteorológico

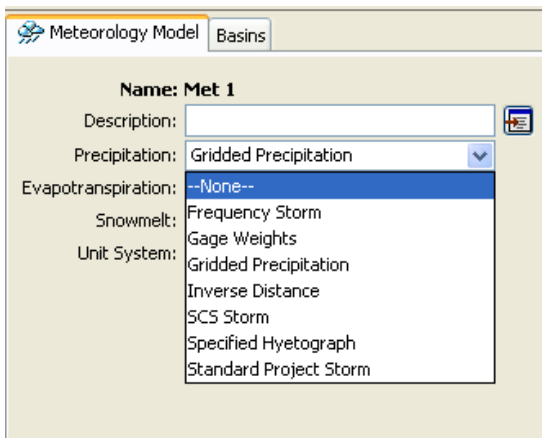
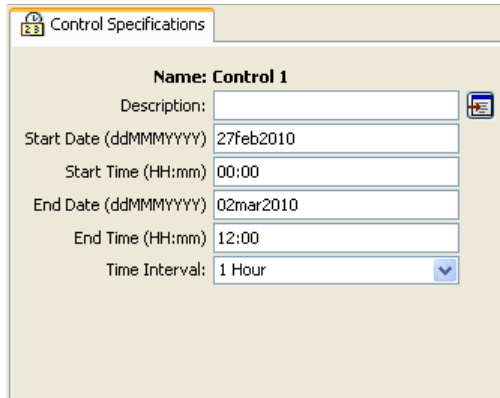


Tabla 3. Descripción de los métodos incluidos en el modelo meteorológico

<b>Métodos de precipitación</b>	<b>Descripción</b>
<b>Tormenta asociada a frecuencia</b>	Se usa para desarrollar un evento de precipitación donde los volúmenes correspondientes a distintas duraciones tienen una probabilidad de excedencia consistente.
<b>Pluviómetros con peso</b>	Este método aplica pesos definidos por el usuario a los pluviómetros que el usuario desee.
<b>Precipitación por celdas</b>	Este método permite usar productos con precipitación por celdas, como por ejemplo los datos de Radar.
<b>Inversa de la distancia</b>	Se usa para calcular la precipitación media en una subcuenca aplicando una ponderación basada en la inversa de la distancia al cuadrado.
<b>Tormenta del SCS</b>	Este método aplica una distribución temporal tipo SCS a un volumen total de lluvia en 24 horas.
<b>Hietograma especificado</b>	Este método aplica un hietograma definido por el usuario a un elemento de subcuenca.
<b>Tormenta de proyecto estándar</b>	Este método aplica una distribución temporal a un volumen índice de precipitación (este índice se extrae de un Manual del Corps of Engineers y es válido sólo para Estados Unidos. Está actualmente en desuso).

**2.2.3 Componentes de las especificaciones de control.** Las especificaciones de control se refieren al tiempo de duración de la simulación, incluyendo también fecha y hora de comienzo y fin del proyecto e intervalo de cálculo.

Figura 42. Visualización de la ventana de especificaciones de control



Control Specifications	
Name:	Control 1
Description:	
Start Date (ddMMYYYY):	27feb2010
Start Time (HH:mm):	00:00
End Date (ddMMYYYY):	02mar2010
End Time (HH:mm):	12:00
Time Interval:	1 Hour

**2.2.4 Componentes de la entrada de datos.** Datos de series temporales, pares de datos y datos por celdas son requeridos como parámetros o condiciones de contorno en los modelos de la cuenca y meteorológicos. En la Tabla 4, se presenta una lista de los datos de entrada. Los datos de entrada pueden introducirse a mano o bien pueden referenciarse a un registro en un fichero *HEC-DSS (HEC-Data Storage System)*<sup>5</sup>. Todos los datos por celdas deben referenciarse a un registro *HEC-DDS* existente.

<sup>5</sup> Este fichero alberga archivos en formato \*.dss, el cual es el único formato legible en la modelación distribuida, para su visualización es necesario preinstalar otro software gratuito proporcionado por HMS, llamado Hec-DSSVue.

Tabla 4. Componentes de los datos de entrada

Series temporales de datos	Pares de datos	Datos por celdas
Pluviómetros Medidores de caudal Limnímetros Termómetros Medidores de radiación solar Medidores de coeficientes de cultivo	Funciones almacenamiento-caudal Funciones cota-almacenamiento Funciones cota-área Funciones cota-caudal Funciones caudal-derivación Secciones transversales Hidrogramas unitarios Curvas de porcentaje Funciones de fusión de nieve Patrones de tasa de fusión de nieve	Precipitación Temperatura Radiación solar Coeficiente de cultivo Capacidad de almacenamiento Tasa de percolación Coeficientes de almacenamiento Déficit de humedad Área impermeable Número de curva CN SCS Cotas Equivalente de agua de nieve Contenido de agua Tasa de fusión de nieve

**2.2.5 Interfaz del usuario.** La interfaz de usuario consiste en una barra de menú, barra de herramientas y cuatro paneles principales, que se muestran en la Figura 43:

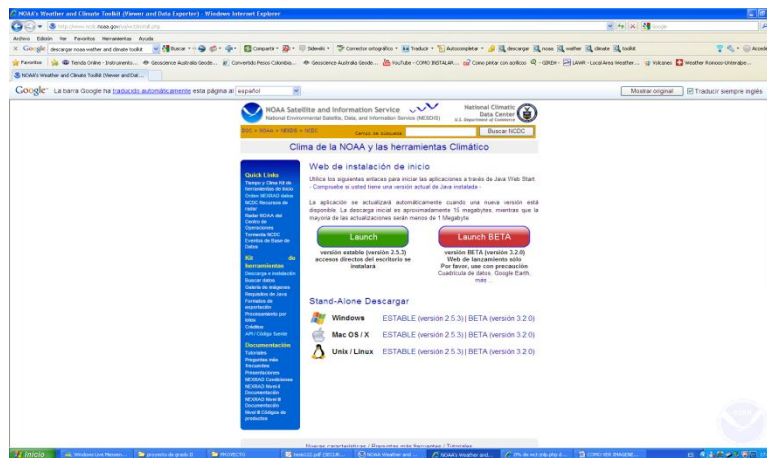
- Explorador de cuenca
- Escritorio
- Editor de componentes
- Registro de mensajes



### 2.3.1 Instalacion, manejo y obtencion de datos de radar por medio del programa NOAA *Weather And Climate Toolkit*

1. Para instalar el programa es necesario descargarlo de la web, esto se logra mediante el siguiente link <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>, y se descarga de la sección *Launch* versión reciente (versión 2.5.3).

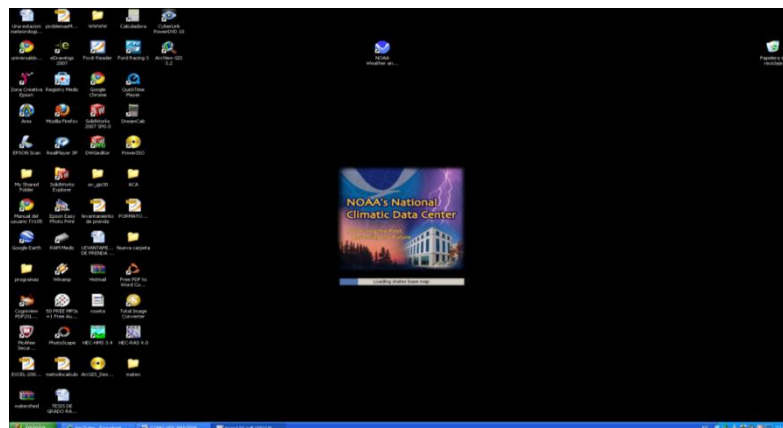
Figura 44. Portal de descarga del programa weather and climate toolkit



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

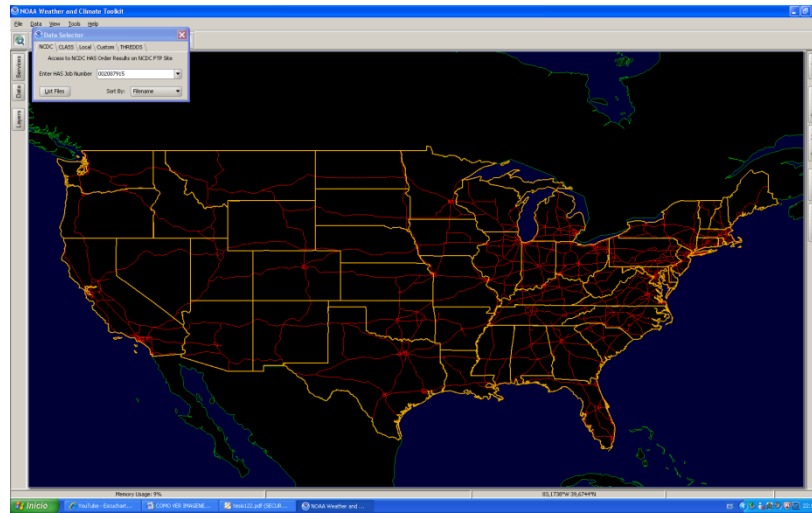
2. Una vez instalado el programa, es necesario ejecutarlo (abrirlo) para el manejo del mismo.

Figura 45. Esquema de la ejecución del programa.



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

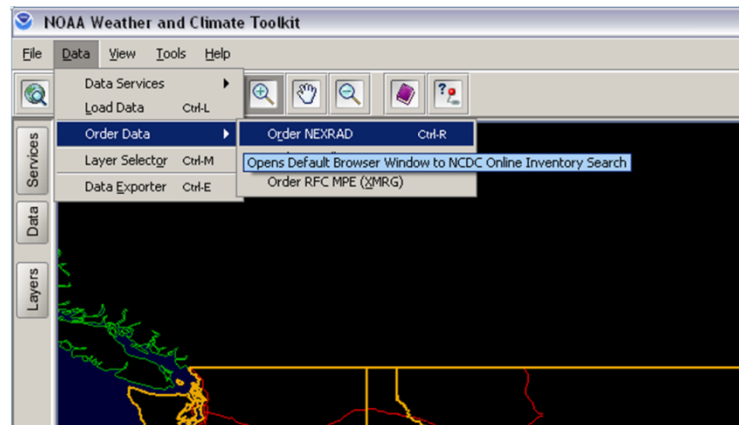
Figura 46. Orden de las imágenes de radar mediante el programa weather and climate toolkit.



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

3. Se procede a buscar la información que se analiza posteriormente; para lograr esto, en la barra de menú, se despliega en la pestaña **Data** la opción **Order data**, allí se selecciona la opción **order NEXRAD** (ctrl+r).

Figura 47. Manejo del programa weather and climate toolkit.



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

O si bien se prefiere, se puede buscar directamente la información a analizar accediendo a la siguiente dirección en la WEB: <http://www.ncdc.noaa.gov/nexradinv/>, allí se abre la siguiente ventana (figura 48):

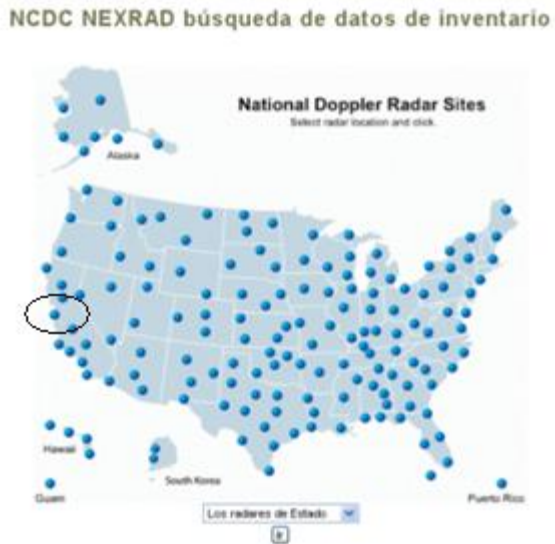
Figura 48. Portal en la web, en donde se solicita las imágenes de radar del programa weather and climate toolkit en norte America, Puerto rico, Hawaii y Corea del Sur



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

4. El usuario puede hacer clic en cualquiera de los puntos sobre el mapa de Estados Unidos, ya que estos representan los radares de la red nacional de radares meteorológicos (**NEXRAD**); para el ejemplo mostrado se toma de referencia California (figura 49).

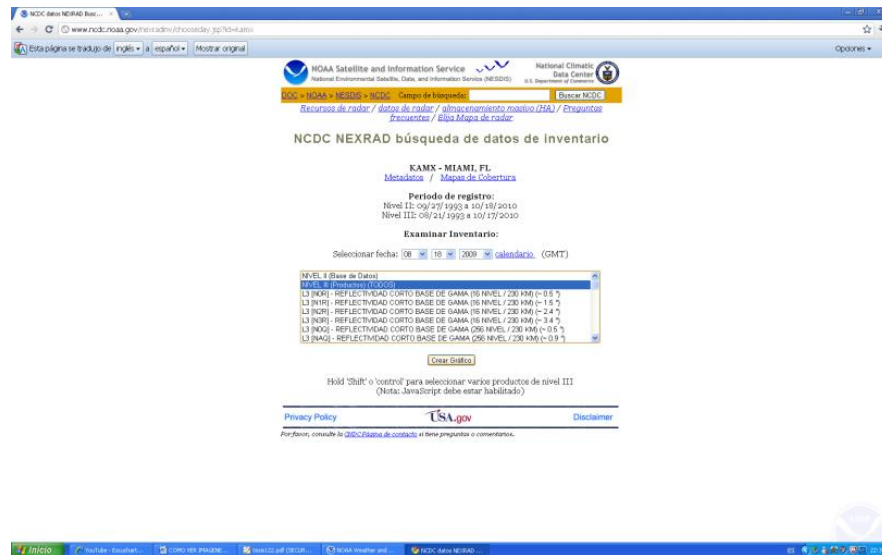
Figura 49. Localización del radar meteorológico California.



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

5. Luego se abre la siguiente vista (figura 50), En donde se debe seleccionar una fecha en el calendario, ejemplo 27/02/2010. Para escoger el producto se cuenta con una extensa información, en la lista debajo de la opción de calendario, se ingresa la opción, nivel III (productos) (TODOS) ya que aquí se puede encontrar el seguimiento de tormentas, vértices de tornados y estructuras de tormentas (solo por señalar algunos). Una vez seleccionada toda la información, se debe dar clic en la pestaña crear gráfico.

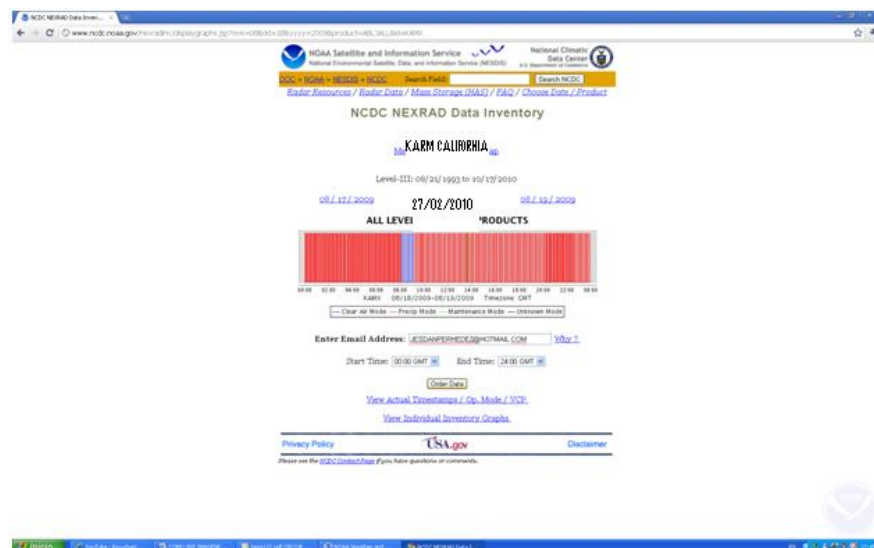
Figura 50. Ubicación de las imágenes de radar del día 27/02/2010 del radar meteorológico en Sacramento-California



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

Se tiene una ventana en la cual se ingresa una cuenta de correo electrónico, una vez ingresada se hace clic en la pestaña Order Data.

Figura 51. Visualización de la lluvia en forma análoga antes de descargar los archivos de lluvia



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

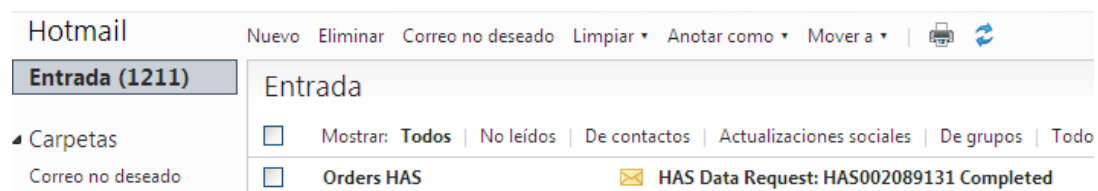
6. Seguidamente, aparece una ventana en donde se muestra el número de código de la solicitud de datos, la cual llega a la bandeja de entrada de la dirección de correo ingresada en el paso anterior. El sistema tarda entre 5 a 30 minutos dependiendo de cuan ocupada se encuentre la plataforma de internet en ese instante.

Figura 52. Espera de los datos en inventario del nexrad



Fuente: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/wct/install.php>,

Figura 53. Orden enviada a la cuenta de correo



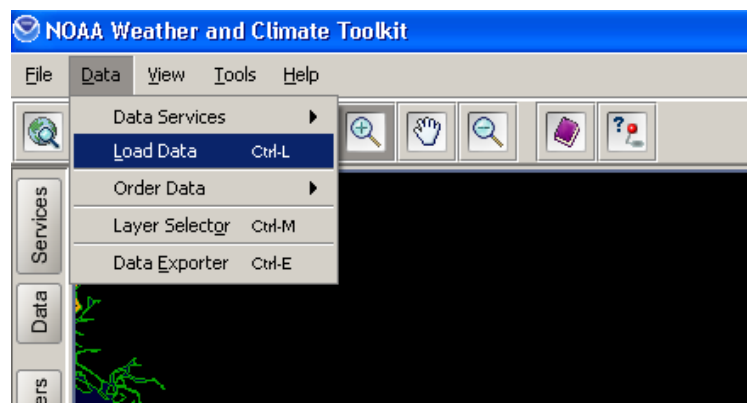
7. Una vez obtenida la información, la notificación de la orden a la cuenta de correo indica que el paquete de datos solicitados ya se encuentra disponible para ser usados.

Nota: Los datos de precipitación se encuentran disponibles en cualquier intervalo

de tiempo y se solicitan según la necesidad, en este caso nos importa que los datos sean en horas aunque también están dados en segundos, minutos, días, etc.

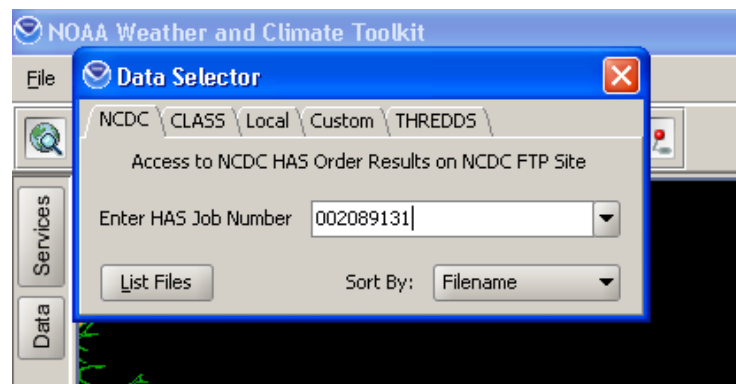
8. Se abre de nuevo el programa y en la barra de menú en la opción **Data** se escoge la opción **Load Data** (ctrl+L).

Figura 54. Opción Load data



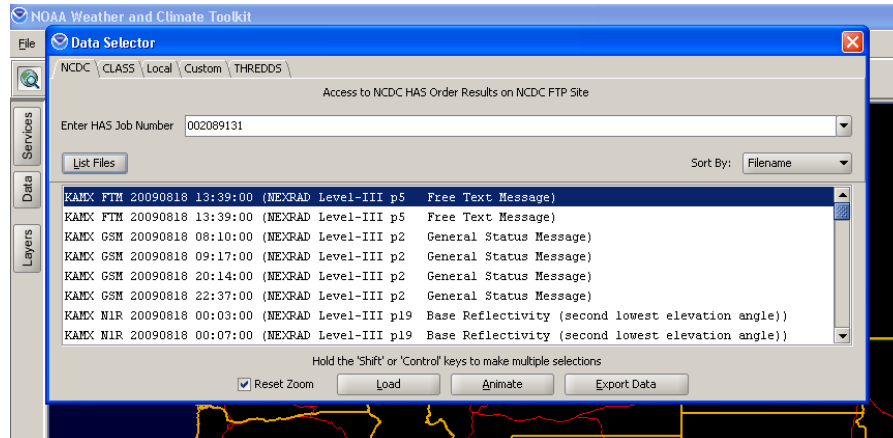
Inmediatamente se despliega una ventana en la cual se digita el número de orden que para este ejemplo es 002089131 y se hace clic derecho en la pestaña **List files**.

Figura 55. Número de orden de la solicitud



Después de unos cuantos segundos de espera aparece una ventana como la de la figura 56, la cual presenta múltiples opciones de datos a analizar y visualizar.

Figura 56. Visualización de las diferentes opciones de información

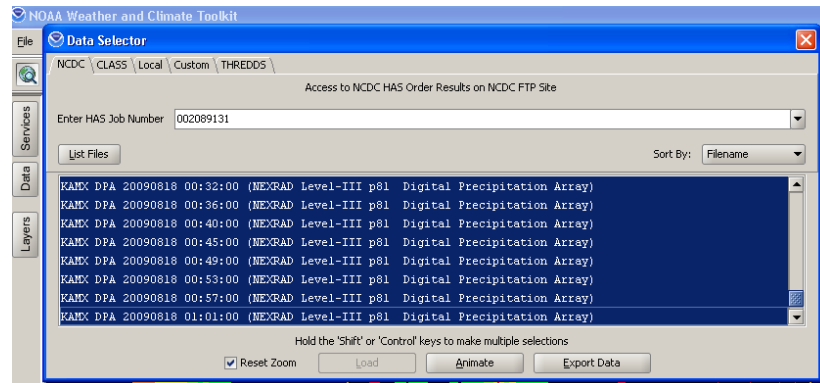


En ésta ventana se busca la opción **Digital precipitation array** en la cual se observa que el intervalo de tiempo entre archivos es de 4 min; con la tecla shift se puede seleccionar varios de los archivos mostrados en la ventana a la vez

Además en esta ventana se puede ingresar la opción **Animate** la cual muestra la animación de la precipitación en el tiempo; ésta animación se puede guardar en formato .gif o si el usuario lo prefiere en formato .avi

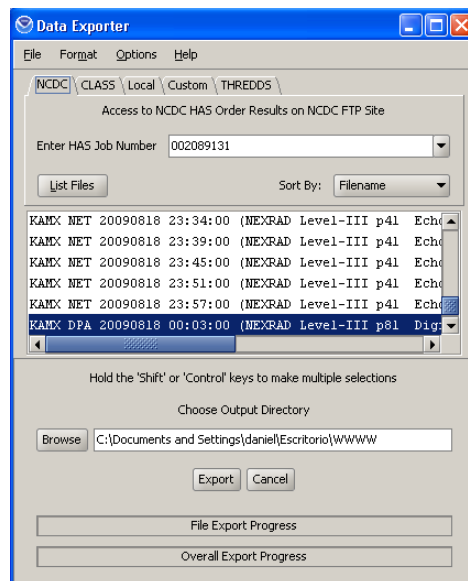
9. Para continuar con el ejemplo una vez seleccionadas las imágenes se hace clic en la pestaña **Export Data**.

Figura 57. Selección de la información



10. Se muestra una ventana en donde se ubican los archivos que se están descargando en la pc y se dá clic a la pestaña **Export** ; estos archivos tendrán diferentes formatos, pero el que interesa en este estudio es formato .asc (ASCII) y .shape.

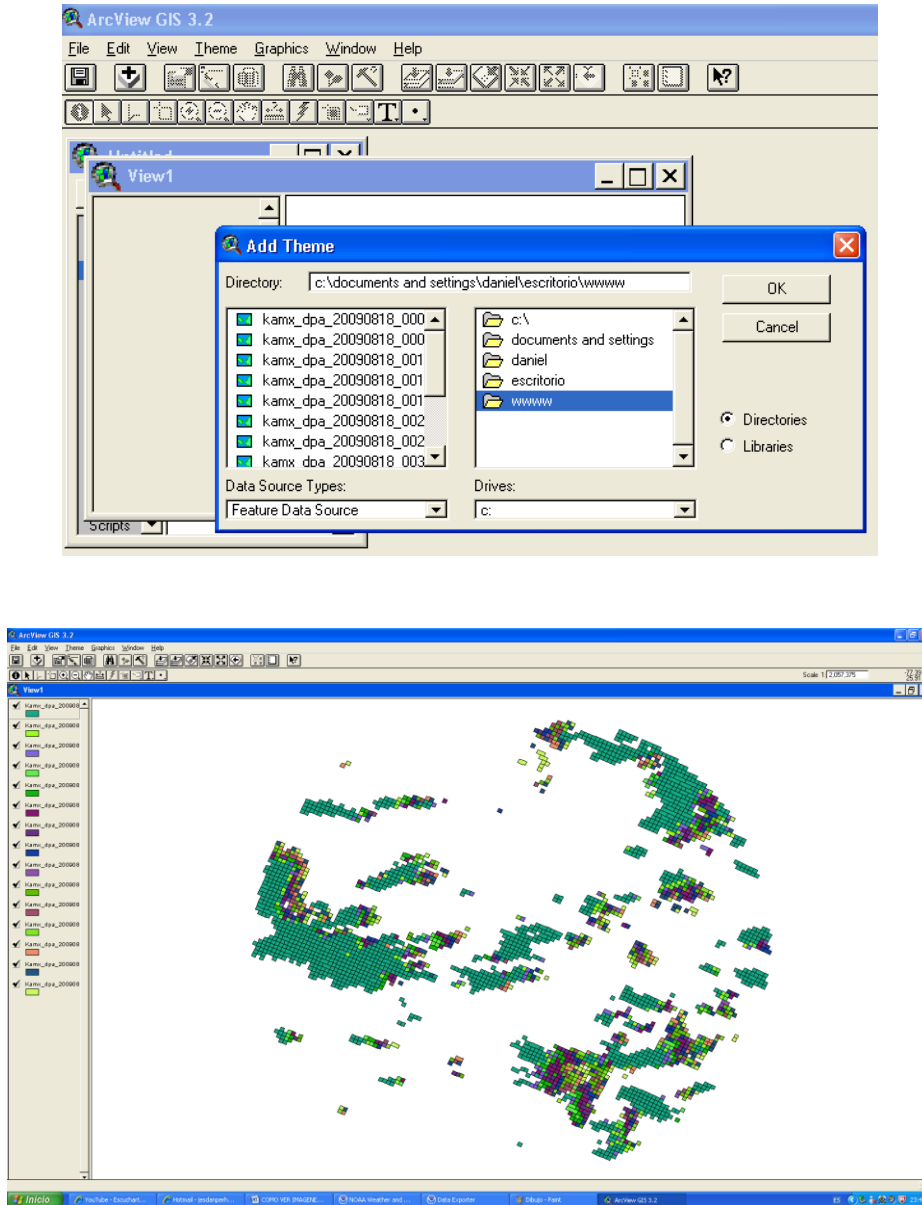
Figura 58. Exportación de la información



11. Una vez exportados los archivos es necesario tener abierto el programa *Arcview*, el cual analiza y visualiza las imágenes de precipitación arrojadas por el radar en un evento de precipitación determinado. A continuación se deben ubicar y

abrir los archivos en *Arcview*

Figura 59. Imágenes en formato .shp vistas en Arcview de los datos de radar

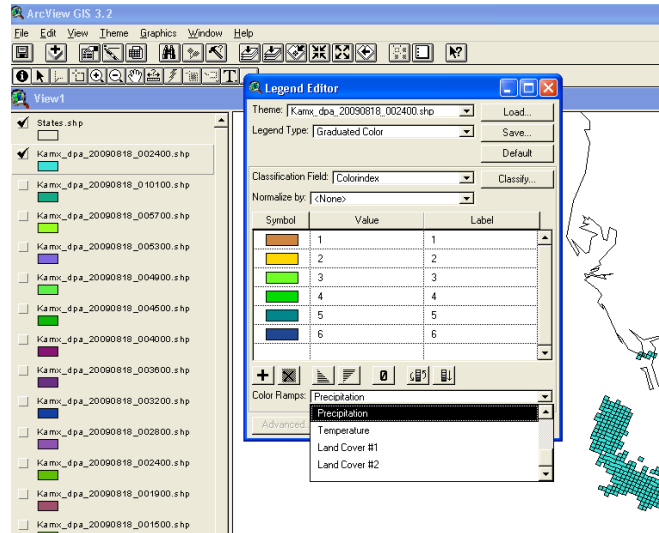


Fuente: Proceso en Arcview 3.2. Autor.

Ahora bien se pueden tomar algunos archivos exportados del programa **NOAA WEATHER AND CLIMATE TOOLKIT**, para el ejemplo se escoge el tema que lleva por nombre **KAMX\_DPA\_20100227\_002400.shp** el cual se clasifica por

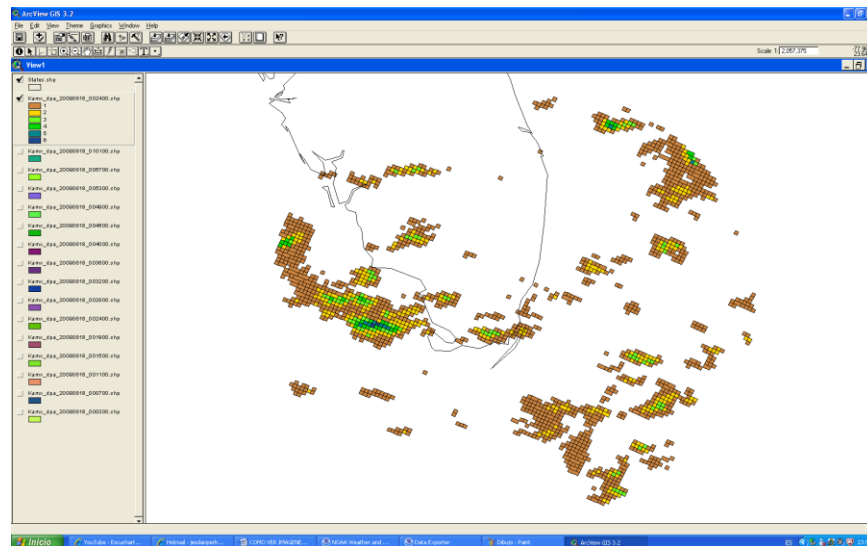
cantidad de precipitación en mm.

Figura 60. Clasificación de la precipitación



Fuente: Proceso en Arcview 3.2. Autor.

Figura 61. Imagen en Arcview clasificada la precipitación



Fuente: Proceso en Arcview 3.2. Autor.

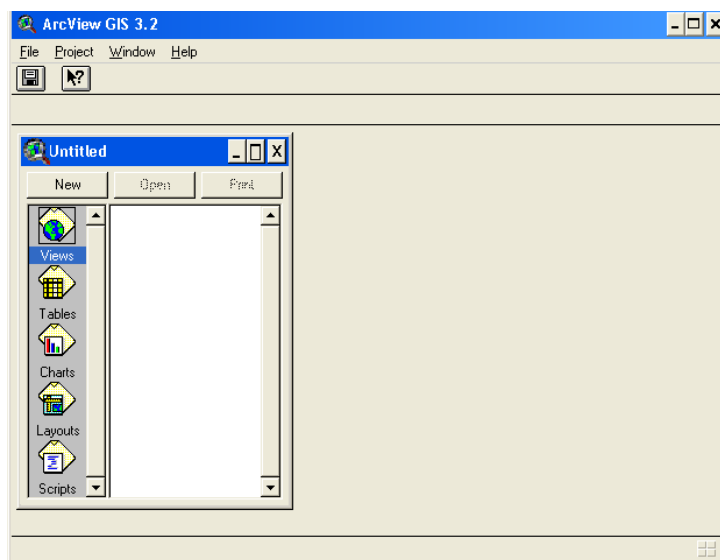
Lo importante, es que la precipitación se encuentre en formato raster o de mallas ya que el objetivo es trabajar un modelo distribuido de la lluvia (en este ítem). Para

esto se dispone de un conversor de malla *ASCII* a archivo *DSS*, formato que es necesario para el estudio hidrológico con *HEC-HMS*. Dicha herramienta es un ejecutable (*asc2dssGrid.exe*) que se ha obtenido a través del personal del *Hydrologic Engineering Center*. Este cuerpo de ingenieros norteamericanos ha desarrollado toda una serie de programas de análisis hidrológico e hidráulico que conforman su software registrado; el cual se puede conseguir gratuitamente a través de su página web, como se ha mencionado anteriormente.

## 2.4 MODELO DISTRIBUIDO DE LA CUENCA AMERICANRIVER MEDIANTE LA HERRAMIENTA ARCVIEW 3.2 CON EXTENSION GEOHEC-HMS

Este proceso se lleva a cabo mediante la herramienta informática conocida como *Arcview*, el cual es un programa para el análisis de sistemas de información geográfica. En este caso se trabaja con la versión 3.2.

Figura 62. Interfaz software arcview 3.2



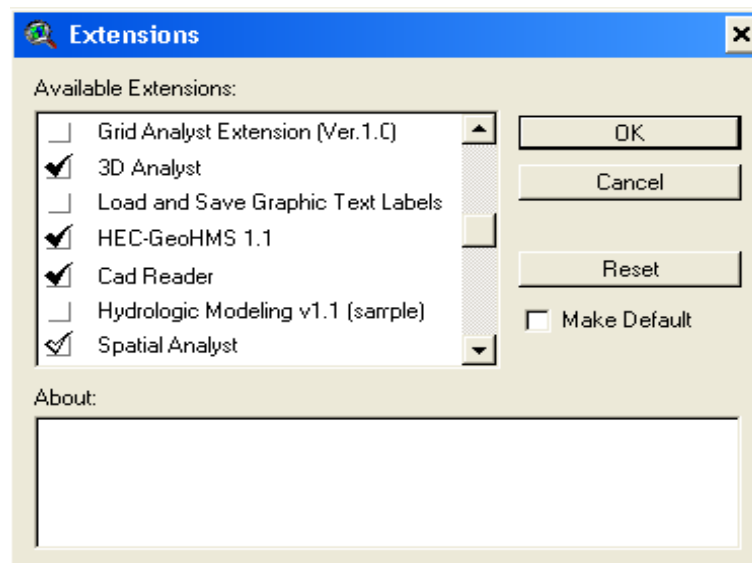
Lo que se pretende es determinar la superficie de la cuenca, delimitar las subcuencas que la conforman, definir la dirección del flujo de agua en cada una de ellas, calcular sus características geométricas (longitudes de cauce, pendientes y

áreas) y los parámetros hidrológicos necesarios para la realización del análisis hidrológico y finalmente, exportar los archivos con los que se trabajará en *HEC-HMS*.

Antes de comenzar el proceso se deben activar las siguientes extensiones en Arcview 3.2:

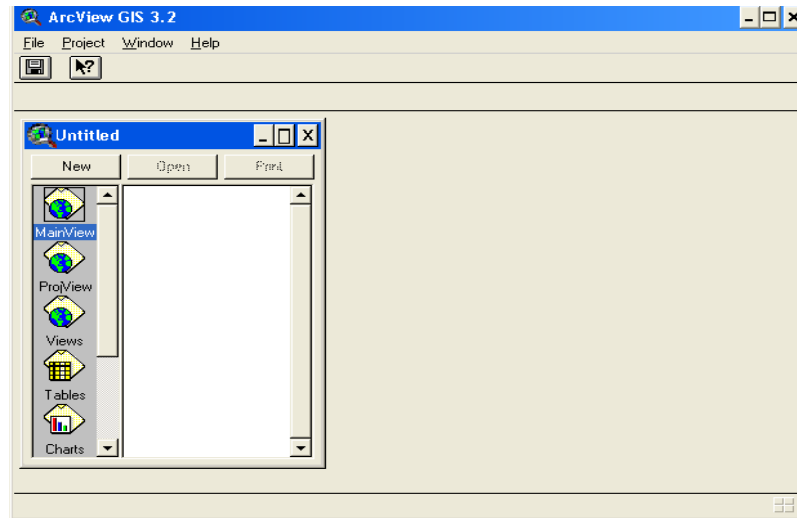
- Hec-GeoHms
- Spatial Analyst
- 3DAnalyst
- CadReader

Figura 63. Extensiones del software arcview 3.2



Después de activadas todas las extensiones mencionadas anteriormente, el programa genera automáticamente dos nuevas vistas de trabajo (Project view y main view) en las cuales se realizará el posterior análisis.

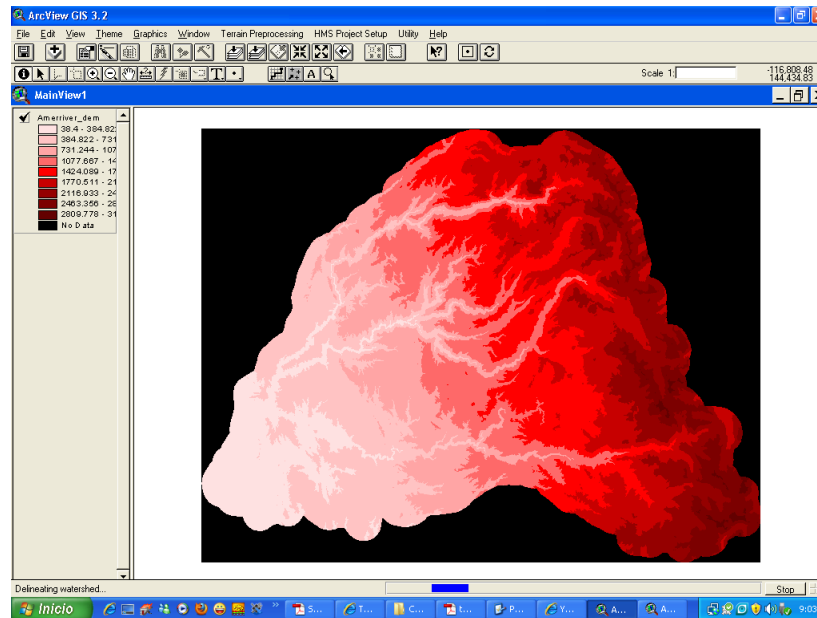
Figura 64. Nuevas vistas de trabajo del software arcview 3.2



El primer paso es crear un modelo digital de elevaciones (MDE), sin depreciaciones, es decir aumentando la cota de las celdas que están rodeadas completamente de celdas con mayor cota, asignándoles a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes, De esta manera el agua podrá fluir de una celda a otra sin “estancarse”. Para rellenar dichas depresiones hay que hacer lo siguiente:

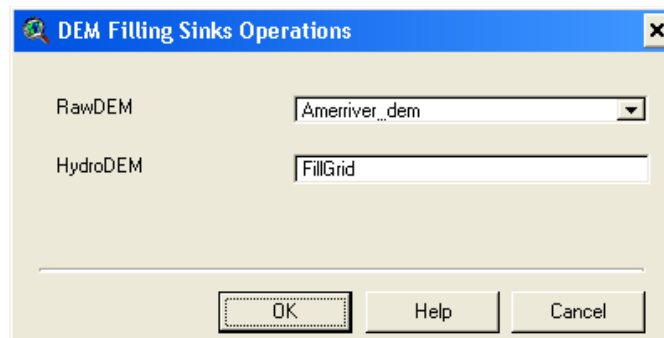
- Agregar el MDE sin depresiones a rellenar, a “MainView” usando el icono “Add Theme, seleccionarlo en el menú “View”.
- Activar el grid cargado y seleccionar Terrain preprocessing → Fill Sinks
- Confirmar el nombre del grid a ser rellenado y si se desea, editar el nombre de la salida, dar Ok para aceptar.
- El resultado es el tema “fillgrid”. Para que se muestre la leyenda, seleccionar Theme → Hide → Show Legend.

Figura 65: MDE sin corregir, con depresiones



Fuente: (MDE) modelo digital de elevaciones, extraído de US Army Engineer.

Figura 66. DEM Filling Sinks Operations



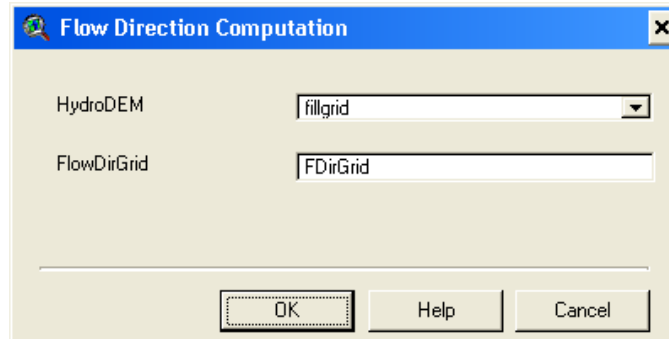
Para realizar el modelo , es necesario usar el MDE sin depresiones

**2.4.1 Obtención de la dirección de flujo.** Se debe definir la dirección del flujo de la mayor pendiente, evaluando celda a celda las cotas de las celdas circundantes a cada una de ellas.

- Seleccionar Terrain preprocessing → Flow direction
- Confirmar que la entrada de hydroDEM sea "fillgrid", La salida será "FDirGrid",

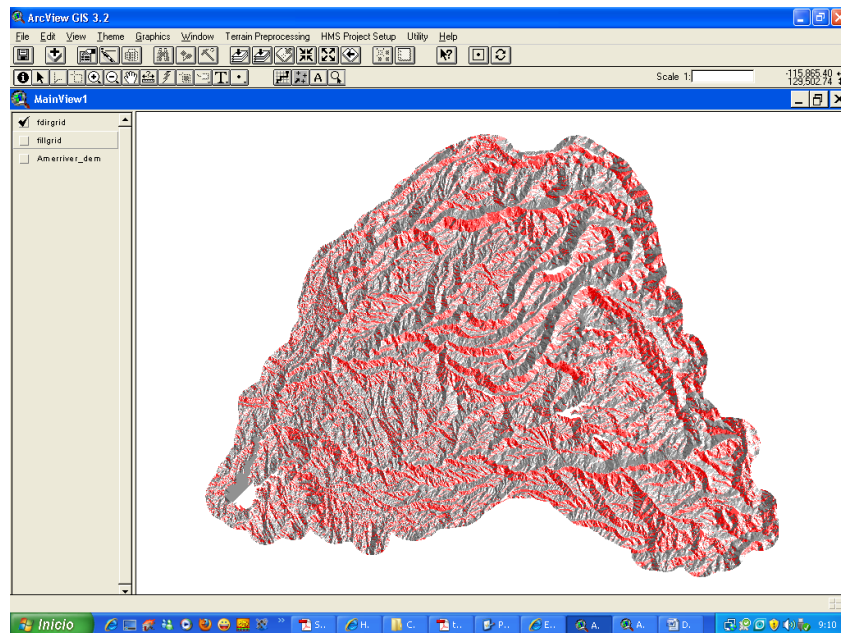
ok para aceptar.

Figura 67. Flow Direction Computation



El resultado de lo anterior, es el grid “FDirGrid”

Figura 68. Grid visualizando la dirección del flujo

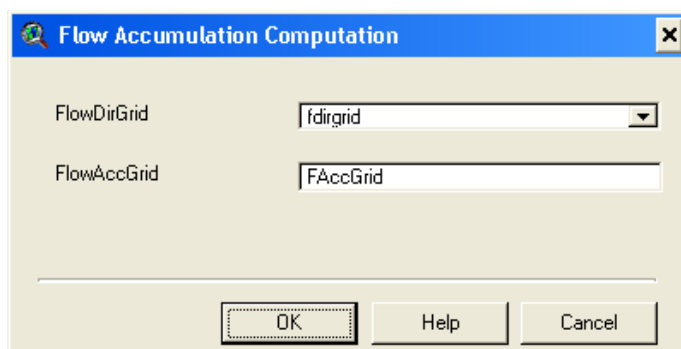


Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

**2.4.2 Acumulación del flujo.** Aquí se determina el número de celdas que se drenan a cada celda. El área de drenaje de una celda dada se puede calcular multiplicando el número de celdas por el área de cada celda.

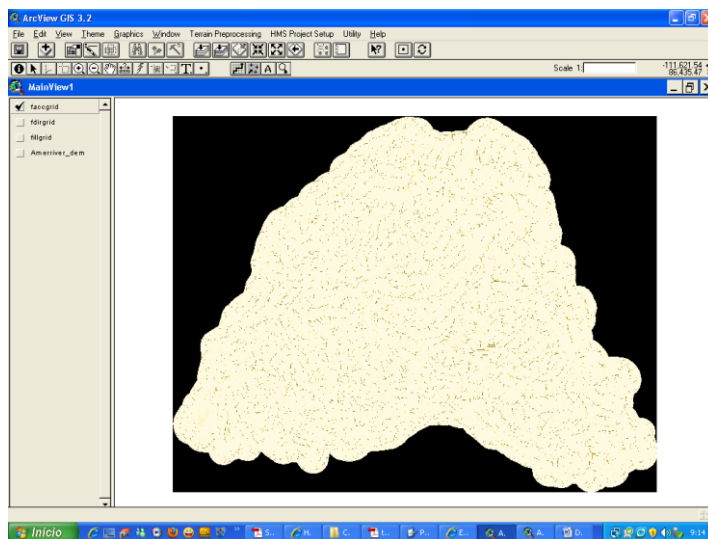
- Seleccionar Terrain Preprocessing → Flow Accumulation.
- Confirmar que la entrada de FlowDirGrid es “fdirgrid” y la salida será por ejemplo “FAccGrid”, ok para aceptar.

Figura 69. Flow Accumulation Computation



El resultado es por ejemplo el siguiente grid “FAccGrid”

Figura 70. Grid visualizando la acumulación del flujo



Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

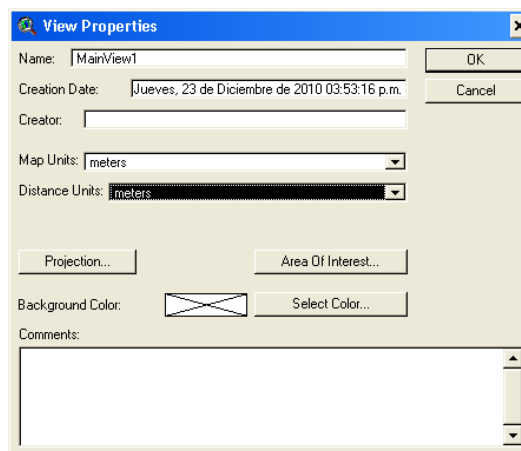
**2.4.3 Stream Definition.** Este paso clasifica todas las celdas con flujo procedente de un número de celdas mayor a un umbral definido por el usuario como pertenecientes a la red de drenaje. El umbral puede especificarse como área en

unidades del MDE al cuadrado o como número de celdas. El calor por defecto del 1 % de la mayor área de drenaje de toda la cuenca y cuando menor sea el umbral, mayor será el número de subcuencas que defina GeoHms.

➤ Seleccionar View→Properties

➤ En “Map Units” y “Distance Units” especificar “meters”, ok para aceptar.

Figura 71. Cambio de unidades de la vista en arcview.

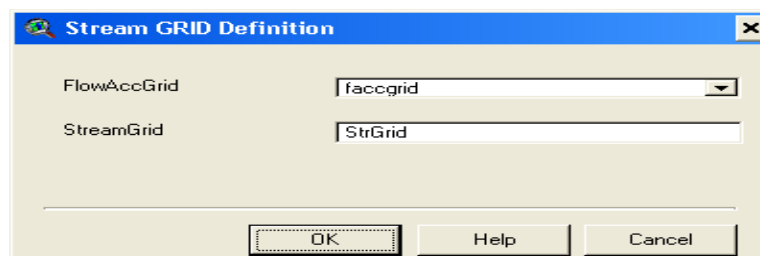


Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

➤ Seleccionar Terrain Preprocessing→Stream Definition.

➤ Confirmar que la entrada de FlowAccGrid sea por ejemplo “faccgrid” y la salida de StreamGrid sea “StrGrid”, ok para aceptar.

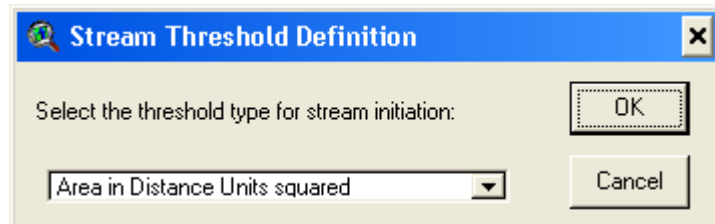
Figura 72. Stream GRID Definition.



➤ Aparecerá la ventana “Stream Threshold Definition” que es donde debemos definir el umbral, elegir una de las opciones, por ejemplo: “Area in Distance Units

Squared” e ingresar el número deseado. Puede dejarse el valor por defecto (corresponde al 1% del área de drenaje de la cuenca), ok para aceptar.

Figura 73. Stream Threshold Definition.

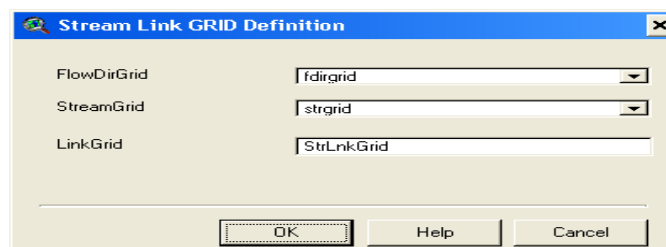


El resultado obtenido es el siguiente grid “strgrid”:

**2.4.4 Stream Segmentation.** Este paso divide los cauces en segmentos. Los segmentos son tramos de cauces situados entre 2 uniones de cauces sucesivas, una unión y la salida o una unión y el límite de la cuenca.

- Seleccionar Terrain Preprocessing → Stream Segmentation.
- Confirmar que la entrada de FlowDirGrid sea “fdirgrid” y de StreamGrid sea “strgrid”, la salida de LinkGrid será “StrLinkGrid”, ok para aceptar.

Figura 74. Stream Link GRID Definition

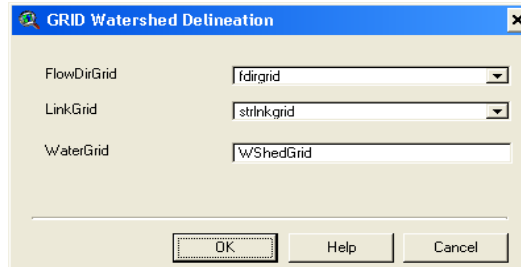


**2.4.5 Delineación de la cuenca.** Este paso define una cuenca por cada segmento de cauce.

- Seleccionar Terrain Preprocessing → Watershed Delineation
- Confirmar que la entrada de FlowDirGrid sea “fdirgrid” y de LinkGrid sea “strlnkgrid”

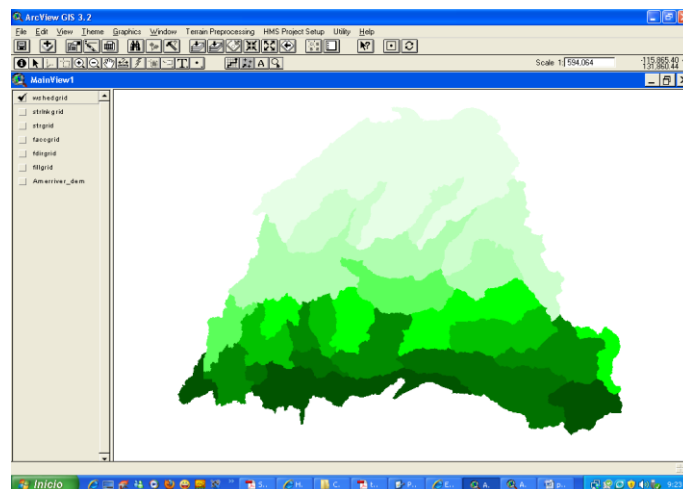
- La salida de WaterGrid será “WShedGrid”, ok para aceptar.

Figura 75. GRID Watershed Definition



El resultado de la operación Watershed Delineation se muestra a continuación.

Figura 76. Visualización del delineado de subcuencas

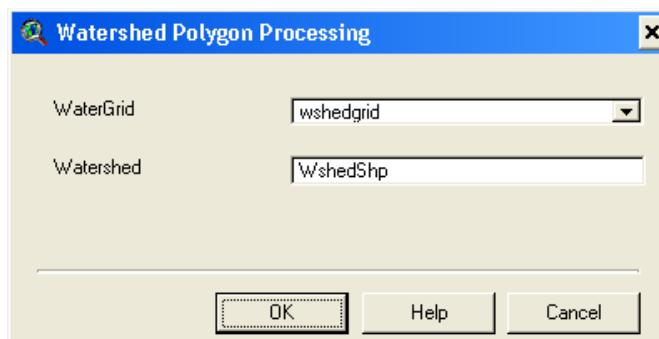


Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

**2.4.6 Watershed Polygon processing.** Este paso convierte las subcuencas de formato grid a formato vector.

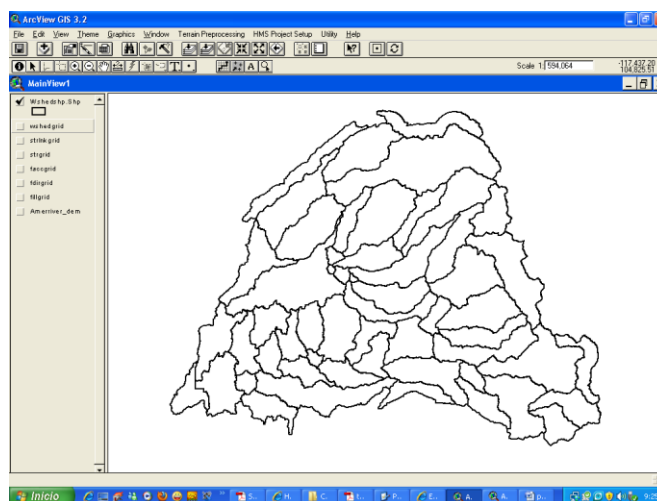
- Seleccionar Terrain Preprocessing → Watershed Polygon Processing.
- Confirmar que la entrada de WaterGrid sea “wshedgrid” y la salida de Watershed será “Wshedshp.Shp”, ok para aceptar.

Figura 77. Watershed Polygon Processing.



El resultado de la operación es por ejemplo un tema llamado “Wshedshp.shp”.

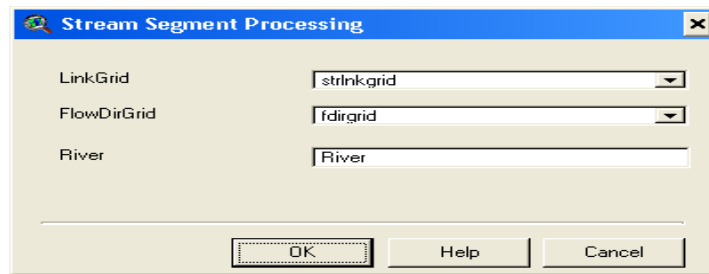
Figura 78. Subcuencas delineadas. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.



**2.4.7 Stream Segment Processing.** Este paso convierte los cauces de formato grid a formato vector.

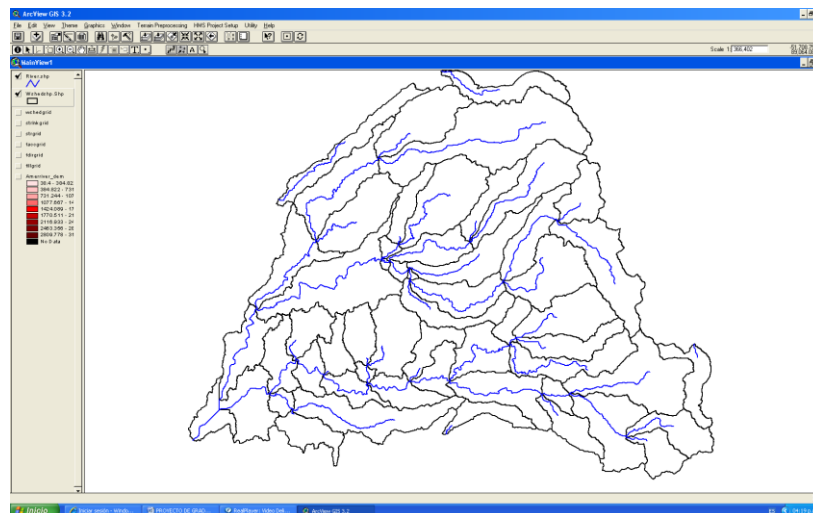
- Seleccionar Terrain Preprocessing → Stream Segment Processing
- Confirmar que la entrada de LinkGrid sea “strinkgrid” y de FlowDirGrid sea “fdgrid”. La salida de River será “River”, ok para aceptar.

Figura 79. Stream Segment Processing.



- Aparecerá una ventana que nos pregunta si el punto mostrado es una salida de una cuenca (outlet), si lo es ingresamos 1, de lo contrario ingresamos 2. Si no lo apreciamos muy bien de qué punto se trata se puede ampliar la zona de visualización con las opciones 3 y 4. Si contestamos siempre 1, el programa definirá la cuenca vertiente a cada salida y luego podemos editar las cuencas y subcuencas que nos interesen.
- El resultado de la operación es el tema “River.shp”.

Figura 80. Cauces de la cuenca. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.



**2.4.8 Watershed Aggregation.** Este paso aglutina las subcuencas que vierten a cada confluencia de cauces. Este paso es obligatorio y se realiza para mejorar la delineación de las subcuencas y la obtención de datos.

- Seleccionar Terrain Preprocessing → Watershed Aggregation.
- Confirmar que la entrada de River sea “River.shp” de Watershed sea “Wshedshp.shp”. La salida de Aggregated Watershed será “wshedmg.shp”, Ok para aceptar.

Figura 81. Creating Aggregated Watersheds.

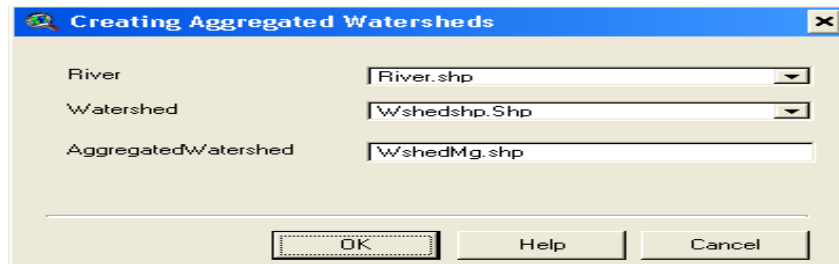
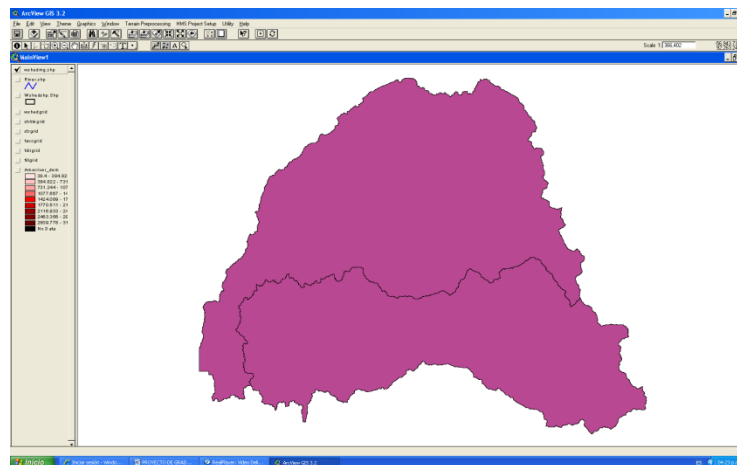


Figura 82. Watershed Aggregation Fuente: Modelo en Arcview 3.2.



Nota: hay que tener en cuenta que los nombres de las entradas y salidas de los cuadros de diálogos de cada proceso de los elementos, varía según el modelo, por tanto se cita en este documento “como ejemplo” los nombres que se generaron en este procedimiento.

**2.4.9 Configuración del modelo hidrológico.** El menú “HMS Project Setup” se encarga de extraer la información necesaria de base de datos espacial y crear un

proyecto HMS. Se trata de la especificación de puntos de control a la salida de la cuenca, los cuales definen los tributarios de la cuenca. Dado que se pueden crear múltiples modelos de cuenca a partir de la misma base de datos espacial, estos modelos se gestionan a través de 2 temas, el de puntos del proyecto “ProjPnts.shp” y el de área de proyecto “ProjArea.shp”. La gestión de estos modelos muestran las regiones ya incluidas en un proyecto. Además, la gestión permite la recreación de un área con diferentes umbrales o borrar el proyecto y los ficheros relacionados de forma ventajosa.

- En HMS Project Setup, seleccionar la opción Star New Project.
- Definir el nombre del proyecto.
- Se añade el tema ProjPnts.shp

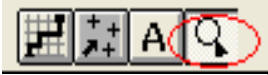
- Dar clic en el icono  seleccionar un punto de salida de la cuenca sobre los temas activados de river.shp y wshedmg.shp
- En HMS Project Setup, seleccionar la opción Generate New Project
- Original stream definition, ok Para aceptar.

Figura 83. Generate the New Project

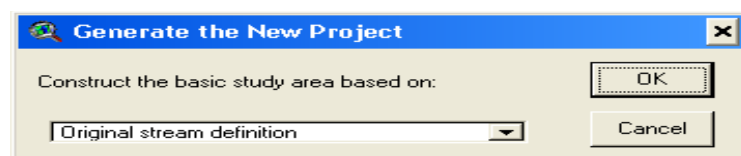
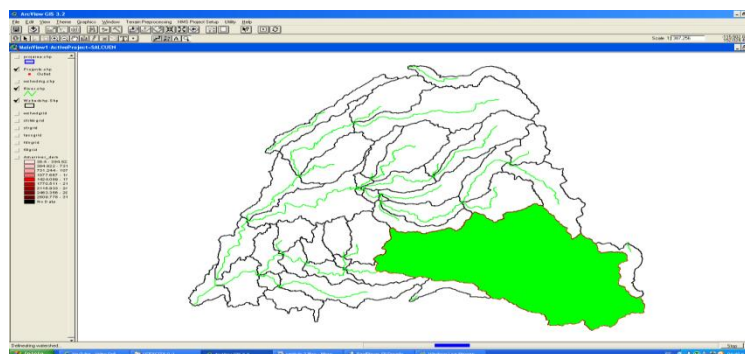


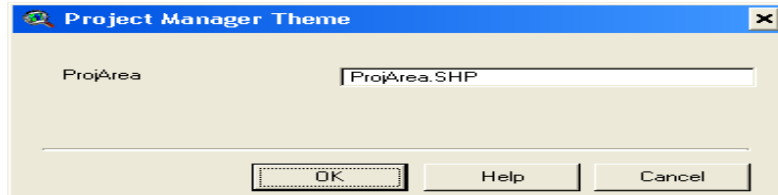
Figura 84. Delimitación del área de estudio.



Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

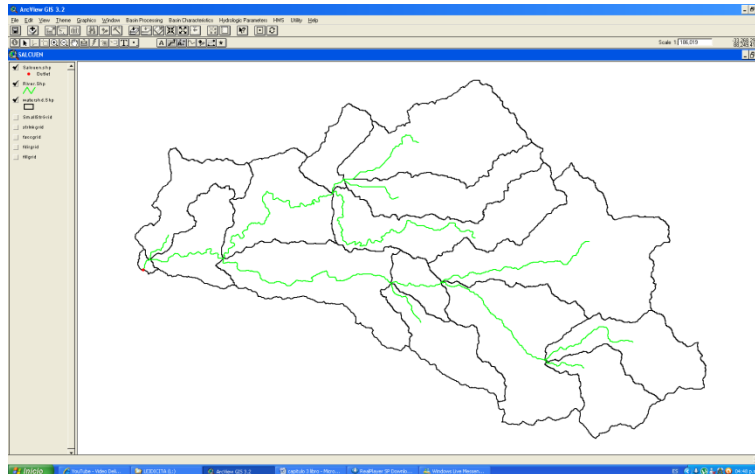
- A la operación anterior se le añade la vista ProjArea.shp

Figura 85. Project manager Theme



- Obteniendo la cuenca de estudio.

Figura 86. Área de estudio



Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

### Características de la cuenca:

**2.4.10 Centroides de las subcuencas.** La ubicación del centroide de las subcuencas puede estimarse como sigue:

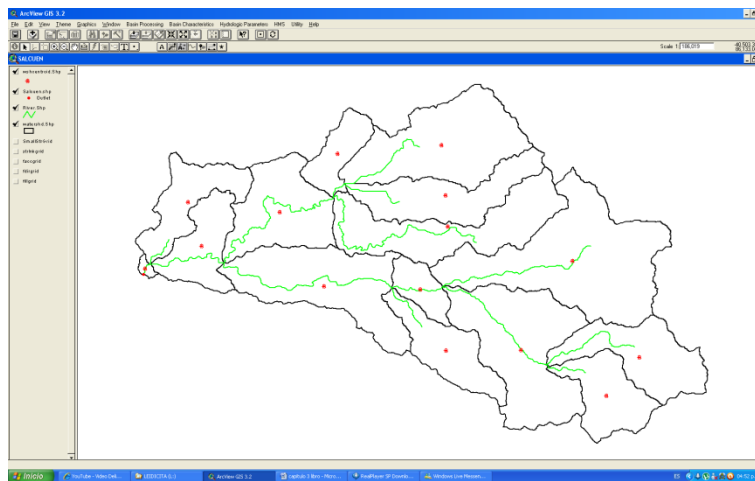
- Seleccionar “Basin Characteristics/Basin Centroid”
- Confirmar las 3 entradas y la salida, Ok para aceptar.
- Elegir el modelo Elipse, el cual asemeja la subcuenca a una elipse y le asigna a la subcuenca el centroide de la elipse (funciona para menos de 2000000 de

celdas.), ok para aceptar 2 veces.

El resultado es un tema de puntos llamado “WshCentroid.shp”

La cota del centroide se calcula y almacena en la tabla de atributos de “WshCentroid.shp” y también en la de “WaterShd.shp”.

Figura 87. Centroides de la subcuenca



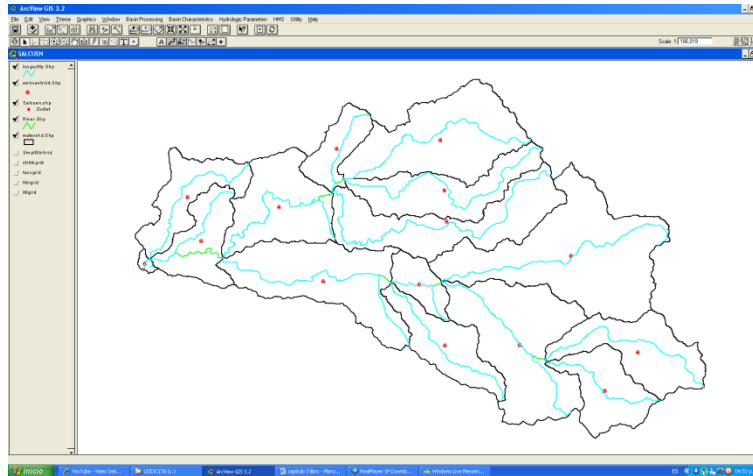
Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

**2.4.11 Camino más largo del flujo.** La operación camino más largo del flujo (Longest Flow Path) calcula las siguientes características físicas de la cuenca: longitud más larga de flujo, cota de aguas arriba, cota de aguas abajo, pendiente entre extremos, pendiente entre el 10% y el 85% del camino más largo de flujo. Estas características se almacenan en el tema “WaterShd.shp”.

➤ Seleccionar Basin Characteristics/Longest Flow Path, ok para aceptar.

El resultado de esta operación es el tema de línea “longestfp.shp”.

Figura 88: Camino más largo del flujo

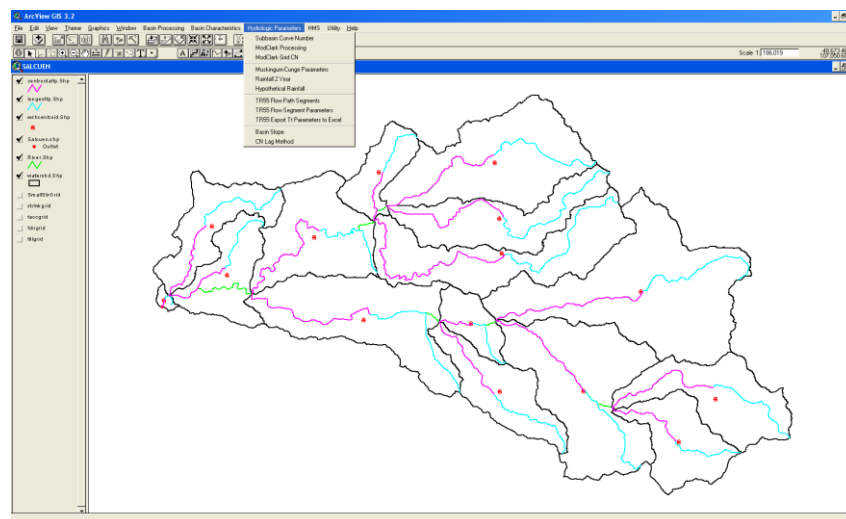


Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

**2.4.12 Centroides al camino más largo de flujo.** Se obtiene el centro geométrico en planta del camino más largo, proyectando el centroide de cada subcuenca sobre el camino más largo.

- Seleccionar Basin Characteristics/Longest Flow Path, ok para aceptar.

Figura 89. Centro geométrico del camino más largo



Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

## Parámetros hidrológicos:

**2.4.13 Número de curva de las subcuencas.** En este punto el programa solicita la malla del número de curva. Existen dos posibilidades: calcularla o ser introducida por el usuario. En este caso el CN se introduce mediante una grilla de CN preparada con anterioridad, para este fin es se debe disponer de mapas espacializados de uso y tipo de suelo, además de las tablas de CN necesaria para este fin. . La preparación de esta malla se especifica en el anexo 1.

Antes de continuar con el siguiente parámetro (Modclark processing), es importante chequear que la proyección de la cuenca sea Albers, en muchos casos los mapas espacializados no se encuentran en esta proyección (como es el caso de esta cuenca) por consiguiente hay que georeferenciarlos de nuevo, para ello es necesario acceder al directorio donde se ha guardado el proyecto que se está trabajando en Arcview y borrar todos los archivos de proyección prj.adf de las carpetas de todas las grillas generadas. Posteriormente hay que crear un archivo .asc denominado prj.adf, que se agrega únicamente a la carpeta de la grid de dirección de flujo y debe contener el siguiente texto:

```
Projection ALBERS
Datum NAD83
Zunits NO
Units METERS
Spheroid GRS1980
Parameters
29 30 0.000 /* 1st standard parallel
30 45 30 0.000 /* 2nd standard parallel
-96 0 0.000 /* central meridian
0 0 0.000 /* latitude of projection's origin
0.00000 /* false easting (meters)
```

0.00000 /\* false northing (meters)

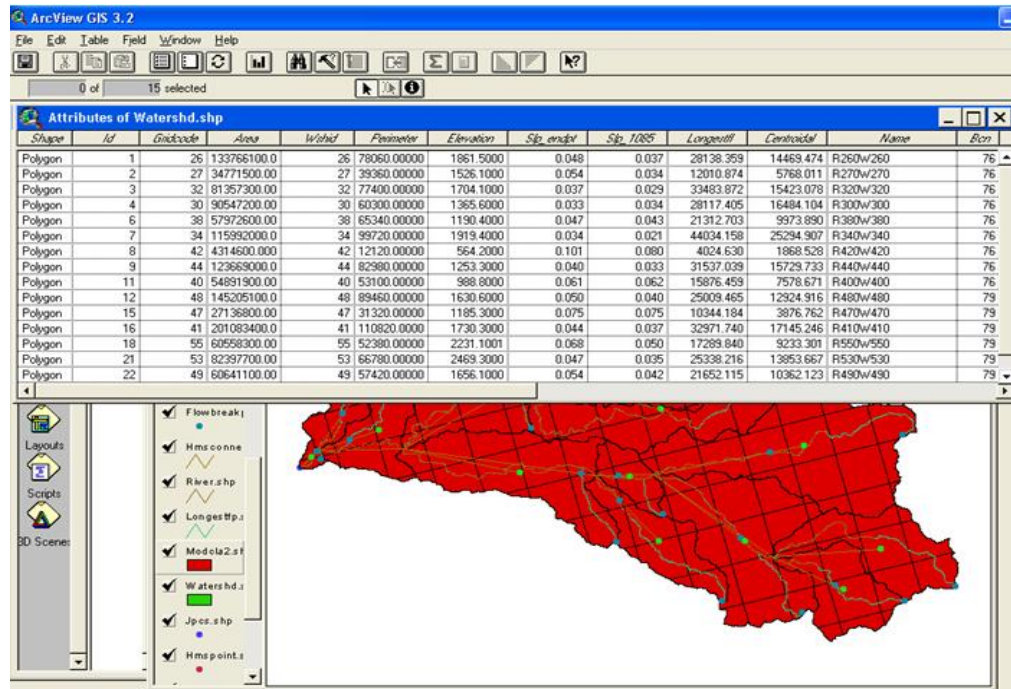
Después se procede a generar el archivo mallado en celdas de lado que convenga en cada caso (proceso Modclark). Hay que destacar que el sistema de coordenadas SHG (el cual usamos en Arcview), soporta tamaños de celda de 10.000m, 5.000m, 2.000m, 1.000m, 500m, 200m, 100m, 50m, 20m o 10m.

En este caso se usa una malla de 2000x2000.

**2.4.14 Proceso de Modclark.** Esta primera función, referente al Método de Clark modificado, crea una malla base que representa la cuenca.

**2.4.15 Modclark Grid CN.** Esta segunda función del Modclark halla el número de curva correspondiente a cada una de las celdas que se han creado en el paso anterior. Tras la realización de este procedimiento, el proyecto está preparado para la creación de los elementos para *HEC-HMS*. En la siguiente figura se muestran la tabla de atributos de la cuenca tras la realización de los cálculos de todos los parámetros que se han mencionado hasta el momento. Seguidamente, se exportarán los archivos que definirán la cuenca y todas características geométricas e hidrológicas necesarias para el análisis hidrológico mediante el software informático del *HEC*.

Figura 90. Atributos finales de la cuenca preparada para exportar a HEC-HMS



Shape	Id	Gridcode	Area	Wshd	Perimeter	Elevation	Slp_endpt	Slp_1085	Longestfl	Centroidal	Name	Bzn
Polygon	1	26	133766100.0	26	78060.00000	1861.5000	0.048	0.037	28138.359	14469.474	R260w/260	76
Polygon	2	27	34771500.00	27	35360.00000	1526.1000	0.054	0.034	12010.874	5768.011	R270w/270	76
Polygon	3	32	81357300.00	32	77400.00000	1704.1000	0.037	0.029	33483.872	15423.078	R320w/320	76
Polygon	4	30	90547200.00	30	60300.00000	1365.6000	0.033	0.034	28117.405	16484.104	R300w/300	76
Polygon	6	38	57972600.00	38	65340.00000	1190.4000	0.047	0.043	21312.703	9973.890	R380w/380	76
Polygon	7	34	115952000.0	34	99720.00000	1919.4000	0.034	0.021	44034.158	25294.907	R340w/340	76
Polygon	8	42	4314600.000	42	12120.00000	564.2000	0.101	0.080	4024.630	1868.528	R420w/420	76
Polygon	9	44	123663000.0	44	82380.00000	1253.3000	0.040	0.033	31537.039	15729.733	R440w/440	76
Polygon	11	40	54891900.00	40	53100.00000	988.8000	0.061	0.062	15876.459	7578.671	R400w/400	76
Polygon	12	49	145205100.0	49	89460.00000	1630.6000	0.050	0.040	25009.465	12924.916	R480w/480	79
Polygon	15	47	27136800.00	47	31320.00000	1185.3000	0.075	0.075	10344.184	3876.762	R470w/470	79
Polygon	16	41	201083400.0	41	110820.0000	1730.3000	0.044	0.037	32971.740	17145.246	R410w/410	79
Polygon	18	55	60598300.00	55	52380.00000	2231.1001	0.068	0.050	17289.840	9233.301	R550w/550	79
Polygon	21	53	82397700.00	53	66780.00000	2469.3000	0.047	0.035	25338.216	13853.667	R530w/530	79
Polygon	22	49	60641100.00	49	57420.00000	1656.1000	0.054	0.042	21652.115	10362.123	R490w/490	79

Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

**2.4.16 Creación del proyecto para Hec-Hms.** Finalmente, desde la vista de proyecto se opera con el menú llamado *HMS* para la creación de los elementos propios de dicho programa y del modelo hidrológico distribuido necesario para el análisis con mallas. Tras este procedimiento se exporta el proyecto con la opción *Hms Project Setup*.

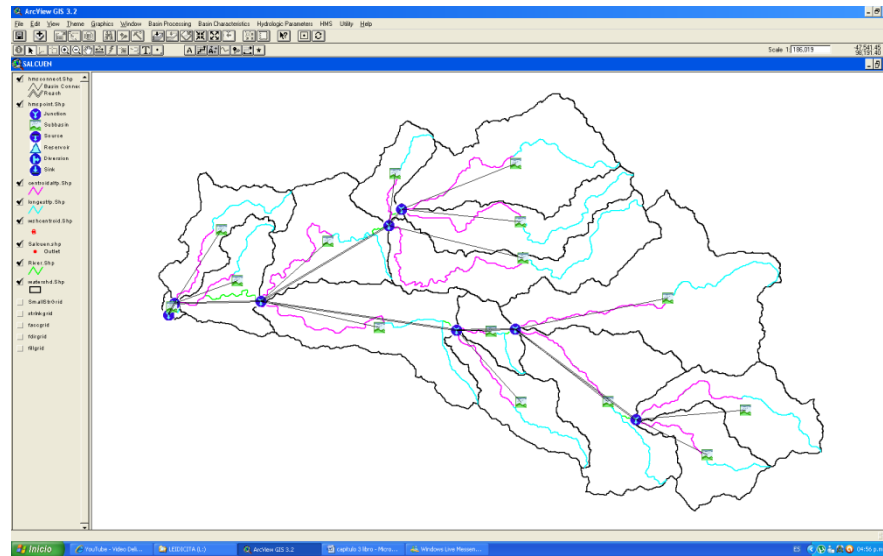
Los pasos detallados de este proceso son los expuestos a continuación.

**2.4.16.1 Autonombro de tramos de cauces.** Este proceso nombra a los tramos de cauce en una secuencia desde aguas arriba a aguas abajo. La convención de nombres combina la letra “R” y un número. Estos nombres más tarde pueden cambiarse por otros más descriptivos.

➤ Seleccionar HMS/River AutoName, ok para aceptar.

El resultado de la operación es la creación de una columna “Name” en la tabla de atributos de “River.shp”.

Figura 91. Autonombro de tramos.



Fuente: Modelo en Arcview 3.2.

**2.4.16.2 Basin AutoName.** Se nombran automáticamente las subcuencas, del mismo modo que los ríos.

- Seleccionar HMS/ Basin AutoName, ok para aceptar.

**2.4.16.3 Map to HMS Units.** En este paso se convierten las características físicas de los ríos y subcuencas de unidades de mapa a unidades de *HMS*. En este instante el programa ofrece la posibilidad de elegir entre Sistema Inglés o Métrico. Por ejemplo, la longitud física pasa a unidades en metros, si el sistema de unidades elegido es el Métrico.

- Seleccionar HMS/ Map to HMS Units, ok para aceptar.

**2.4.16.4 HMS Check Data.** Este paso examina los datos creados hasta ahora para *HEC-HMS* con el objetivo de asegurar la consistencia de la estructura hidrológica del modelo. Es decir, que los nombres de ríos no estén repetidos o que los ríos estén contenidos en las subcuencas correspondientes.

**2.4.16.5 Esquema HMS.** Se crea el esquema con el que se trabaja en *HMS*.

**2.4.16.6 Regular Legend.** Se introducen los iconos estándares de *HEC-HMS* para subcuencas, ríos, uniones, etc.

**2.4.16.7 Add Coordinates.** En este paso se añaden las coordenadas geográficas a los elementos hidrológicos creando las tablas de atributos llamadas *HMSPoint.shp* y *HMSConnect.shp*.

**2.4.16.8 Modelo de cuenca agregado.** El modelo de la cuenca agregado captura los elementos hidrológicos, sus conectividades y la información geográfica relacionada a un fichero de texto ASCII que puede ser leído por HMS. Éste modelo de la cuenca, es usado con parámetros agregados, distribuidos por el método ModClark para transformación lluvia-escurrentía.

- Seleccionar HMS/Lumped Basin Model
- Anotar el nombre del fichero y su localización, ok para aceptar.

**2.4.16.9 Grid Cell Parameter File.** Esta es una operación característica del proceso de *ModClark*. En ella se genera el archivo de celdas de parámetros (.mod) de *ModClark*. Estas celdas conforman la grid que cubre toda el área de la cuenca.

**2.4.16.10 Distributed Basin Model.** Captura los elementos hidrológicos, sus conectividades y la información geográfica relacionada en un archivo ASCII que se puede abrir y utilizar en *HMS*.

**2.4.16.11 HMS Project Setup.** Crea el proyecto para *HMS* con todas las características de que se dispone hasta este momento. No se ha generado un modelo meteorológico. Esto es debido a que la lluvia de que se dispone se implementará desde *HMS*, ya que está preparada en formato *DSS* y georreferenciada correctamente.

### **3. COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CUENCA HIDROLÓGICA ANTE UN MISMO EVENTO DE PRECIPITACIÓN, MODELADA EN HEC-HMS CON DATOS DE LLUVIA DISTRIBUIDOS TOMADOS DE RADAR Y CON DATOS PUNTUALES DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS**

La cuenca hidrográfica es la base para el manejo integrado del recurso hídrico. En ella se realizan las observaciones del ciclo hidrológico, se evalúan las potencialidades de los recursos hídricos y se define el desarrollo hidráulico: el uso del agua para riego, para el consumo humano, entre otros, y se establecen las medidas de alerta y prevención contra las inundaciones (García, 2006). La finalidad de los estudios de modelo de cuencas hidrológicas es determinar el comportamiento de la cuenca ante los procesos de lluvia-escorrentía a través del tiempo.

Uno de los parámetros y quizá el más importante en el modelo de cuencas es la precipitación, la cual varía en el espacio y en el tiempo, es decir la lluvia no es uniforme en toda el área de la cuenca y a su vez cambia su intensidad a través del tiempo. Por lo tanto, en el análisis hidrológico espacial de una cuenca debe tenerse en cuenta un tratamiento distribuido de la precipitación para intervalos de tiempos dados.

La problemática asociada a las avenidas y las inundaciones que provocan es compleja, ya que intervienen numerosos factores entre los cuales se encuentran la magnitud y localización de las poblaciones, las obras y la actividad antropogénica en las zonas estudiadas, las características fisiográficas y morfométricas de la cuenca incluyendo su sistema fluvial.

De esta manera, se considera, en este documento, un análisis hidrológico agregado o clásico, el cual se define como un estudio hidrológico en el que la

cuenca total analizada se divide en un número de subcuencas, del orden de pocas decenas la mayoría de las veces, y en las que se considera una globalización de los parámetros geométricos, hidrológicos, etc., para cada una de las subcuencas que componen el área drenante total. Es decir, dentro de cada subcuenca, las características de la misma se resumen en una serie de datos, área total, pendiente media de un cauce, longitud de un cauce (cauce principal), etc. de modo que se obtienen resultados del cálculo hidrológico a la salida de la cuenca, pero no se obtiene información de lo que pasa dentro de la misma. Al mismo tiempo, se utilizan lluvias de proyecto y se adoptan distribuciones espaciales de precipitación a partir de datos puntuales de registros pluviométricos. La mayoría de las veces, se asumen distribuciones espaciales de la precipitación de tipo uniforme dentro de cada subcuenca. En adelante, se denominará a estos métodos con el calificativo de “agregados” o “clásicos”.

Por otra parte, han aparecido otros modelos, los distribuidos, en los que se trabaja con información espacializada, tanto topográficamente como de los parámetros hidrológicos. Esto permite reproducir más fielmente la forma de la cuenca y la variación espacial de sus características, tener información del comportamiento hidrológico casi en cualquier punto del territorio, además de ofrecer la posibilidad de introducir episodios de lluvia reales. Este enfoque mejora sensiblemente el de un estudio “clásico” y por tanto, sería conveniente hacer un estudio de las posibilidades que existen en la actualidad para analizar la respuesta de las cuencas ante sucesos de lluvia y comparar sus resultados.

Dado que uno de los objetivos de la ingeniería es dotar al ser humano de las herramientas necesarias para protegerse del poder de los fenómenos naturales y de su carácter, a veces, destructivo, los modelos distribuidos podrían utilizarse para realizar predicciones de avenidas más ajustadas a la realidad. Dentro de este marco, se podrían mencionar las grandes avenidas provocadas por episodios de lluvia especialmente intensos y/o duraderos que se han sucedido a lo largo de la

historia y que han causado multitud de pérdidas tanto materiales como de vidas humanas. Estos sucesos, en algunos casos, han provocado las peores catástrofes que han asolado, en los últimos años, algunos puntos de la geografía mundial.

En este capítulo, a través de un ejemplo se muestran algunas de las diferencias existentes entre los datos obtenidos por radar (análisis distribuido de la lluvia) y las lecturas de estaciones meteorológicas los datos de lluvia de las estaciones meteorológicas (pluviógrafos, pluviómetros, etc....) de una cuenca de estudio, modelada con los programas *HEC-HSM*<sup>6</sup> y *HEC-GeoHMS* con eso se pretende comparar la forma en que el radar y la red de estaciones observan un mismo evento de lluvia en una zona específica.

### **Puntos a desarrollar en este capítulo**

Los puntos que se desarrollan en este capítulo son los siguientes:

- Estudio del modelo HMS en la opción de modelo distribuido (modelo por celdas)
- Estudio del modelo HMS en la opción de modelo agregado o clásico.
  
- Desarrollo y estudio de un ejemplo: modelación hidrológica de la cuenca Americanriver-Sacramento, California, mediante el programa *HEC-HMS*, con datos de lluvia en tiempo real procedentes de radar.
  
- Comparación de los resultados obtenidos mediante la modelación distribuida espacializada vs la modelación agregada con datos de precipitación de lecturas puntuales correspondientes a un mismo evento de lluvia, todo esto apoyado en los software *HEC-HMS*, *Arcview 3.2 con extensión HEC-GeoHMS*.

---

<sup>6</sup> Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling system.

<sup>2</sup> Hydrologic Engineering Center Geospatial Hydrologic Modeling system Extension

### 3.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA VS MODELACIÓN AGREGADA<sup>7</sup>

La modelación distribuida se basa en la utilización de datos de precipitación espacializados, procedentes de un episodio de lluvia sucedido anteriormente y que han sido registrados por un radar meteorológico. Así mismo, para la realización de este tipo de análisis se usan parámetros del terreno también distribuidos espacialmente, tales como el tipo, uso y topografía del suelo de la cuenca.

En la actualidad, ya existen modelos desarrollados por organismos competentes en el tema de la hidrología con los que se pueden llevar a cabo este tipo de estudios; y múltiples ejemplos ya realizados con ello. Por otro lado, la modelación denominada en este documento como agregado, se basa en la utilización de datos de precipitación procedentes de registros puntuales realizados con pluviómetros distribuidos en el espacio. Generalmente, en este tipo de estudios se utiliza tan sólo información procedente de una estación de registro, puesto que no se dispone de muchos más pluviómetros por cuenca de drenaje.

En este apartado se analizan las características de un tipo de modelación y el otro. Se presenta, en la tabla 5, un resumen de las diferencias existentes entre ellos, tanto de las ventajas como de las desventajas de uno sobre el otro:

---

<sup>7</sup> Tesina D'Especialitat, Utilización de datos de lluvia distribuidos en estudios hidrológicos de inundación. Aplicación con HEC-HMS, pág. 4. Universtitat Politècnica de Catalunya-2009

Tabla 5. Cuadro comparativo entre los dos tipos de modelación.

<b>MODELACIÓN DISTRIBUIDA</b>	<b>MODELACION PUNTUAL O CLÁSICA</b>
Información espacializada, por celdas (Más detalle).	Globalización de datos por subcuenca (Menos detalle).
Reproducción de la forma de la cuenca.	Sólo considera el área, no tiene en cuenta la forma ni condiciones de detalle (pendientes, usos del suelo, etc.) dentro de la cuenca.
Introducción de datos reales para todos los puntos.	Registros puntuales que se globalizan Uniformemente para todos los puntos de la subcuenca.
Necesidad de un procesador con mayor capacidad.	Necesidad de un procesador con menor capacidad.
Necesidad de más tiempo de trabajo, Proceso más lento.	Estimación más rápida y sencilla. Es consecuencia, en parte, de la diferencia anterior.

Por un lado, en la modelación distribuida se tiene información espacializada. Esto es lo que hace que exista una reproducción de la forma de la cuenca. Es decir, si se tiene un parámetro (dato de lluvia)  $x_0$  en un punto de la cuenca y un  $x_1$  en otro punto (dato de lluvia), se reflejará mediante las celdas de información. Sin embargo, en la modelación agregada, se trabajará con un dato promedio (por ejemplo,  $x=(x_0+x_1)/2$ ) en ambos puntos.

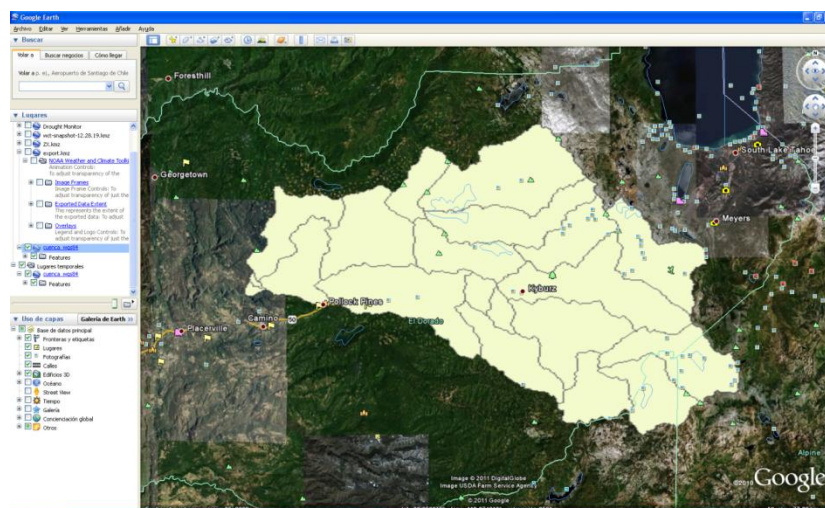
Además, no se tiene en cuenta, por ejemplo, si el terreno con parámetro  $x_0$  está

cerca de la salida de la cuenca o es el terreno con parámetro  $x1$  el que lo está. Una situación u otra darían comportamientos hidrológicos diferentes, y sin embargo el modelo de cuenca discreta adoptaría el mismo parámetro en un caso que en otro. Y lo mismo sucede en cuanto a la introducción de datos reales. Si existe la posibilidad de introducir información de lluvia en celdas pequeñas, por ejemplo resolución de tamaño 1000x1000 metros, se podrán tomar datos registrados de precipitación por ejemplo procedentes de radar, y se dispondrá de un campo espacial de precipitación que describirá bastante bien el evento de lluvia. Pero si no es posible, habrá que recurrir a datos puntuales de registro, y extrapolar las distribuciones espaciales de esos datos.

### 3.2 DESCRIPCION GENERAL DE LA ZONA O CUENCA DE ESTUDIO<sup>8</sup>

Americanriver es una cuenca ubicada en el sur de Sacramento- California, con coordenadas: Latitud  $38^{\circ}46'23''$  y longitud  $120^{\circ}42'02''$ , la cual tiene un área aproximada de drenaje de 1280 km<sup>2</sup>, su afluente principal es el rio Americanriver.

Figura 92. Ubicación geográfica Cuenca Americanriver- Sacramento, California



Fuente: <http://www.googleearth.com>

<sup>8</sup> USGC. SCIENCE FOR A CHANGING WORLD-US Geological Survey.

### 3.3 DATOS DE PRECIPITACION PARA EL MODELO DE LA CUENCA

Para los dos tipos de modelación presentadas en este documento, se ha tomado un mismo evento de precipitación de 9 horas (00:00 a.m. – 9:00 a.m.) correspondientes al día 27 de febrero del año 2010, mediante 15 estaciones meteorológicas. Dichos datos fueron consultados en la página web *U.S Geological Survey and National Weather Information System*. Estos datos se encuentran en unidades americanas (pulgadas), por lo cual se les hace una transformación para posteriormente ser usados en unidades del sistema internacional (SI), aunque bien, el modelo también pudo haberse elaborado en el sistema inglés, se optó por el sistema tradicional por facilidad en la comprensión de los resultados.

Tabla 6. Ubicación estaciones de precipitación.

Hora	N (°)	E (°)
NF AMERICAN R	38,936	121,02
SF RUBICON R BL	38,955	120,4
SILVER LAKE	38,671	120,12
SF AMERICAN R	38,764	120,33
UNION VALLEY	38,865	120,44
S.F. SILVER CREEK	38,819	120,36
SILVER CREEK	38,824	120,54
S. F. AMERICAN	38,773	120,7
SF AMERICAN R	38,771	120,82
MF AMERICAN R	39,025	120,59
MF AMERICAN R	39,006	120,76
MF AMERICAN R	39,11	120,48
RUBICON R BL	39,057	120,41
RUBICON R BL	39,057	120,41
RUBICON R BL	39,057	120,41

Figura 93. Ubicación estaciones de precipitación en la cuenca

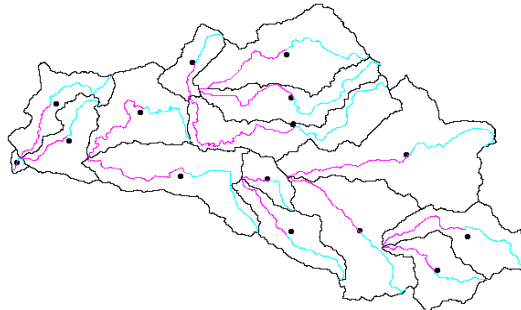


Tabla 7. Datos de precipitación en mm

	00:00-01:00	01:00-02:00	02:00-03:00	03:00-04:00	04:00-05:00	05:00-06:00	06:00-07:00	07:00-08:00	08:00-09:00
Pluv 1	7,62	7,62	0	1,62	3,81	0	0,51	0	0,25
Pluv 2	7,11	8,13	0	1,78	0,76	0,76	0,51	0	0,51
Pluv 3	6,1	5,84	0	0,76	3,81	0	0	0	0,51
Pluv 4	6,6	8,64	0,51	0,51	0	0,76	0,25	0	1,02
Pluv 5	7,62	12,7	1,78	1,27	0,76	0,76	0,25	0,51	2,79
Pluv 6	5,84	8,64	9,14	0,25	0	1,02	1,27	8,64	14,99
Pluv 7	5,84	8,38	9,4	0,51	0	1,27	1,02	10,67	16,26
Pluv 8	6,1	8,13	9,14	0,25	0	0,51	1,02	10,67	11,43
Pluv 9	5,84	8,86	8,13	0,51	0	0,76	1,52	8,89	11,94
Pluv 10	5,08	8,64	9,66	0,51	0	0,76	1,52	6,86	12,19
Pluv 11	4,32	6,86	9,14	3,05	1,27	3,56	4,57	9,65	4,06
Pluv 12	4,57	7,62	10,67	1,78	0,51	3,05	6,1	6,6	5,08
Pluv 13	4,83	8,89	9,4	7,11	7,37	2,29	6,1	2,03	1,27
Pluv 14	4,57	7,11	8,13	5,59	6,86	2,29	7,37	2,29	2,29
Pluv 15	7,11	8,13	1,52	0	0	0,76	0,25	0,51	2,79

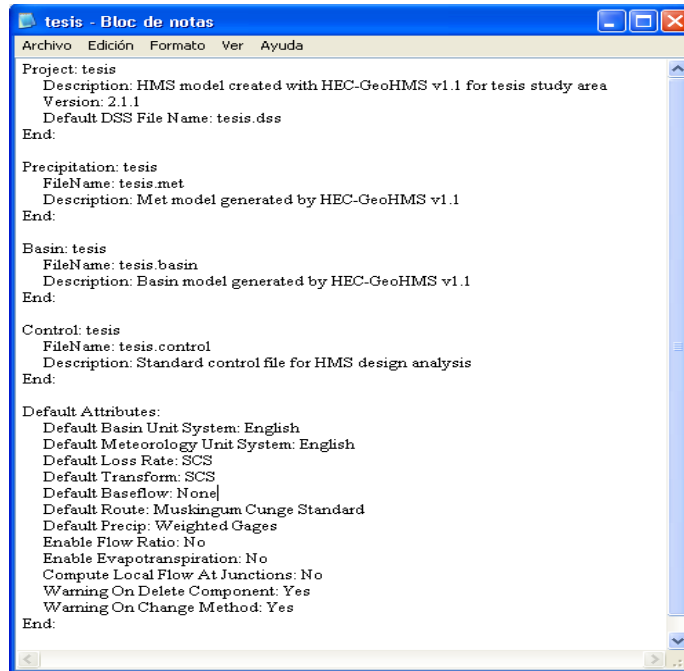
### 3.4 MODELO EN HEC-HMS- MODELO DISTRIBUIDO

Hec-geoHms genera diferentes archivos de los cuales 3 son de extrema importancia, ya que contienen la información necesaria para posteriormente trabajar en Hec-Hms y calcular el caudal de salida de la cuenca. Los archivos generados son los siguientes:

- **Archivo .hms (tesis.hms):** Acá se especifican las características generales del proyecto generado. En este archivo se pueden ver el resto de archivos por los que está formado el proyecto completo, el sistema de unidades de cada uno de ellos y

los métodos de pérdidas de precipitación y de transformación lluvia-escorrentía con los que se va a llevar a cabo el cálculo en *HEC-HMS* si no se introduce ningún cambio. Todo esto se puede observar en la siguiente figura:

Figura 94. Información de archivo .hms



```
tesis - Bloc de notas
Archivo  Edición  Formato  Ver  Ayuda
Project: tesis
  Description: HMS model created with HEC-GeoHMS v1.1 for tesis study area
  Version: 2.1.1
  Default DSS File Name: tesis.dss
End:

Precipitation: tesis
  FileName: tesis.met
  Description: Met model generated by HEC-GeoHMS v1.1
End:

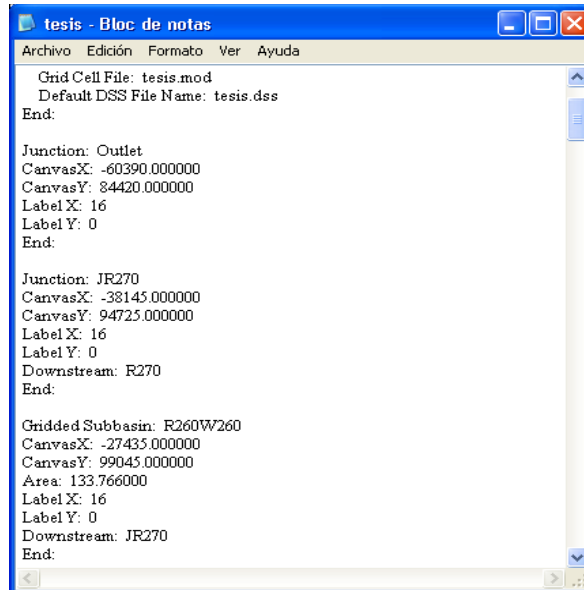
Basin: tesis
  FileName: tesis.basin
  Description: Basin model generated by HEC-GeoHMS v1.1
End:

Control: tesis
  FileName: tesis.control
  Description: Standard control file for HMS design analysis
End:

Default Attributes:
  Default Basin Unit System: English
  Default Meteorology Unit System: English
  Default Loss Rate: SCS
  Default Transform: SCS
  Default Baseflow: None
  Default Route: Muskingum Cunge Standard
  Default Precip: Weighted Gages
  Enable Flow Ratio: No
  Enable Evapotranspiration: No
  Compute Local Flow At Junctions: No
  Warning On Delete Component: Yes
  Warning On Change Method: Yes
End:
```

- **Archivo .basin (tesis.basin):** En este archivo se definen cada uno de los elementos que componen el esquema de la cuenca (subcuencas, ríos y uniones, en este caso); además de los que tienen conectados aguas abajo, su posición en el espacio, el área que ocupan en el caso de las subcuencas y etiquetas con las que se identifica cada uno de ellos dentro del proyecto global. Además, también se especifica el *Grid Cell File*, que da las características de cálculo hidrológico para cada uno de los elementos que componen el modelo en *HMS*, como se indica en la siguiente figura:

Figura 95. Información de archivo .basin



```
tesis - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Grid Cell File: tesis.mod
Default DSS File Name: tesis.dss
End:

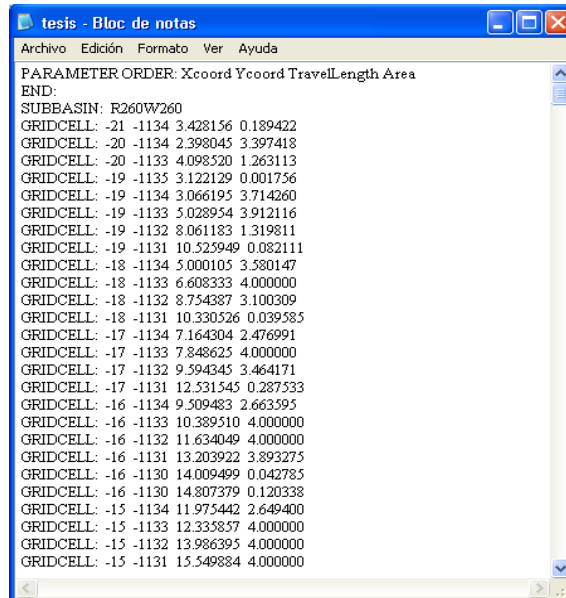
Junction: Outlet
CanvasX: -60390.000000
CanvasY: 84420.000000
Label X: 16
Label Y: 0
End:

Junction: JR270
CanvasX: -38145.000000
CanvasY: 94725.000000
Label X: 16
Label Y: 0
Downstream: R270
End:

Gridded Subbasin: R260W260
CanvasX: -27435.000000
CanvasY: 99045.000000
Area: 133.766000
Label X: 16
Label Y: 0
Downstream: JR270
End:
```

**Archivo .mod (tesis.mod):** Aquí se especifica la información del modelo distribuido por celdas. En concreto se puede ver, para cada una de ellas sus coordenadas, tiempo de viaje, área de drenaje y número de curva (esta columna de número de curva, debe eliminarse del archivo, ya que aparece el método *SCSCN*, no siendo éste el indicado para el análisis distribuido).

Figura 96. Información de archivo .mod



```

PARAMETER ORDER: Xcoord Ycoord TravelLength Area
END;
SUBBASIN: R260W260
GRIDCELL: -21 -1134 3.428156 0.189422
GRIDCELL: -20 -1134 2.398045 3.397418
GRIDCELL: -20 -1133 4.098520 1.263113
GRIDCELL: -19 -1135 3.122129 0.001756
GRIDCELL: -19 -1134 3.066195 3.714260
GRIDCELL: -19 -1133 5.028954 3.912116
GRIDCELL: -19 -1132 8.061183 1.319811
GRIDCELL: -19 -1131 10.525949 0.082111
GRIDCELL: -18 -1134 5.000105 3.580147
GRIDCELL: -18 -1133 6.608333 4.000000
GRIDCELL: -18 -1132 8.754387 3.100309
GRIDCELL: -18 -1131 10.330526 0.039585
GRIDCELL: -17 -1134 7.164304 2.476991
GRIDCELL: -17 -1133 7.848625 4.000000
GRIDCELL: -17 -1132 9.594345 3.464171
GRIDCELL: -17 -1131 12.531545 0.287533
GRIDCELL: -16 -1134 9.509483 2.663595
GRIDCELL: -16 -1133 10.389510 4.000000
GRIDCELL: -16 -1132 11.634049 4.000000
GRIDCELL: -16 -1131 13.203922 3.893275
GRIDCELL: -16 -1130 14.009499 0.042785
GRIDCELL: -16 -1130 14.807379 0.120338
GRIDCELL: -15 -1134 11.975442 2.649400
GRIDCELL: -15 -1133 12.335857 4.000000
GRIDCELL: -15 -1132 13.986395 4.000000
GRIDCELL: -15 -1131 15.549884 4.000000

```

Se puede observar en la información de los archivos anteriores que algunos métodos no aparecen como fueron especificados; por ejemplo, para el método de transformación se eligió Modclark (el cual es la única posibilidad para que el programa tome la precipitación en forma de malla), pero en el archivo .hms aparece SCS, este inconveniente se soluciona cambiando el método de transformación de SCS a método Modclark en Hec-Hms para cada una de las subcuencas, por ende, se debe calcular el tiempo de concentración y coeficiente de almacenamiento para cada una de ellas, como se especificará más adelante.

Otro problema presente es que la información del número de curva mostrada en el archivo .mod, siendo esta la correcta, no se ve reflejada en el programa Hec-hms, para ello es necesario cambiar en el archivo .hms, el método de pérdidas (loss method) de *SCS curve Number* a *Gridded SCS curve Number* y borrar del archivo .mod la columna correspondiente al número de curva, posteriormente hay que introducir en el Hec-hms una malla de número de curva para cada subcuenca en formato .dss (la forma como se obtiene este archivo, se presenta en el anexo 2).

Una vez preparada la cuenca y superados todos los inconvenientes, se importa el modelo a *Hec-HMS* donde consecutivamente se hará el proceso necesario para calcular el caudal de salida de la cuenca. Para realizar el modelo en Hec-Hms, debe tenerse en cuenta:

Los métodos de cálculo de pérdidas y de transformación lluvia-escorrentía utilizados son los siguientes:

- Método de cálculo de pérdidas: *Gridded SCS Curve Number*. Se debe asignar la grid de número de curva para cada subcuenca delineada. Este número de curva ha sido introducido como se mencionó anteriormente, por medio de una malla de CN en formato .dss generada previamente, usando mapas de tipo y uso del suelo de la cuenca en estudio.<sup>9</sup>
- Método de transformación lluvia-escorrentía: *ModClark*. Es necesario el parámetro Tlag, el cual corresponde al 60% del Tc, dado en minutos.

El tiempo de concentración es aquel que tarda la última gota de agua de lluvia en llegar al punto de salida de la cuenca, la cual cae lo más alejada temporalmente de dicho punto, y se calcula por medio de la fórmula de Témez:

$$Tc = 0.3 * \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Siendo,

Tc = Tiempo de concentración en horas.

L = Longitud del cauce en Km

S = Pendiente del cauce

---

<sup>9</sup> Información extraída de la pagina web del USGC, subcuencas-American River

- Método de propagación de caudales: *Muskingum*. Este método fue presentado por *McCarthy* (1938) y maneja relaciones caudal-almacenamiento. Este método modela el almacenamiento en un cauce mediante la combinación de dos tipos de almacenamientos, prismático y en cuña. Se han introducido los mismos parámetros que para el caso distribuido.

La tabla de entrada de datos se presenta a continuación:

Tabla 8. Tiempos de concentración para cada subcuenca

SUBCUENCA	AREA (km2)	L (km)	S	Tc (h)	Tlag (h)
SUBC-1	133,708	28,138	0,048	6,75	4,05
SUBC-2	34,756	12,011	0,054	3,45	2,07
SUBC-3	81,322	33,484	0,037	8,09	4,86
SUBC-4	90,507	28,117	0,033	7,24	4,34
SUBC-5	57,947	21,313	0,047	5,49	3,29
SUBC-6	115,99	44,034	0,034	10,13	6,08
SUBC-7	4,364	4,025	0,101	1,34	0,8
SUBC-8	123,616	31,537	0,04	7,62	4,57
SUBC-9	54,869	15,876	0,061	4,17	2,5
SUBC-10	145,21	25,009	0,05	6,12	3,67
SUBC-11	27,126	10,344	0,075	2,9	1,74
SUBC-12	201,08	32,972	0,044	7,74	4,64
SUBC-13	60,616	17,29	0,068	4,36	2,62
SUBC-14	82,4	25,338	0,047	6,26	3,75
SUBC-15	60,64	21,652	0,054	5,41	3,24

Tabla 9. Tiempos de retardo para cada río

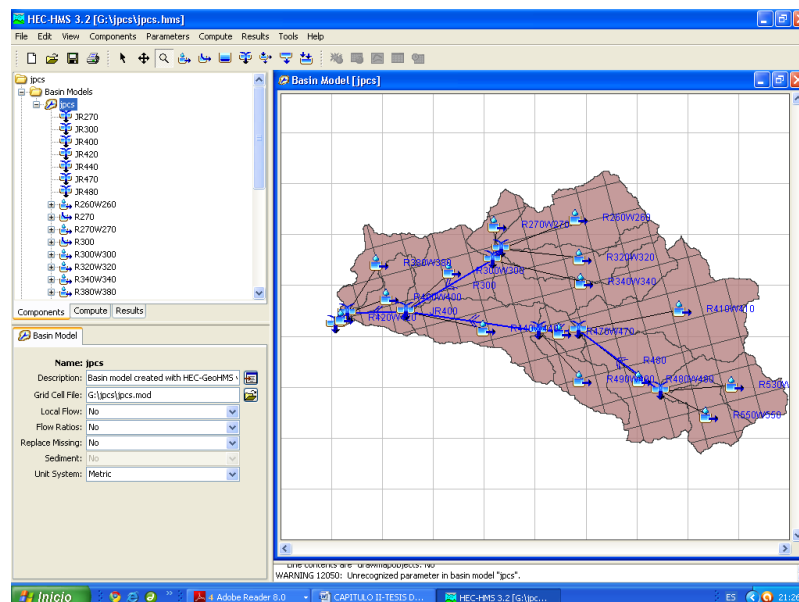
RIOS	L (m)	S	Tc (h)	x	k (h)	Tlag (h)
R1	2296	0,068	0,975	0,3	0,653	0,585
R2	25269	0,014	6,87	0,3	4,603	4,122
R3	11032	0,012	4,933	0,3	3,305	2,96
R4	2794	0,088	1,333	0,3	0,893	0,8
R5	23848	0,146	7,147	0,3	4,788	4,288
R6	6467	0,074	2,602	0,3	1,743	1,561
R7	16424	0,082	4,751	0,3	3,183	2,851

Como el modelo es distribuido, en *Hec-Hms* debe introducirse las grillas de precipitación y CN en formato *.dss*, en los componentes *Grid Data Manager/Precipitation Gridset* (para la grid de precipitación tomada por el radar), y *Curve Number Gridset*,

La preparación y elaboración de la mallas de precipitación y CN, se especifican en el anexo 1, por otra parte la conversión de mallas en formato *.asc* a *.dss*, se especifica en el anexo 2.

Seguidamente, se introducen todos los datos necesarios en *Hec-Hms* y se procede con los cálculos.

Figura 97. Vista del proyecto abierto en Hec-Hms



Fuente: Modelo en Hec-Hms.

- **Modelo distribuido con grilla de 2000X2000 m**

Después del proceso de introducción de datos en el programa, se obtiene:

$$Q_{pico} = 167.5 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$V_{escorrentia} = 10.20 \text{ mm}.$$

Figura 98. Hidrograma de salida de la cuenca para el modelo de lluvia distribuido con malla 2000X2000

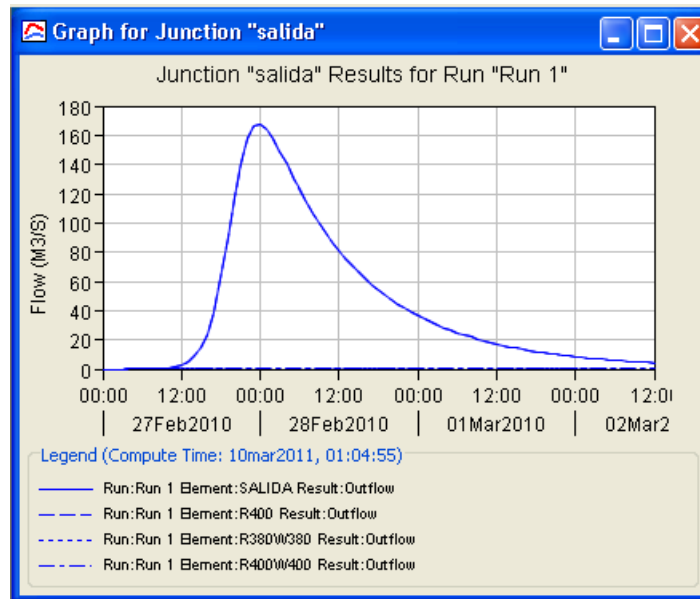


Figura 99. Cuadro de resultados del modelo distribuido

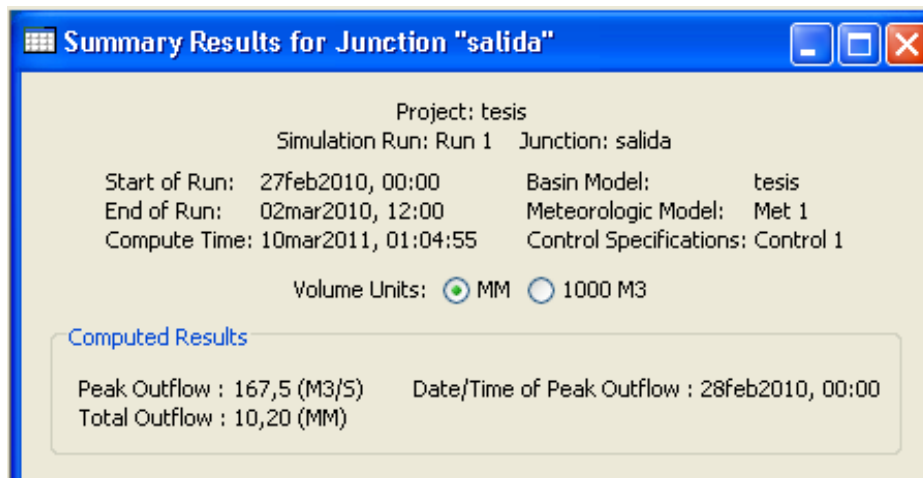


Tabla 10. Tabla de datos del modelo distribuido.

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: tesis Simulation Run: Run 1

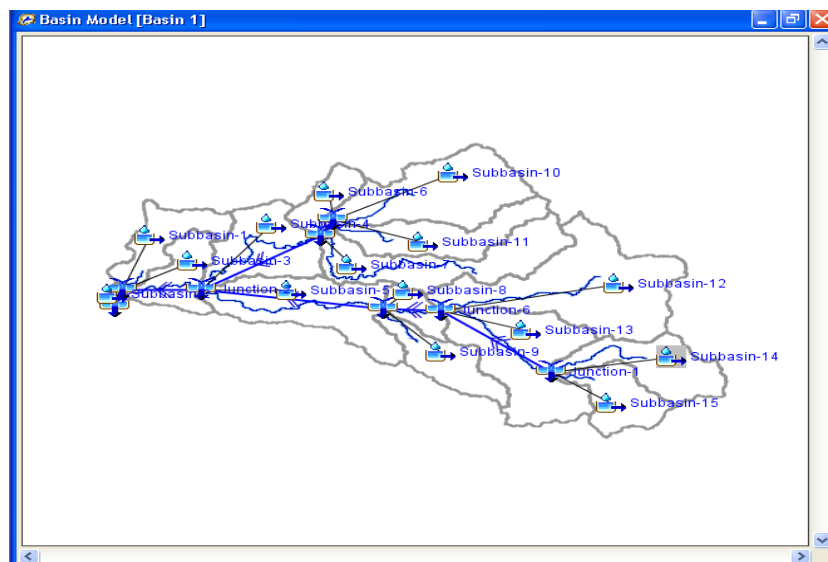
Start of Run: 27feb2010, 00:00 Basin Model: tesis  
 End of Run: 02mar2010, 12:00 Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 10mar2011, 01:04:55 Control Specifications: Control 1

Volume Units:  MM  1000 M3

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
JR270	215,123000	22,6	27feb2010, 17:00	10,76
JR300	365,886000	38,6	27feb2010, 19:00	10,53
JR400	1157,124000	167,5	27feb2010, 21:00	11,21
JR440	577,022000	127,8	27feb2010, 16:00	15,00
JR470	489,244000	110,7	27feb2010, 15:00	15,38
JR480	142,956000	33,7	27feb2010, 12:00	14,82
Outlet	1272,859000	167,1	28feb2010, 01:00	10,16
R260W260	133,766000	18,3	27feb2010, 16:00	10,42
R270	215,123000	22,5	27feb2010, 17:00	10,75
R270W270	34,771000	1,0	27feb2010, 14:00	1,46
R300	365,886000	38,4	27feb2010, 23:00	10,44
R300W300	90,547000	1,0	27feb2010, 15:00	0,82
R320W320	81,357000	7,2	28feb2010, 01:00	11,33
R340W340	115,992000	16,3	27feb2010, 20:00	12,84
R380W380	57,973000	0,1	27feb2010, 16:00	0,13
R400	1157,124000	167,4	28feb2010, 00:00	11,17
R400W400	54,892000	0,2	27feb2010, 14:00	0,19
R410W410	201,083000	40,4	27feb2010, 15:00	15,29
R420	1269,989000	167,1	28feb2010, 01:00	10,18
R420W420	2,870000	0,0	27feb2010, 10:00	0,11
R440	577,022000	126,8	27feb2010, 20:00	14,97
R440W440	123,669000	6,3	27feb2010, 18:00	3,56
R470	489,244000	109,8	27feb2010, 16:00	15,37
R470W470	27,137000	9,6	27feb2010, 12:00	13,76

### 3.5 MODELO EN HEC-HMS-Modelo agregado

Figura 100. Esquema de subcuencas en Hec-Hms.



Con los mismos datos geométricos de la cuenca distribuida, se ha preparado el modelo de la cuenca puntual, obteniendo 15 subcuencas de la cuenca general en estudio, con 15 datos de precipitación correspondientes a 15 puntos o estaciones de registro ubicadas en el centroide de cada subcuenca.

Los métodos usados en este modelo y cuyos datos se introducen manualmente, son los siguientes:

- Método de cálculo de pérdidas: *SCS Curve Number*: Se ha procedido a hallar un valor medio de los valores del número de curva de cada celda, que aparecían en el modelo de *Modclark* y que componían cada una de las subcuencas
- Método de transformación lluvia-escorrentía: *Clark Unit Hydrograph*

En esta modelación, se llevaron a cabo dos simulaciones, las cuales se mencionan a continuación:

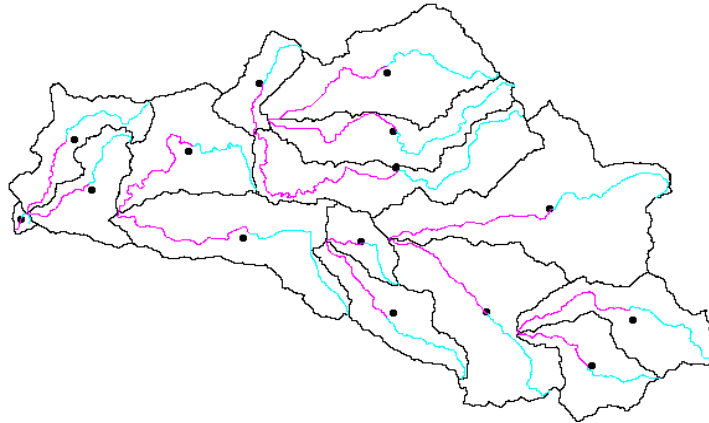
1. Modelo con 15 registros de precipitación tomadas de 15 estaciones ubicadas en el centroide de cada subcuenca (15 pluviógrafos).

2. Modelo con 15 datos de precipitación, correspondiente al promedio de los registros tomados por las 15 estaciones, quedando ubicado este en el centroide de la cuenca (1 pluviógrafo).

- **Caso 1:**

Usando 15 puntos de registro de datos, ubicados en cada una de las subcuencas del modelo distribuido considerado anteriormente. Se asume que el hidrograma registrado no tiene errores y coincide con los datos de lluvia correspondientes a la tormenta real, en este caso descrita por los registros de lluvia del radar meteorológico.

Figura 101. Esquema de subcuencas con ubicación de pluviógrafos en los Centroides de la cuenca en Hec-Hms.



$$Q_{pico} = 144.4 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$V_{escorrentia} = 9.58 \text{ mm}.$$

Figura 102. Hidrograma de salida de la cuenca para el modelo de lluvia puntual, con 15 puntos de registro.

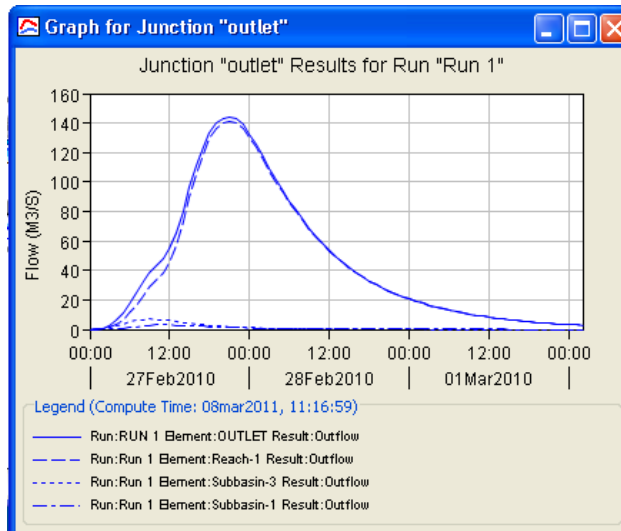


Figura 103. Cuadro de resultados del modelo puntual, con 15 pluviógrafos de registro

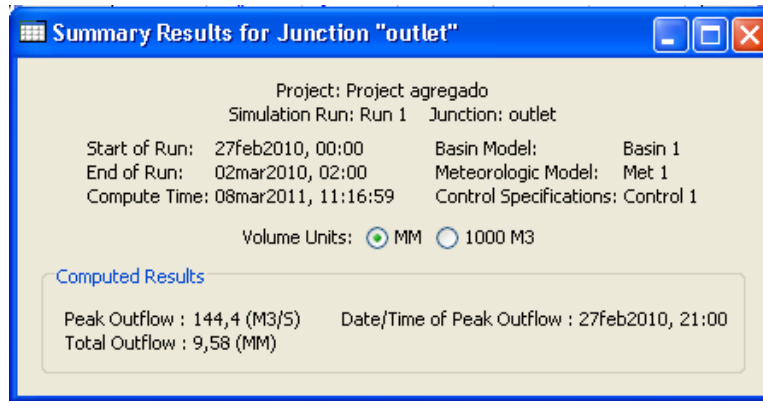
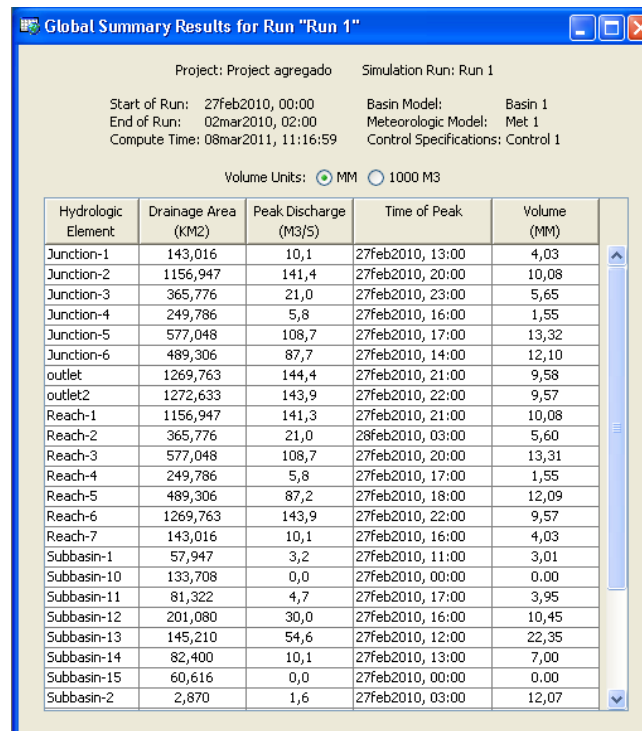


Tabla 11. Tabla de datos del modelo puntual, con 15 puntos de registro de precipitación



Project: Project agregado Simulation Run: Run 1

Start of Run: 27Feb2010, 00:00 Basin Model: Basin 1  
End of Run: 02mar2010, 02:00 Meteorologic Model: Met 1  
Compute Time: 08mar2011, 11:16:59 Control Specifications: Control 1

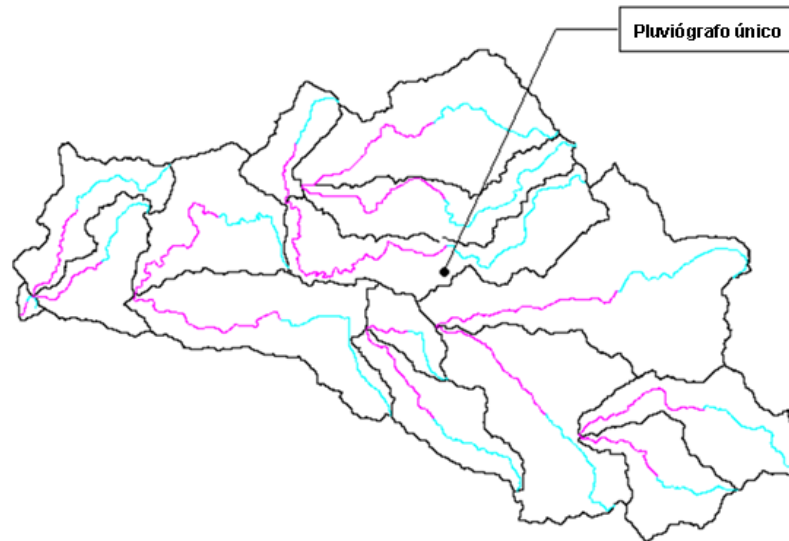
Volume Units:  MM  1000 M3

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Junction-1	143,016	10,1	27Feb2010, 13:00	4,03
Junction-2	1156,947	141,4	27Feb2010, 20:00	10,08
Junction-3	365,776	21,0	27Feb2010, 23:00	5,65
Junction-4	249,786	5,8	27Feb2010, 16:00	1,55
Junction-5	577,048	108,7	27Feb2010, 17:00	13,32
Junction-6	489,306	87,7	27Feb2010, 14:00	12,10
outlet	1269,763	144,4	27Feb2010, 21:00	9,58
outlet2	1272,633	143,9	27Feb2010, 22:00	9,57
Reach-1	1156,947	141,3	27Feb2010, 21:00	10,08
Reach-2	365,776	21,0	28Feb2010, 03:00	5,60
Reach-3	577,048	108,7	27Feb2010, 20:00	13,31
Reach-4	249,786	5,8	27Feb2010, 17:00	1,55
Reach-5	489,306	87,2	27Feb2010, 18:00	12,09
Reach-6	1269,763	143,9	27Feb2010, 22:00	9,57
Reach-7	143,016	10,1	27Feb2010, 16:00	4,03
Subbasin-1	57,947	3,2	27Feb2010, 11:00	3,01
Subbasin-10	133,708	0,0	27Feb2010, 00:00	0,00
Subbasin-11	81,322	4,7	27Feb2010, 17:00	3,95
Subbasin-12	201,080	30,0	27Feb2010, 16:00	10,45
Subbasin-13	145,210	54,6	27Feb2010, 12:00	22,35
Subbasin-14	82,400	10,1	27Feb2010, 13:00	7,00
Subbasin-15	60,616	0,0	27Feb2010, 00:00	0,00
Subbasin-2	2,870	1,6	27Feb2010, 03:00	12,07

- **Caso 2**

Utilizando un único pluviógrafos, el cual es el promedio de la precipitación de toda la cuenca y está ubicado en el centroide de la misma.

Figura 104. Esquema de subcuencas con ubicación de un único pluviógrafos en el Centroide de la cuenca en Hec-Hms



$$Q_{pico} = 83.4 \text{ m}^3/\text{s}.$$

$$V_{escorrentia} = 4.98 \text{ mm}.$$

Figura 105. Hidrograma de salida de la cuenca para el modelo de lluvia puntual, con 1 punto de registro

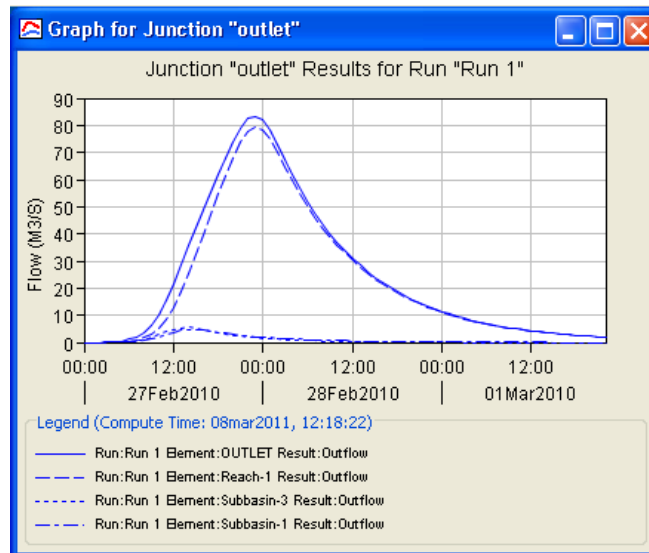


Figura 106. Cuadro de resultados del modelo puntual con un único pluviógrafos

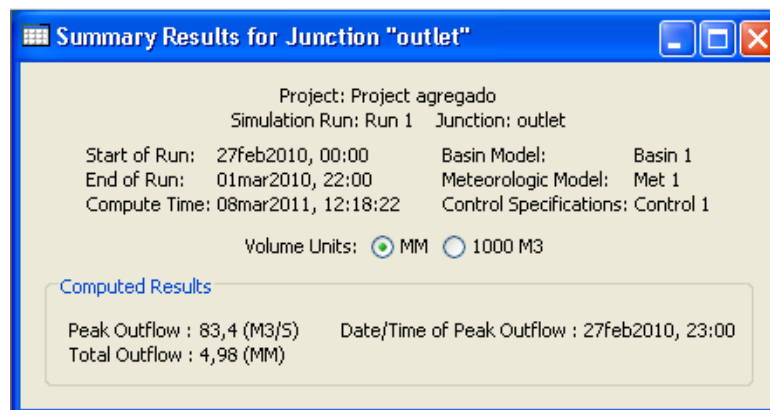


Figura 107. Tabla de datos del modelo puntual, con 1 punto de registro de precipitación

Global Summary Results for Run "Run 1"

Project: Project agregado      Simulation Run: Run 1

Start of Run: 27feb2010, 00:00      Basin Model: Basin 1  
 End of Run: 01mar2010, 22:00      Meteorologic Model: Met 1  
 Compute Time: 08mar2011, 12:18:22      Control Specifications: Control 1

Volume Units:  MM    1000 M3

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Junction-1	143,016	16,6	27feb2010, 14:00	6,10
Junction-2	1156,947	79,6	27feb2010, 22:00	5,05
Junction-3	365,776	20,2	27feb2010, 18:00	4,30
Junction-4	249,786	16,6	27feb2010, 16:00	4,35
Junction-5	577,048	51,4	27feb2010, 20:00	5,81
Junction-6	489,306	47,9	27feb2010, 16:00	6,08
outlet	1269,763	83,4	27feb2010, 23:00	4,98
outlet2	1274,127	82,9	28feb2010, 00:00	4,97
Reach-1	1156,947	79,6	27feb2010, 23:00	5,04
Reach-2	365,776	20,2	27feb2010, 22:00	4,27
Reach-3	577,048	51,3	27feb2010, 23:00	5,80
Reach-4	249,786	16,6	27feb2010, 17:00	4,35
Reach-5	489,306	47,6	27feb2010, 20:00	6,07
Reach-6	1269,763	82,9	28feb2010, 00:00	4,97
Reach-7	143,016	16,5	27feb2010, 17:00	6,10
Subbasin-1	57,947	4,8	27feb2010, 15:00	4,37
Subbasin-10	133,708	9,2	27feb2010, 16:00	4,36
Subbasin-11	81,322	4,9	27feb2010, 16:00	4,33
Subbasin-12	201,080	17,4	27feb2010, 16:00	6,06
Subbasin-13	145,210	15,1	27feb2010, 15:00	6,10
Subbasin-14	82,400	8,6	27feb2010, 15:00	6,10
Subbasin-15	60,616	8,3	27feb2010, 13:00	6,10
Subbasin-2	4,364	1,1	27feb2010, 10:00	4,37

Los resultados de todos los elementos obtenidos con estos dos modelos, se presentan en el anexo C.

### 3.6 PRESENTACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y COMPARACION ENTRE ELLOS

Tabla 12. Tabla resumen de resultados

<b>TIPO MODELO</b>	<b>Q<sub>PICO</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>V<sub>ESCORRENTIA</sub> (mm)</b>
Modelo puntual con información de 1 estación de registro.	83.4	4.98
Modelo puntual con información de 15 estaciones de registro.	144.4	9.58
Modelo distribuido 2000x2000	167.5	10.20

## **4. PRESUPUESTO NECESARIO PARA LA POSIBLE IMPLEMENTACIÓN DE UN RADAR (LAWR) EN EL DEPARTAMENTO DE SANTANDER**

Este capítulo se centra principalmente en el estudio de un tipo de radar meteorológico (radar LAWR) como punto de referencia; al cual se le puede observar sus características particulares y costos de uso e instalación, y así determinar su posible implementación de acuerdo a un análisis de presupuesto que compare costos de estaciones meteorológicas existentes afectadas por la futura implementación de dicho radar.

Con esto se trata de mostrar algunas de las diferencias que se originan entre las utilización de pluviógrafos, pluviómetros, etc.... y la implementación del radar determinando la relación beneficio-costos que conllevaría al uso de éste.

### **4.1 PRINCIPIO DEL RADAR METEOROLOGICO LAWR (LOCAL AREA WEATHER RADAR)**

El radar meteorológico LAWR es un radar de tiempo corto para detectar la variación espacial de las precipitaciones locales. Es útil para proporcionar pronósticos de lluvia con pocas horas de aviso y una lluvia de datos de alta resolución.

Las mediciones de radar pueden presentarse como series de tiempo de las lluvias para cuencas específicas como imágenes gráficas de la cobertura radar total. Ésta información se puede transmitir a la web en tiempo real.

Los radares meteorológicos de DHI también se pueden combinar con sus modelos de drenaje urbano y proporcionar así una parte integral de la información urbana y sistema de gestión de las inundaciones.

El LAWR ha estado disponible comercialmente desde el año 2000, y DHI continúa mejorando el hardware y el software del sistema LAWR. En la actualidad 22 LAWR radares se han instalado o están en proceso de instalación en todo el mundo.

#### **4.2 CÓMO FUNCIONA EL RADAR LAWR**

El LAWR es un radar meteorológico basado en la tecnología de banda X. El LAWR proporciona alta calidad de imágenes de radar de la lluvia sobre una superficie de hasta 11.300 kilómetros cuadrados (60 km de distancia) cada 5 minutos (o 1 minuto).

En la operación normal del radar LAWR funcionará con un radio de cobertura de 60 km para la alerta de lluvia y hasta 30 km de radio para las mediciones de las precipitaciones. El alcance real en una dirección dada puede variar dependiendo de la situación de desorden en esta dirección

El LAWR se basa en un tipo de radar marino estándar diseñado para el funcionamiento 24 horas al día y 7 días a la semana, en condiciones duras. El procesamiento de la señal está a cargo de dos PC estándar y un diseño especial, conversor AD.

El uso de componentes estándar hace que la instalación del LAWR sea de un costo bajo en comparación a las tradicionales instalaciones de radar meteorológicos.

El LAWR se puede montar en un tejado o un mástil existente, ya que un permiso de transmisión es generalmente fácil de obtener, este rango de frecuencia es normalmente reservado para los buques.

### 4.3 RANGO Y PRECISIÓN

Uno de los parámetros más importantes del sistema de previsión es el conocimiento oportuno sobre el número y la distribución de la precipitación en la cuenca. Con la introducción del LAWR ahora es posible obtener esta información con un tiempo de resolución de 5 minutos y una resolución espacial de 500 por 500 m por debajo de 100 por 100 m. La alta resolución de 100 por 100 m se puede obtener hasta una distancia máxima de 6 a 10 km del radar (esto es cierto para cualquier radar meteorológico que tiene un ancho de haz horizontal de un grado, ya que la anchura de la viga superior a 100 m en una distancia de 5,7 km del radar).

Aunque el radar LAWR emite solo un décimo (25 Kw) de la potencia (Pt) emitida por los radares meteorológicos convencionales (250 Kw) es capaz (dentro de este rango operación, 60 km de radio) de penetrar en las precipitaciones de alta intensidad.

Esto es posible debido a que el volumen escaneado del LAWR es más grande que el de un radar meteorológico convencional. Además, la longitud de onda es más corta, de 3 cm (banda X), en comparación a 5 cm para los radares de banda C y 10 cm para los radares de banda S. En este opera la ganancia de la antena, que es más pequeño (15-20 dB) de la antena guía de ondas utilizadas por los LAWR en comparación con el de los radares meteorológicos convencionales (30-45 dB).

La combinación del LAWR con puntos de información de precipitación medida y con pluviómetros, proporciona la mejor base posible para la predicción de crecidas.

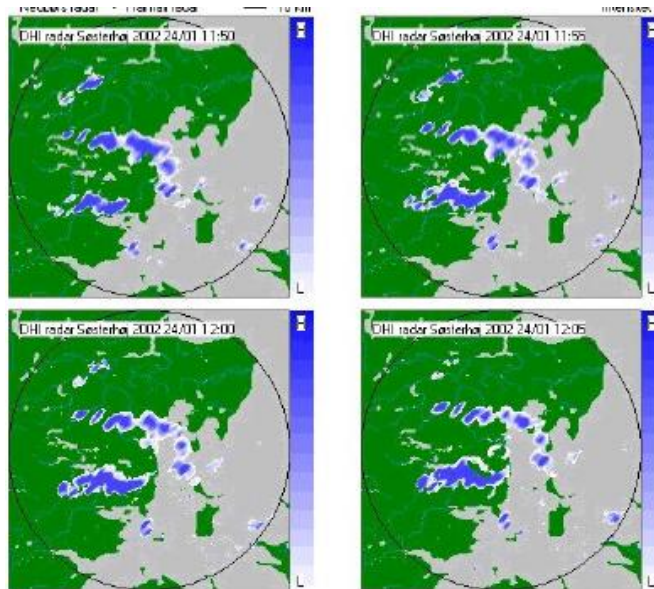
Dada la naturaleza de las precipitaciones y su medición, es muy difícil estimar la precisión. No es posible comparar las estimaciones de lluvia a partir de imágenes

de radar con la precipitación se mide convencionalmente, ya que éste sólo cubre un área muy pequeña (unos pocos  $\text{cm}^2$ ) en contra de la zona de radar de 250.000  $\text{m}^2$  o más por "medidor de lluvia". Por esta razón, es casi imposible establecer la "verdad" y, en consecuencia, la estimación de la precisión del radar. Nuevas mediciones (en Dinamarca) han mostrado variaciones locales muy grandes en las precipitaciones (hasta 100% sobre una distancia de 200 m para un evento de cuatro días de lluvia). De nuevo, esto explica algunas de las dificultades relacionadas con el proceso de calibración.

#### 4.4 SOFTWARE DE APOYO

La instalación LAWR incluye el software de tratamiento previo para el ruido y la eliminación del alboroto. Crea imágenes JPG con un mapa de fondo seleccionable por el usuario y este mismo define la escala de color. Un módulo web se incluye para la presentación sencilla de imágenes en Internet, tanto como una presentación de 4 imágenes y 1 hora de animación GIF

Figura 108. Presentación gráfica de precipitación observada con un LAWR.



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

Un número de paquetes de software de interfaz están disponibles para la integración del LAWR con otros productos de software de DHI: DIMS, MOUSE, MIKE URBAN, MIKE11, MIKE 11 FF / FLOODWATCH, WATBAL and MIKE-SHE.

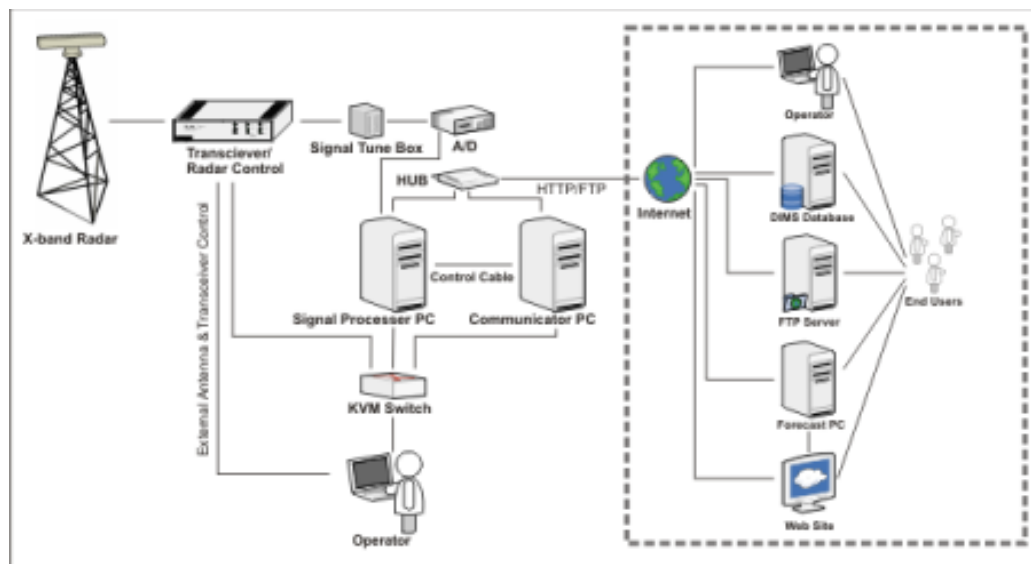
Un servidor COM para la extracción de datos a los programas externos (software) está también incluido en el suministro.

#### 4.5 EQUIPO DEL RADAR LAWR- HADWARE

El radar LAWR se basa en un estándar del radar marino estándar, FR1525 tipo de Furuno diseñado para funcionamiento en condiciones muy duras. El procesamiento de la señal está a cargo de dos PC estándar para el procesamiento de datos y almacenamiento de datos radar y un diseño especial de convertidor AD.

La estructura del sistema de radar se ilustra en la figura 109.

Figura 109. Esquema de la estructura del sistema del radar LAWR.



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

El radar está conectado a Internet que permite operar el sistema por control remoto desde cualquier parte del mundo y ganar acceso a los datos. Además, el software necesario para la transmisión de los datos de radar en fácil acceso en la web. Ejemplos de esto pueden verse en [www.regn.dk](http://www.regn.dk).

Los componentes de un radar LAWR incluye lo siguiente:

- Antena de radar
- 2 ordenadores para procesamiento de señales, almacenamiento y comunicaciones
- Los cables necesarios, el centro y los interruptores
- Software para el procesamiento de señales y la extracción de datos (objeto COM)
- Asistencia en el lugar de instalación

Los dos equipos, el monitor de radar y otros equipos están montados en un armario. Un ejemplo de la caja se muestra a continuación - el diseño exacto depende de la exigencia de la versión y el usuario, por ejemplo, en algunas instalaciones el PC para el control y pantalla se coloca dentro del gabinete figura 110.

Figura 110. Gabinete donde se almacena los datos en 2 PC del radar LAWR.



Fuente: <http://radar.dhigroup.com> <http://radar.dhigroup.com>

Ahora un ejemplo de la unidad de la antena del radar LAWR se muestra en la figura 111 la cual cuenta con una envergadura del haz es de 2,4 metros de largo (8 pies).

Figura 111: Antena del radar LAWR



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>.

#### 4.5.1 Especificaciones Técnicas

Tabla 13. Especificaciones técnicas

Frecuencia [MHz]	9410 ± 30 MHz
Potencia de salida [Kw]	25
Máximo de la gama [km]	60 kilómetros
Rejilla de resolución (tamaño de píxel) [metros]	500x500 (60 km de distancia) 250x250 (30 km de distancia) 300x300 (15 km de distancia) 100x100 (15 km de distancia)
Imagen de frecuencia [minutos]	1 ó 5

Antena-guía de onda ranurada [m]	2.44
Ancho de haz horizontal (BWH)	0,95 °
Ancho del haz vertical (BWV) (Medido desde la horizontal)	± 10 °
Velocidad de rotación [rpm]	24
El consumo de energía [kWh / año]	5700

El Radar Meteorológico de área local LAWR se puede montar en un tejado o un mástil existente, ya que un permiso de transmisión es generalmente fácil de obtener, además que el rango de frecuencia es normalmente reservado para los buques.

El LAWR es fabricado y vendido por DHI que es una consultora independiente, internacional y de investigación con 640 empleados con sede en 19 países en todo el mundo.

Los costos totales excl. IVA / Impuestos comienza de 102.000 euros o unos \$234`600.000 de pesos colombianos.

#### 4.6 ¿QUIÉN PUEDE BENEFICIARSE DE UNA INSTALACIÓN LAWR?

- Organizaciones de gestión del agua - *optimización de la conservación del agua a base de agua de lluvia*
- Residuos autoridades del agua - *diseño y análisis debido a la entrada de datos mejorada para los modelos de mejoras*
- De aguas residuales operadores de plantas de tratamiento - *pronóstico detallado da tiempo de preparación*
- Municipios y otras autoridades oficiales - *registros detallados de los diseños futura instalación*
- Los agricultores - *información detallada sobre las precipitaciones en forma de*

*campo individuales para el uso en fumigación, riego, etc.*

- Servicios meteorológicos - *relleno de espacios y la observación de los fenómenos de baja altitud*
- Autoridades de carreteras - *aumento de capacidades de alerta para los tramos expuestos de carreteras*
- Autoridades en prevención de desastres naturales - *pronóstico detallado de las precipitaciones se proporciona información sobre las áreas a priorizar.*
- Cualquiera que trabaja con temas relacionados con las lluvias

## **4.7 APLICACIONES HIDROLOGÍA URBANA**

La mayor incertidumbre al modelar la respuesta de las lluvias en los sistemas de drenaje es la lluvia. El método estándar es el uso de las precipitaciones medidas como un indicador de entrada. De esta manera se daba por supuesto que la precipitación es homogénea en toda el área del modelo que puede ser tan grande como toda una ciudad. Este supuesto puede tener validez si se analiza un período largo de tiempo, se considera (varios meses), en cambio, si el impacto de los acontecimientos que solo se va a analizar es de corta duración, esto no es válido. Para facilitar esta cuestión DHI ha desarrollado el radar meteorológico de área local (LAWR) para dar cabida a la solicitud de datos de entrada mejor de los modelos hidrológicos.

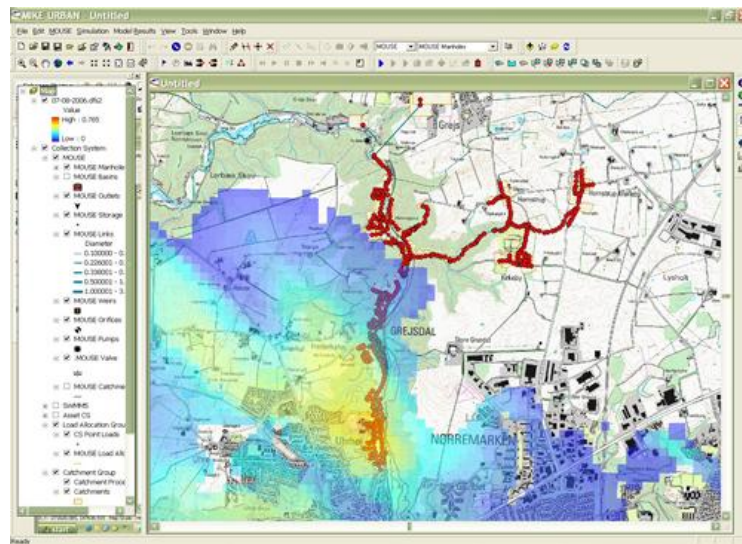
### **4.7.1 LAWR: Opciones de hidrología urbana**

- Distribuido mediciones de lluvia en una resolución espacial que van desde 500x500 a 100x100 m, con un 5 minutos o 1 minuto el tiempo de resolución de hasta 30 km del radar
- En línea de animación de la lluvia dentro de la gama completa LAWR (60 km [37.3 millas] ~ 11.300 kilómetros cuadrados [4365 millas cuadradas])
- Hasta el pronóstico de unas horas (en línea) de los próximos eventos de lluvia

para su uso en la optimización de alcantarillado y la capacidad de la planta de tratamiento con la posibilidad de alertas SMS para teléfonos móvil

- Totalmente integrado con Mike Urbano (2007 release). Mike Urbana facilita la importación de datos LAWR, la visualización del evento sobre el modelo y sus cuencas de captación y la simulación con la precipitación totalmente distribuido
- Datos LAWR con el apoyo de la suite de software completa DHI
- Software para la presentación en línea de los datos de radar en la web.

Figura 112. Evento de lluvia simulada en Mike urbano para un sistema de drenaje



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

**4.7.1.1 Mayor facilidad de uso.** La imagen de la figura 115 muestra un evento de lluvia importados a Mike Urbano. Se ilustra un problema clásico - sólo una parte del sistema de drenaje está recibiendo la lluvia. Si un usuario quiere analizar un evento basado en un indicador de varios kilómetros de distancia sólo sería un resultado muy pobre.

Los datos del radar LAWR proporcionan al usuario toda una gama de nuevas oportunidades. Es posible ver el movimiento de eventos y la evolución con el sistema de drenaje.

#### 4.8 ALGUNOS RADARES LAWR INSTALADOS EN EL MUNDO

- **LOCALIZACIÓN:** Horn Reefs, Dinamarca 2010
- **TIPO DE PROYECTO:** Medición cuantitativa de la precipitación para investigación de previsión del viento combinada con seguimiento de aves.

Figura 113. Radar LAWR de Horn Reefs



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Egedal, Dinamarca 2009
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar municipal de precipitación para suministro de medición de la lluvia en aplicaciones de tiempo real.

Figura 114: Radar LAWR de Egedal



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Aarhus, Dinamarca 2008
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar municipal de precipitación para suministro de medición de la lluvia en aplicaciones de tiempo real.

Figura 115. Radar LAWR de Aarhus



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Klein Matterhorn, Suiza, 2007
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar meteorológico de investigación.

Figura 116. Radar LAWR de Klein Matterhorn



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Belgrado, Serbia, 2007
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar meteorológico.

Figura 117. Radar LAWR de Belgrade



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Omega, Oklahoma, USA, 2006
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar meteorológico de investigación.

Figura 118. Radar LAWR de Omega



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Dortmund, Alemania, 2006
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar de investigación de alerta de lluvia de granizo.

Figura 119. Radar LAWR de Dortmund



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Gandía, España, 2006
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar de precipitación municipal/ radar meteorológico.

Figura 120. Radar LAWR de Gandía



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Vejle, Dinamarca, 2005
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar de precipitación municipal/ radar meteorológico de servicio que usa internet (RADAR-NET)

Figura 121. Radar LAWR de Vejle



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Toenda, Goondiwindi, aprox. 500 km al oeste de Brisbane, Australia-2004.
- **TIPO DE PROYECTO:** Radar meteorológico para uso agrícola.

Figura 122. Radar LAWR de Toenda



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Monte Cerro de Consuelo (3140 m), Ecuador, 2002
- **TIPO DE PROYECTO:** De investigación, proyecto PREDICT

Figura 123. Radar LAWR de Monte Cerro de Consuelo



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

- **LOCALIZACIÓN:** Génova, Italia, 2003
- **TIPO DE PROYECTO:** Predicción de Inundaciones Urbanas (Control de sistema de drenaje)

Figura 124. Radar LAWR de Génova



Fuente: <http://radar.dhigroup.com>

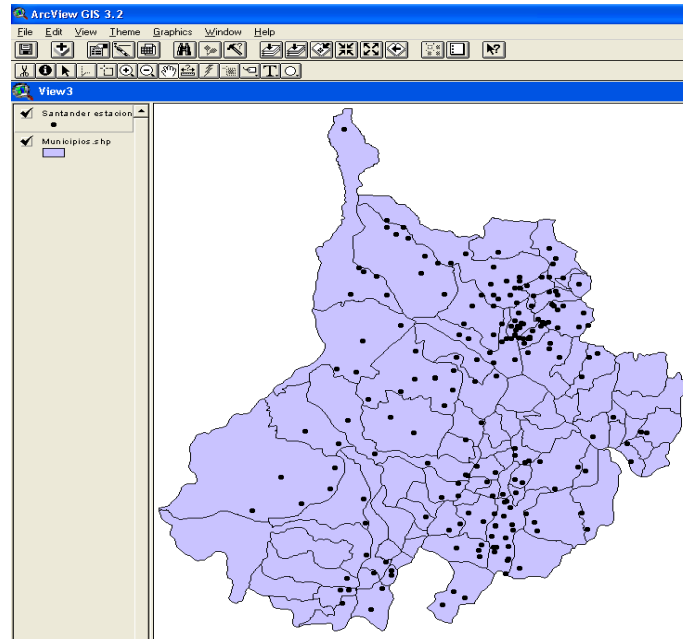
#### **4.9 ZONAS DE COBERTURA DEL RADAR LAWR SOBRE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE SANTANDER MEDIANTE ARCVIEW GIS 3.2.**

Mediante el manejo de la herramienta Arcview gis 3.2 el cual es un software de información geográfica (sig. o gis por sus siglas en ingles) que permite la visualización, exploración, consulta y análisis de datos geográficos, implementando el manejo de la información espacial con datos alfanuméricos en una manera amigable se puede determinar cuál es la zona de cobertura de operación del radar y además establecer la ubicación geográfica de los diversas estaciones meteorológicas presentes en el territorio santandereano.

Del sitio web del IDEAM se obtuvo el catalogo nacional de estaciones meteorológicas del cual se clasifico la información estaciones meteorológicas basándose en todas las estaciones meteorológicas presentes en Santander. Una vez se tiene esta información (tablas anexas) se crea mediante la ayuda de Excel un archivo en formato .txt de las estaciones con su ubicación geográfica en coordenadas planas, luego este es exportado a Arcview, visualizándose una

imagen de nubes de puntos donde cada punto representa una estación meteorológica sobre el mapa de Santander (ver figura 125).

Figura 125. Representación de las estaciones meteorológicas de Santander



Fuente: Proceso en Arcview 3.2. Autor.

Ahora se pretende ubicar tres de los radares tipo x (LAWR) teniendo en cuenta la topografía de Santander ya que estos deberán estar ubicados a una altura considerable para que a la hora de obtener las lecturas las montañas y otras formaciones rocosa no interfieran con el haz de lectura del radar, es por esto que se considera ubicarlos en tres diferentes puntos estratégicos dentro de la geografía departamental.

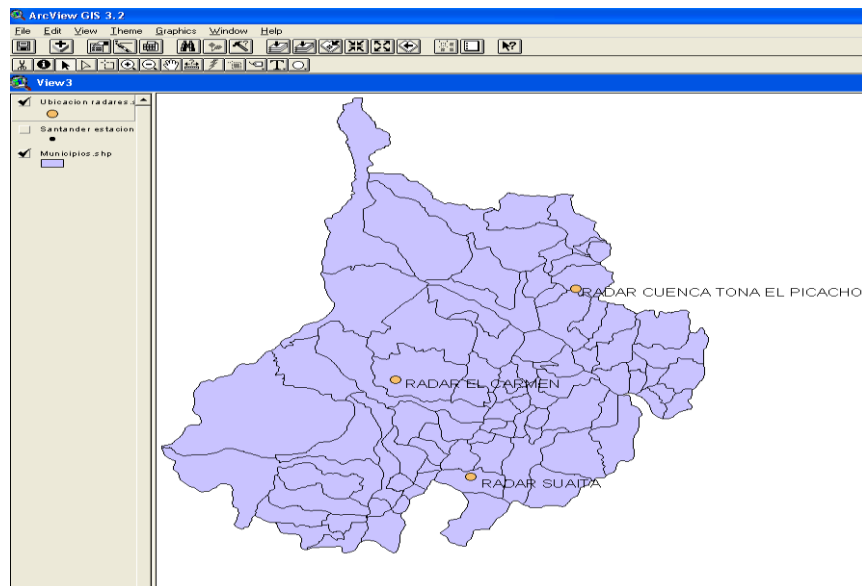
## Ubicación geográfica de los radares

Tabla 14. Ubicación geográfica de radares

RADAR	NORTE	ESTE	NOMBRE RADAR
1	1167534	1079341	Radar Suita
2	1224942	1048267	Radar El Carmen
3	1278565	1123101	Radar cuenca Toná (El Picacho)

Se crea también un archivo en formato .txt de la ubicación de los radares, el cual será exportado y convertido como tema en Arcview. (Figura 126).

Figura 126. Representación de las posiciones geográficas de los radares de Santander

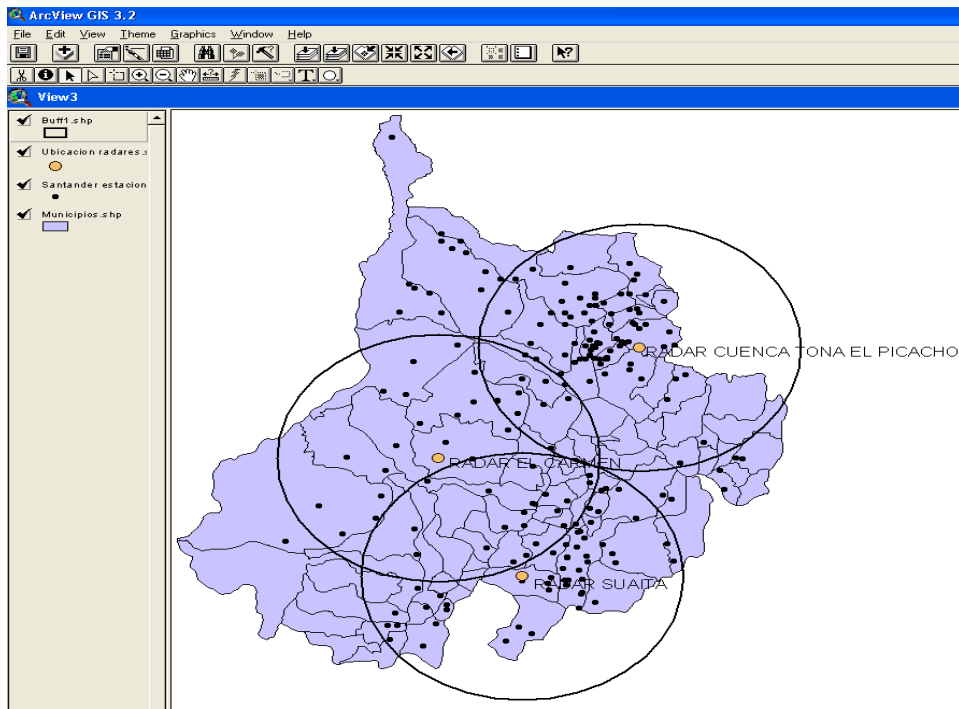


Fuente: Proceso en Arcview 3.2. Autor.

Como se estudió anteriormente uno de los atributos en particular del radar (LAWR), es que su rango de lectura es de 60 km de radio, sé procede entonces en el mismo Arcview a crear buffer con radios de 60 km a partir de los puntos de

ubicación de esto para establecer cuantas estaciones se ven afectadas por la cobertura de la lectura del los radares (figura 127).

Figura 127. Representación de las áreas de cobertura del radar



Fuente: Proceso en Arcview 3.2. Autor

Creados estos buffers se determina que los radares afectan a solo 203 estaciones meteorológicas en Santander entre estaciones pluviométricas (Pm), pluviograficas (Pg.), climatológicas principales (Cp.), climatológicas secundarias (Cs), entre otras.

#### 4.10 COMPARACIÓN DE COSTOS ENTRE ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y EL RADAR (LAWR)

Una vez se tienen identificadas las estaciones meteorológicas afectadas por el radar se determina los costos de implementación, operación, mantenimiento y de lecturas de instrumentos en estos.

## Costos totales de estaciones meteorológicas

Tabla 15. Costos de estaciones meteorológicas por categoría.

<u>ABREV.</u>	<u>CATEGORIA</u>	<u>\$</u> <u>(VALOR)</u>	<u>CANTIDAD</u>
<b>PG</b>	PLUVIOGRAFICA	1791500	16
<b>PM</b>	PLUVIMETRICA	187800	146
<b>CO</b>	CLIMATOLOGICA ORDINARIA	1074200	27
<b>CP</b>	CLIMATOLOGICA PRIMARIA	1200000	12
<b>SP</b>	SIPNOTICA PRINCIPAL	2952900	2
		<b>TOTAL</b>	<b>203</b>

<i>Vida útil de estaciones (años).</i>	30
<i>Vida útil radar lawr (años).</i>	50

Tabla 16. Características del radar vs. Estaciones meteorológicas.

<i>mantenimiento estaciones ( 1 año)</i>	\$ 450.000,00
<i>mantenimiento radar (4 años)</i>	\$ 2.500.000,00

Valor lecturas mensuales de estaciones meteorológicas \$48.000 pesos colombianos incluido transporte.

Asumiendo un incremento anual en los precios de mantenimiento del 15% y un interés efectivo anual de 12%.

Tabla 17. Interés efectivo anual e incremento anual en los costos de mantenimiento

<b>Valor lectura</b>	48.000
<b>Interés efectivo anual</b>	0,12
<b><math>\Delta_{pm}</math></b>	0,15

### Costos totales de las lecturas durante la vida útil de las estaciones.

Con

$$F = P(1 + i)^n$$

Reemplazando en la ecuación:

$$\text{Costo total lec} = 48000 * (1 + 0.12)^{30}$$

$$\text{Costo total lec} = \$ 1438077$$

Este costo es por cada estación.

$$\text{Costo total lec todas las estaciones} = 203 * 1438077$$

$$\text{Costo total lec todas las estaciones} = \$ 291'929.482$$

### Costos primer mantenimiento de estaciones

Con

$$F = P(1 + i)^n$$

Reemplazando en la ecuación:

$$P_{me} = 450000 * (1 + 0.15)^1$$

$$P_{me} = \$ 517500$$

Ahora con:

Tabla 18. Interés efectivo anual.

$\Delta_{1año}$	0,15
$i_{1año}$	0,12

Se determina el costo anual equivalente de todas las estaciones meteorológicas:

$$\begin{aligned}
 & \text{costo}_{anualequi} \\
 &= N_{epg} \left( P_{pg} + P_{me} \left( \frac{P}{C\Delta} (\Delta_{1año} = 0.15, n = 30, i_{1año} = 0.12) \right) \right) \\
 &+ N_{epm} \left( P_{pm} + P_{me} \left( \frac{P}{C\Delta} (\Delta_{1año} = 0.15, n = 30, i_{1año} = 0.12) \right) \right) \\
 &+ N_{eco} \left( P_{co} + P_{me} \left( \frac{P}{C\Delta} (\Delta_{1año} = 0.15, n = 30, i_{1año} = 0.12) \right) \right) \\
 &+ N_{ecp} \left( P_{cp} + P_{me} \left( \frac{P}{C\Delta} (\Delta_{1año} = 0.15, n = 30, i_{1año} = 0.12) \right) \right) \\
 &+ N_{esp} \left( P + P_{me} \left( \frac{P}{C\Delta} (\Delta_{1año} = 0.15, n = 30, i_{1año} = 0.12) \right) \right)
 \end{aligned}$$

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$costo_{anualequi}$$

$$\begin{aligned}
 &= 16 \left( 1791500 + \frac{517500}{1 + 0.15} * \frac{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30} - 1}{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15} - 1\right)\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30}} \right) \\
 &+ 146 \left( 187800 + \frac{517500}{1 + 0.15} * \frac{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30} - 1}{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15} - 1\right)\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30}} \right) \\
 &+ 27 \left( 1074200 + \frac{517500}{1 + 0.15} * \frac{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30} - 1}{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15} - 1\right)\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30}} \right) \\
 &+ 12 \left( 1200000 + \frac{517500}{1 + 0.15} * \frac{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30} - 1}{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15} - 1\right)\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30}} \right) \\
 &+ 2 \left( 2952900 + \frac{517500}{1 + 0.15} * \frac{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30} - 1}{\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15} - 1\right)\left(\frac{1 + 0.12}{1 + 0.15}\right)^{30}} \right)
 \end{aligned}$$

$$costo_{anualequi} = \$972'924.130,5$$

Inversión total en estaciones meteorológicas durante su vida útil.

$$inversion\ total_{estac.} = costo_{anualequi} + Costo\ total\ lec\ todas\ las\ estaciones$$

$$inversion\ total_{estac.} = 972'924.130,5 + 291'929.482$$

$$inversion\ total_{estac.} = 1.264'853.612$$

Se pasa toda esta inversión a la época actual y se distribuye a lo largo de la vida útil de las estaciones meteorológicas.

$$VALOR_{total_{estac.}} = inversion_{total_{estac.}} * (A/p, i_{anual} = 0.12, n = 30)$$

$$VALOR_{total_{estac.}} = 1264853612 * \left( \frac{(0.12)(1 + 0.12)^{30}}{(1 + 0.12)^{30} - 1} \right)$$

$$VALOR_{total_{estac.}} = \$ 157'023.553,617$$

**4.10.1 Costos totales de radares meteorológicos.** De acuerdo a lo informado por DHI, el monto total del un solo radar, que incluye el equipo, su instalación y la capacitación para su funcionamiento, asciende a los us\$185,57 dólares o en pesos colombianos \$ 337'637.300. El monto total del sistema de Radares (tres en total), será alrededor de us\$445,000 o \$809'660.000 moneda colombiana.

#### 4.10.2 Costos primer mantenimiento de radares

Con:

$$\Delta_{4 \text{ años}} = (1 + \Delta_{pm})^n - 1$$

$$\Delta_{4 \text{ años}} = (1 + 0.15)^4 - 1$$

$$\Delta_{4 \text{ años}} = 0.749006.$$

y

$$i_{4 \text{ años}} = (1 + ie)^n - 1$$

$$i_{4 \text{ años}} = (1 + 0.12)^4 - 1$$

$$i_{4 \text{ años}} = 0.573519$$

Ahora se determina el costo del primer mantenimiento.

$$F = P(1 + i)^n$$

$$P_{mr} = 2500000 * (1 + 0.15)^4$$

$$P_{mr} = \$ 4'372.515,625$$

Se determina el costo anual equivalente para los tres radares.

$$costo_{anua\ equ} = \left( P_{3\ radar} + P_{mr} \left( P/C\Delta (\Delta_{4año} = 0.74901, n = 12.5, i_{4año} = 0.573) \right) \right)$$

$$costo_{anua\ equ} = \left( 809660000 + \frac{4372515.625}{1 + 0.74901} * \frac{\left( \frac{1 + 0.573}{1 + 0.74901} \right)^{12.5} - 1}{\left( \frac{1 + 0.573}{1 + 0.74901} - 1 \right) \left( \frac{1 + 0.573}{1 + 0.74901} \right)^{12.5}} \right)$$

$$costo_{anua\ equ} = \$ 814'532.845$$

Este costo se pasa a la época actual y se distribuye a lo largo de la vida útil de los radares.

$$COSTO_{total\ RADARES.} = costo_{anua\ equ} * (A/P, i_{anual} = 0.12, n = 50)$$

$$COSTO_{total\ RADARES.} = 814532845 * \left( \frac{(0.12)(1 + 0.12)^{50}}{(1 + 0.12)^{50} - 1} \right)$$

$$COSTO_{total\ RADARES.} = \$ 98.083.324,44$$

#### 4.10.3 Determinación de la relación beneficio –costo de la implementación de los radares meteorológicos

$$Rel\ BENEFICIO/COSTO = VALOR_{total\ estac.} / COSTO_{total\ RADARES.}$$

$$Rel\ \frac{BENEFICIO}{COSTO} = \frac{\$ 157'023.553,617}{\$ 98.083.324,44}$$

$$Rel\ \frac{BENEFICIO}{COSTO} = 1.60$$

Con esta relación que es superior a la unidad se determina que la compra e implementación de este tipo de radar banda x como lo es el radar meteorológico LAWR es viable para la implementación y posteriores estudios de eventos meteorológicos en Santander sin contar con el valor agregado que éste aporta para las diferentes entidades y corporaciones a las cuales su uso es de ahora en adelante indispensable.

## CONCLUSIONES

- El radar meteorológico es una herramienta novedosa que se puede considerar de gran utilidad ya que por sus diferentes funciones y ventajas ofrecidas puede contribuir a la investigación de proyectos de gran escala en nuestro país
- La posible implementación del radar señala que este debe situarse en una zona alta para que la señal no se vea afectada por interferencia de diferentes elementos u obstáculo externos que lo puedan provocar además de los ecos terrestres.
- Los datos arrojados por el radar meteorológico, después de un cauteloso proceso, son una información que a corto plazo puede llegar a emitir alertas de posibles sucesos ya que son un instrumento básico para la vigilancia y previsión.
- Como en otros países, el radar meteorológico se considera como herramienta de urgencia nacional, por tanto su implementación requiere de una rápida actuación por las entidades interesadas en este proyecto como lo son el IDEAM, la Corporación de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y otras entidades a nivel nacional.
- Un análisis preliminar estima que con una red de 8 radares Doppler banda S y 3 radares banda C se cubriría todo el territorio nacional, sin embargo su costo sería demasiado elevado para la implementación. .
- Esta herramienta (radar), tendrá un seguimiento de los eventos de precipitación 24 horas al día, 7 días a la semana, los 365 del año, este monitoreo permite tener una visión más precisa de los fenómenos naturales y anticipar medidas de prevención contra los efectos e impactos negativos de los fenómenos.

- El LAWR es la herramienta con mayor factibilidad para ser implementada en nuestra región debido a su fácil manejo, bajo costo de instalación, mantenimiento y operación, además del sinnúmero de ventajas ofrecidas.
- El radar meteorológico es un sistema de comportamiento simple que permite ser operado a muy bajo costo
- Los registros proporcionados por los radares presentan imágenes de precipitación con mayor resolución que las presentadas por una estación meteorológica.
- La información mostrada por el radar se podrá encontrar en la web casi en tiempo real y se proporciona de forma gratuita.
- La modelación hidrológica de las cuencas hidrográficas permite realizar pronósticos de las posibles afectaciones de una zona debido a la ocurrencia de lluvias extremas máximas, es por ello que estudios de este tipo toman auge y se ven complementados con herramientas informáticas de última generación como son los casos de los SIG y de los modelos de simulación hidrológica como el software Hec-HMS por ejemplo.
- En la comparación de los modelos estudiados (distribuido y puntual), el caudal pico de modelo puntual del caso 1 (con información de 1 estación de registro) es del 34% del caudal pico del modelo distribuido y el caudal pico en el caso 2, corresponde al 40% del mismo. Los resultados son completamente distintos para ambas modelaciones. Una de las causas que provocan estas discrepancias entre resultados es la diferencia entre los volúmenes de precipitación bruta caídos sobre la cuenca, para los distintos casos.
- Se comprobó en la simulación que el comportamiento y las características del

suelo son factores determinantes para estimar la precipitación efectiva y que el conocimiento de la distribución espacial de la precipitación es de suma importancia en la modelación porque reducen la incertidumbre de los resultados.

- Se puede plantear que el programa Hec-HMS es bastante versátil y ofrece un buen número de posibilidades para la solución de problemas de hidrología. Es muy útil en la etapa de planeamiento sobre todo porque permite predecir la respuesta hidrológica de la cuenca a partir de modificaciones en la misma. Sin embargo, para poder emplear el potencial que tiene el programa, se requiere de una buena instrumentación en las cuencas hidrográficas, que permita obtener información suficiente, además de consistente y confiable, de los diferentes parámetros hidrológicos que requiere el modelo.
- Se ha analizado la ventaja de utilizar una modelación hidrológica distribuida frente a una modelación clásica con subcuencas discretas, que es la metodología que se utiliza generalmente en la actualidad.
- Se han estudiado las herramientas necesarias para llevar a cabo estos análisis con parámetros espacializados (datos de radar) y las posibilidades de realizarlos.
- La combinación de estos dos elementos (radar meteorológico y estaciones meteorológicas) son de gran utilidad porque muestran de forma determinada y concisa el comportamiento de la lluvia en toda una región, sin temer a la pérdida de información o información errónea en algunos lugares.
- En el caso de modelación distribuida se puede plantear la opción de realizar predicciones de detalle y estudios de reproducción de sucesos pasados.

## BIBLIOGRAFÍA

CAMPILLO DIAZ-PLAZA, Noemí. Tesina D'Especialitat, Utilización de datos de lluvia distribuidos en estudios hidrológicos de inundación. Aplicación con HEC-HMS, Universidad Politécnica de Catalunya, España. 2009.

CAPACHO SILVA, Luis Alberto. “Modelamiento Espacialmente Distribuido de Cuencas Hidrográficas Soportado Sobre SIG”-Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia. 2003.

CHOW, V. T. M., David R.; MAYS, Larry W., (1994), Hidrología aplicada, traducido de la primera edición en inglés de Applied Hydrology, Bogotá, Colombia.

COGOLLO, Julián. “Desarrollo de una base conceptual y aplicación de radares hidro-climáticos en Colombia”. Tesis de Grado, Universidad Nacional de Colombia. 2005.

CORRAL, Carlos. “Desenvolupament d'un model hidrològic per incorporar informació del radar meteorològic. Aplicacio operacional a la conca del riu Besòs”. Tesi Doctoral, Universidad Politecnica de Catalunya. España. 2004.

CORRAL, Carlos; SÁNCHEZ, Rafael. “Curso de postgrado de climatología aplicada: El radar meteorológico y sus aplicaciones hidrológicas”. Universidad Politécnica de Cataluña, España. 2000.

MAIDMENT, D. R., REED, S. M. A GIS Procedure for Merging NEXRAD Precipitation Data and Digital Elevation Models to Determine Rainfall-Runoff Modeling Parameters. Austin, Texas. 1995.

NANÍA, Leonardo; S., GÓMEZ VALENTÍN, Manuel. Calculo de caudales de avenida con Hec-geoHms y SIG, Curso de especialización, Ingeniería Hidrológica. Grupo editorial universitario. Granada, España. 2007.

NCDC JAVA NEXRAD, Project

RAU, Pedro C. Curso: modelos matemáticos de hidrología, Cálculo de caudales de avenida en las subcuencas principales del rio Moquegua. 2009.

REED SM., AND MAIDMENT, DR. AGIS procedure for merging NEXRAD precipitation data and digital elevations models to determinate rainfall-runoff modeling parameters. Departmental Report, Environmental and Water Resources Engineering, University of Texas, Austin- Texas. 1995.

REED SM., AND MAIDMENT, DR.. Coordinate transformations for using NEXRAD data in GIS-Based in hydrologic modeling. Journal of Hydrologic Engineering. 1999.

RODRÍGUEZ LÓPEZ, Yakelin., MARRERO DE LEÓN, Norberto., GIL URRUTIA, Laura. Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Reno. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, Vol. 19., Cuba. 2010.

SMITH, R.E., GOODRICH, D.E., WOOLHISER, D.A., UNKRICH, C.L. Computer models of watershed hydrology. CRC Press. Denver, Colorado. 1995.

US Army Corps of Engineers Center 2000, Hydrologic Modeling System HEC-HMS, manual elemental (version 3) - Traducción del inglés por J. Sanchez, Dpto. Geología-Universidad Salamanca (España). Disponible en internet, URL: <http://www.hec.usace.army.mil/software>

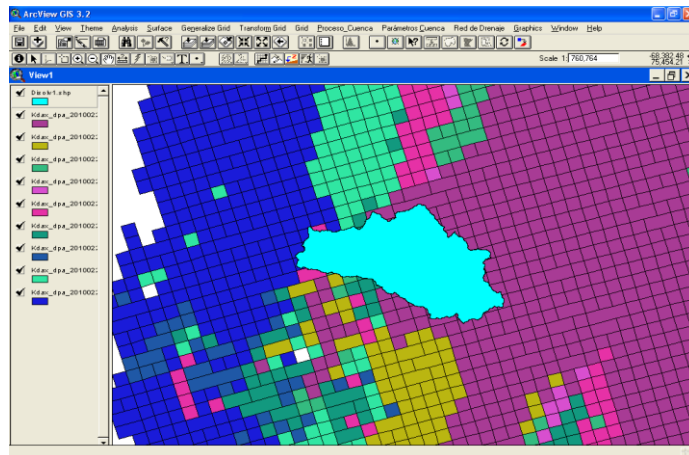
USER'S MANUAL HEC-GEOHMS 1.1 [On-line]. 2003. Disponible en Internet, URL: <http://www.hec.usace.army.mil/software/>

USER'S MANUAL HEC-HMS 3.5.0. [On-line]. 2010. Disponible en Internet, URL: <http://www.hec.usace.army.mil/software/>

## ANEXOS

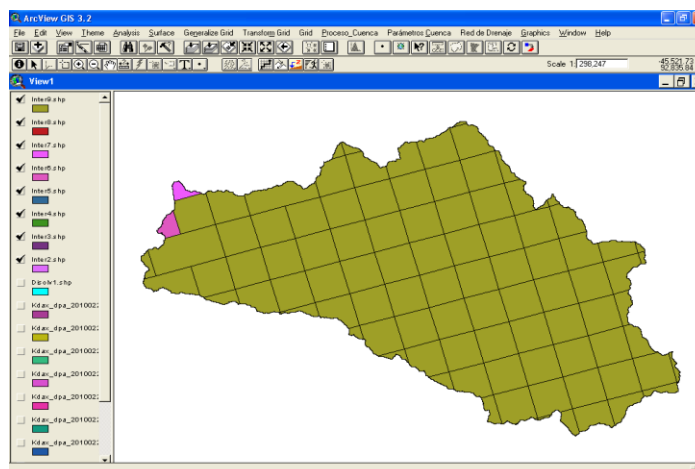
### Anexo A. Malla de precipitación

1. Se agrega en una vista de Arcview, las imágenes de radar descargadas el NOAA, en formato shape y el polígono de la cuenca en estudio.



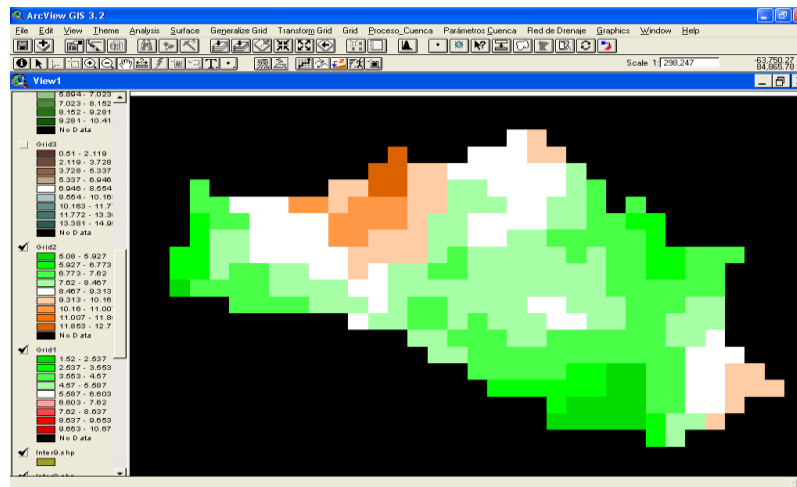
**Figura 1: Superposición de la cuenca americanriver con las imágenes de radar. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.Autor.**

2. Se hace una intersección entre cada una de las imágenes de radar y la cuenca.



**Figura 2: Superposición de la cuenca americanriver con las imágenes de radar. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.Autor.**

3. Se convierte cada una de las intersecciones a grid.



**Figura 3: conversión de la cuenca en una imagen grid. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.Autor.**

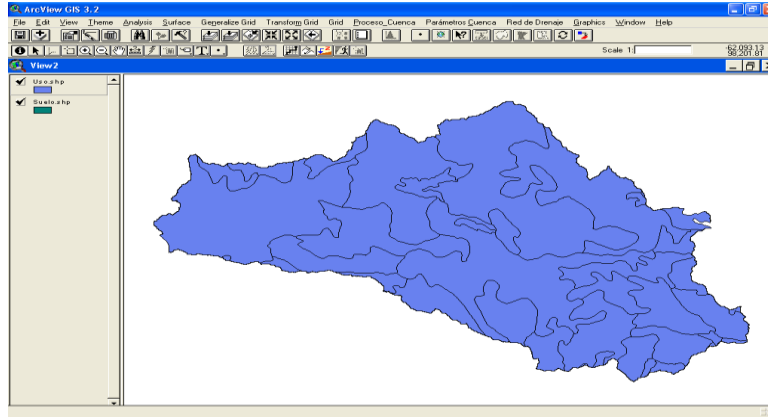
4. Se convierte cada grid a formato ASCII.

#### Malla de Número de Curva:

➤ Para la creación de esta malla, se utilizó una herramienta en Arcview, creada por el Ing. Luis Alberto Capacho en su tesis de maestría “*Modelamiento Espacialmente Distribuido de Cuencas Hidrográficas Soportado Sobre SIG*”- *Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Colombia.*”, para lo cual es indispensable tener:

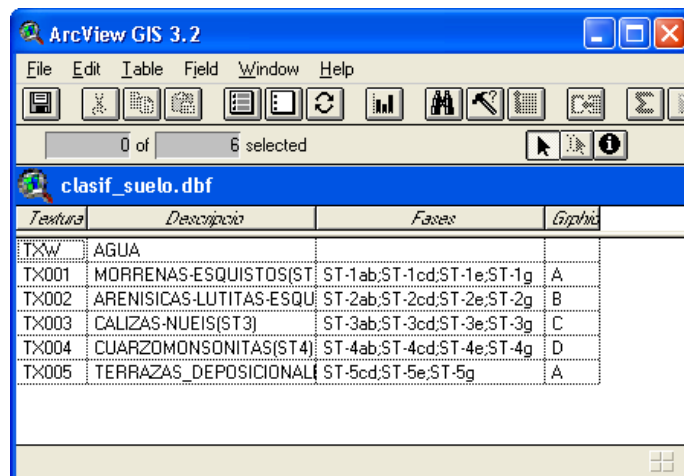
- Mapa de suelos de la cuenca en estudio en formato shape.
- Mapa de usos de la cuenca en estudio en formato shape.
- Tabla de CN

1. Añadir en una vista de Arcview, los temas correspondientes a suelos.shp y uso.shp.



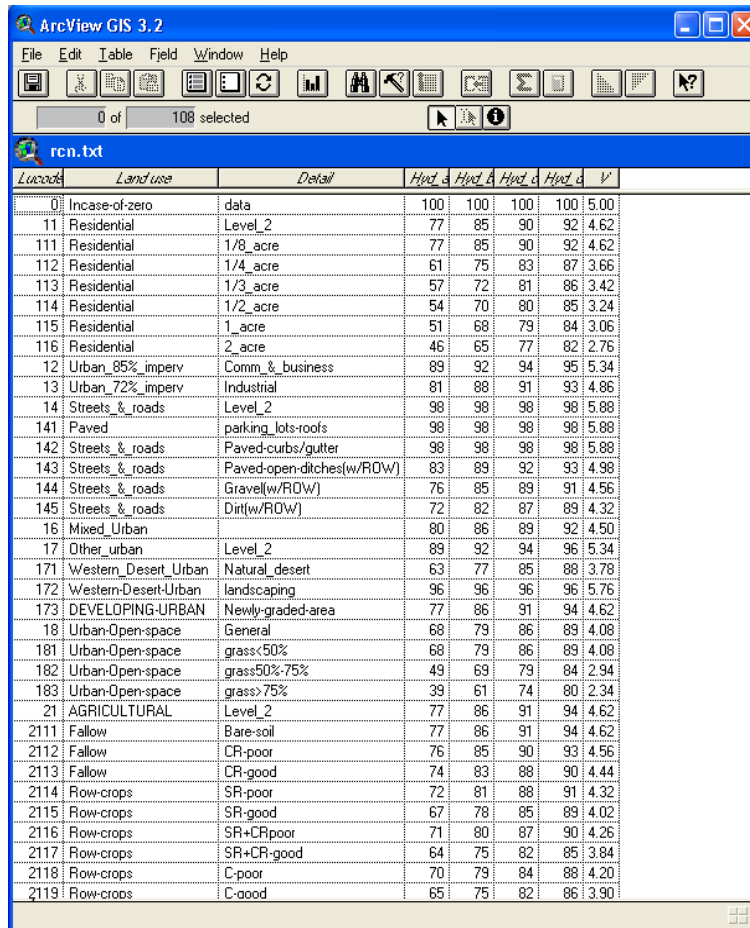
**Figura 4: suelos y uso de la cuenca americanriver. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.Autor.**

2. Añadir las tablas de atributos clasif\_suelo.dbf y rcn.txt



Textura	Descripción	Fases	Grupos
TXW	AGUA		
TX001	MORRENAS-ESQUISTOS(ST	ST-1ab;ST-1cd;ST-1e;ST-1g	A
TX002	ARENISICAS-LUTITAS-ESQU	ST-2ab;ST-2cd;ST-2e;ST-2g	B
TX003	CALIZAS-NUEIS(ST3)	ST-3ab;ST-3cd;ST-3e;ST-3g	C
TX004	CUARZOMONSONITAS(ST4)	ST-4ab;ST-4cd;ST-4e;ST-4g	D
TX005	TERRAZAS_DEPOSICIONAL	ST-5cd;ST-5e;ST-5g	A

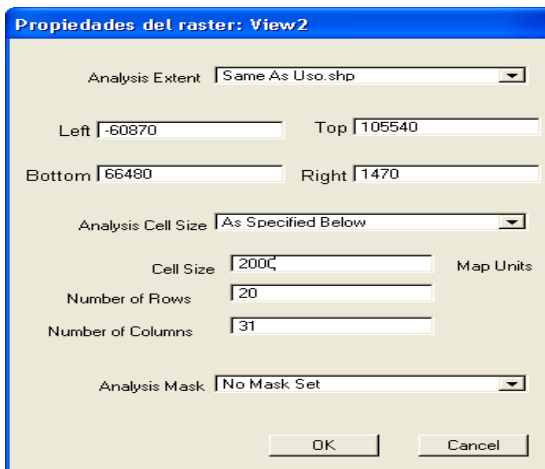
**Figura 5: Tabla atributos clasificación del suelo de la cuenca de estudio. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.Autor.**



Landuse	Detail	Hyd. 1	Hyd. 2	Hyd. 3	Hyd. 4	V	
0	Incase-of-zero	data	100	100	100	100	5.00
11	Residential	Level_2	77	85	90	92	4.62
111	Residential	1/8_acre	77	85	90	92	4.62
112	Residential	1/4_acre	61	75	83	87	3.66
113	Residential	1/3_acre	57	72	81	86	3.42
114	Residential	1/2_acre	54	70	80	85	3.24
115	Residential	1_acre	51	68	79	84	3.06
116	Residential	2_acre	46	65	77	82	2.76
12	Urban_85%_imperv	Comm. & business	89	92	94	95	5.34
13	Urban_72%_imperv	Industrial	81	88	91	93	4.86
14	Streets & roads	Level_2	98	98	98	98	5.88
141	Paved	parking_lots-roofs	98	98	98	98	5.88
142	Streets & roads	Paved-curbs/gutter	98	98	98	98	5.88
143	Streets & roads	Paved-open-ditches(w/ROW)	83	89	92	93	4.98
144	Streets & roads	Gravel(w/ROW)	76	85	89	91	4.56
145	Streets & roads	Dirt(w/ROW)	72	82	87	89	4.32
16	Mixed Urban		80	86	89	92	4.50
17	Other urban	Level_2	89	92	94	96	5.34
171	Western_Desert_Urban	Natural_desert	63	77	85	88	3.78
172	Western-Desert-Urban	landscaping	96	96	96	96	5.76
173	DEVELOPING-URBAN	Newly-graded-area	77	86	91	94	4.62
18	Urban-Open-space	General	68	79	86	89	4.08
181	Urban-Open-space	grass<50%	68	79	86	89	4.08
182	Urban-Open-space	grass50%-75%	49	69	79	84	2.94
183	Urban-Open-space	grass>75%	39	61	74	80	2.34
21	AGRICULTURAL	Level_2	77	86	91	94	4.62
2111	Fallow	Bare-soil	77	86	91	94	4.62
2112	Fallow	CR-poor	76	85	90	93	4.56
2113	Fallow	CR-good	74	83	88	90	4.44
2114	Row-crops	SR-poor	72	81	88	91	4.32
2115	Row-crops	SR-good	67	78	85	89	4.02
2116	Row-crops	SR+CRpoor	71	80	87	90	4.26
2117	Row-crops	SR+CR-good	64	75	82	85	3.84
2118	Row-crops	C-poor	70	79	84	88	4.20
2119	Row-crops	C-good	65	75	82	86	3.90

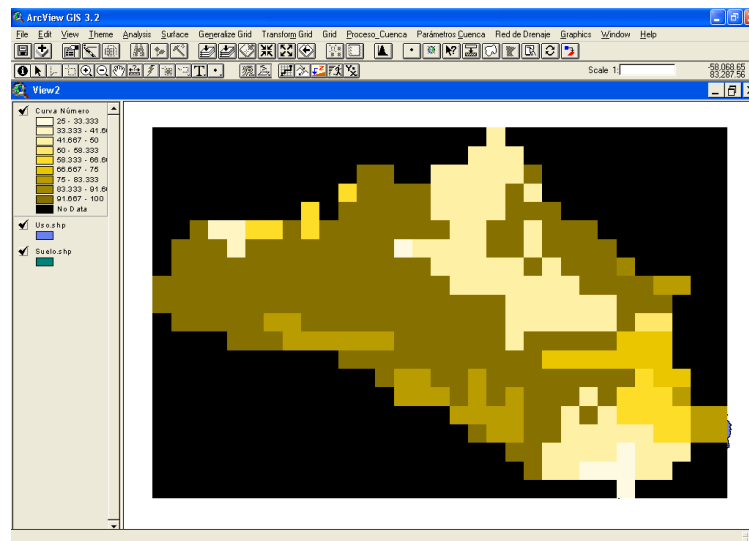
**Figura 6: Parámetros de la cuenca americanriver. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.Autor.**

3. En parámetros cuenca se elige “número de curva” y se introducen todos los datos que se van requiriendo en el proceso



**Figura 7: Propiedades de la cuenca americanriver. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.Autor.**

4. Una vez suministrados todos los datos al programa, el CN se genera automáticamente.



**Figura 8: CN de la cuenca americanriver. Fuente: Modelo en Arcview 3.2.Autor.**

5. Se convierte la grid a formato .ASCII.

## Anexo B. Malla de precipitación en formato .dss

### Conversión de los datos ASCII a .DSS

Para la creación de la malla de precipitación en formato .DSS, hay que disponer de los datos de radar en formato ASCII, para posteriormente ser convertidos al formato .DSS, siendo este el único formato legible por Hec-Hms, en un análisis distribuido, por tal motivo, se debe hacer la conversión, por medio de un ejecutable de asc a dss, asc2dssGrid.exe, este ejecutable se obtiene por petición anticipada al personal del cuerpo de ingenieros de la armada norteamericana. A continuación se describe el proceso de conversión de los datos.

1. Se debe crear un archivo por lotes .bat, que posteriormente será ejecutado en asc2dssGrid.exe. El archivo mencionado, que en este caso se llama "bat", debe contener el siguiente texto:

```
asc2dssGrid          in=xport1.asc          dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0002/27FEB2010:0102/IMPORT/;
asc2dssGrid          in=xport2.asc          dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0102/27FEB2010:0202/IMPORT/;
asc2dssGrid          in=xport3.asc          dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0202/27FEB2010:0302/IMPORT/;
asc2dssGrid          in=xport4.asc          dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0302/27FEB2010:0402/IMPORT/;
asc2dssGrid          in=xport5.asc          dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0402/27FEB2010:0502/IMPORT/;
asc2dssGrid          in=xport6.asc          dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0502/27FEB2010:0603/IMPORT/;
asc2dssGrid          in=xport7.asc          dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0603/27FEB2010:0659/IMPORT/;
```

```
asc2dssGrid                in=xport8.asc                dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0659/27FEB2010:0759/IMPORT/;
asc2dssGrid                in=xport9.asc                dss=malla.dss
path=/SHG/TEST/PRECIP/27FEB2010:0759/27FEB2010:0859/IMPORT/;
```

Lo anterior incluye el intervalo de tiempo que dura la tormenta, es decir un evento sucedido el 02feb2010 desde las 00:00 hasta las 09:00 horas. Es importante que todos los intervalos de tiempo tengan la misma duración y comiencen en el mismo minuto en el que acaba el intervalo de tiempo inmediatamente anterior, es decir, como el primer intervalo va desde la 00:00 hasta la hora 01:00, el siguiente debe comenzar desde la 01:00 hasta las 02:00 horas, así sucesivamente.

2. Debe crearse una carpeta en la cual se encuentren los siguientes archivos:

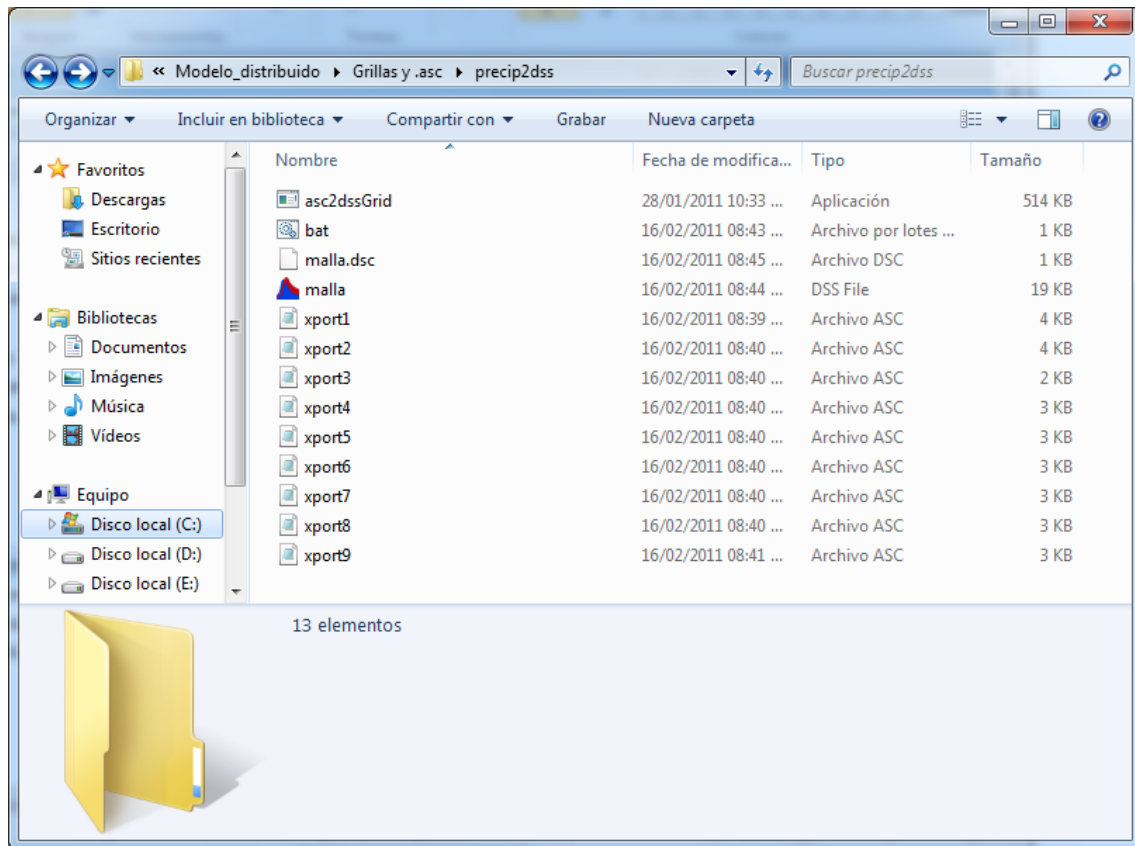
- El ejecutable asc2dss.exe
- Los archivos de precipitación que se deseen convertir (en formato ASCII).
- El archivo .bat, creado anteriormente que será el que hay que ejecutar y que llamará al asc2dssGrid.exe.

### **Instrucción para la creación automática del archivo malla.dss**

1. Se introducen en una misma carpeta los siguientes archivos: el archivo .bat, el ejecutable asc2dssGrid.exe y los archivos correspondientes a cada uno de los instantes de lluvia en formato ASCII.

2. Se ejecuta el archivo.bat desde la ventana “símbolo del sistema” y se crea automáticamente el archivo .dss, que este caso es llamado malla, como aparece

en la siguiente ventana



**Figura 9: Generación de la malla, Fuente: Autor.**

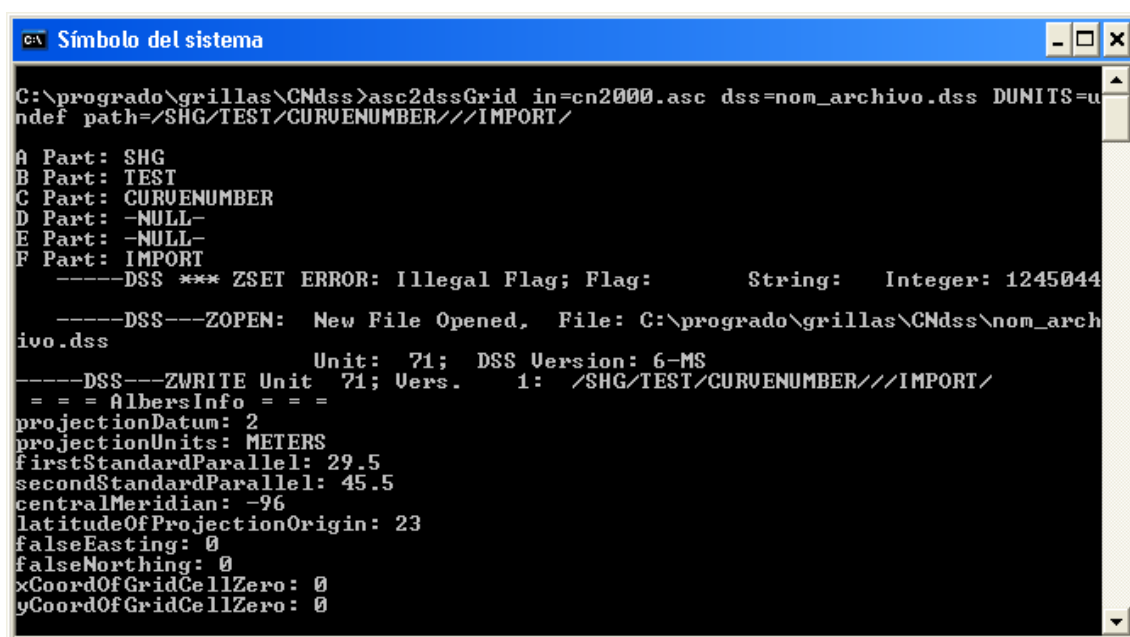
### Malla de CN en formato .dss

Se realiza el proceso anterior, únicamente varía en que el archivo .bat debe tener el siguiente texto:

```
asc2dssGrid    in=cn2000.asc    dss=nom_archivo.dss    DUNITS=undef
path=/SHG/TEST/CURVENUMBER///IMPORT/
```

Las mallas creadas deben ser del mismo tamaño (en celdas, columnas y filas), además deben coincidir espacialmente con la malla de la subcuenca, para ello es necesario determinar la coordenada inferior izquierda de una de las mallas (coordenada Este-Norte que arroja Arcview en el tema Modclark.shp) y

multiplicarla por el tamaño de la malla (en este caso 2000), el valor obtenido representa la nueva coordenada, en donde se referencian correctamente todas las grids y debe ser modificado en cada uno de los archivos .asc de precipitación y CN, en los elementos xllcorner y yllcorner. Se dice “debe ser modificado” porque los archivos .asc generados inicialmente, contienen coordenadas que no corresponden a las reales o bien no corresponden a las de la proyección en que se está trabajando.



```

C:\progrado\grillas\CNdss>asc2dssGrid in=cn2000.asc dss=nom_archivo.dss DUNITS=undefined path=/SHG/TEST/CURUENUMBER///IMPORT/

A Part: SHG
B Part: TEST
C Part: CURUENUMBER
D Part: -NULL-
E Part: -NULL-
F Part: IMPORT
-----DSS *** ZSET ERROR: Illegal Flag; Flag:          String: Integer: 1245044

-----DSS---ZOPEN:  New File Opened,  File: C:\progrado\grillas\CNdss\nom_archivo.dss
Unit: 71; DSS Version: 6-MS
-----DSS---ZWRITE Unit 71; Vers. 1: /SHG/TEST/CURUENUMBER///IMPORT/
= = = AlbersInfo = = =
projectionDatum: 2
projectionUnits: METERS
firstStandardParallel: 29.5
secondStandardParallel: 45.5
centralMeridian: -96
latitudeOfProjectionOrigin: 23
falseEasting: 0
falseNorthing: 0
xCoordOfGridCellZero: 0
yCoordOfGridCellZero: 0

```

**Figura 10: Generación de la malla, Fuente: Autor.**

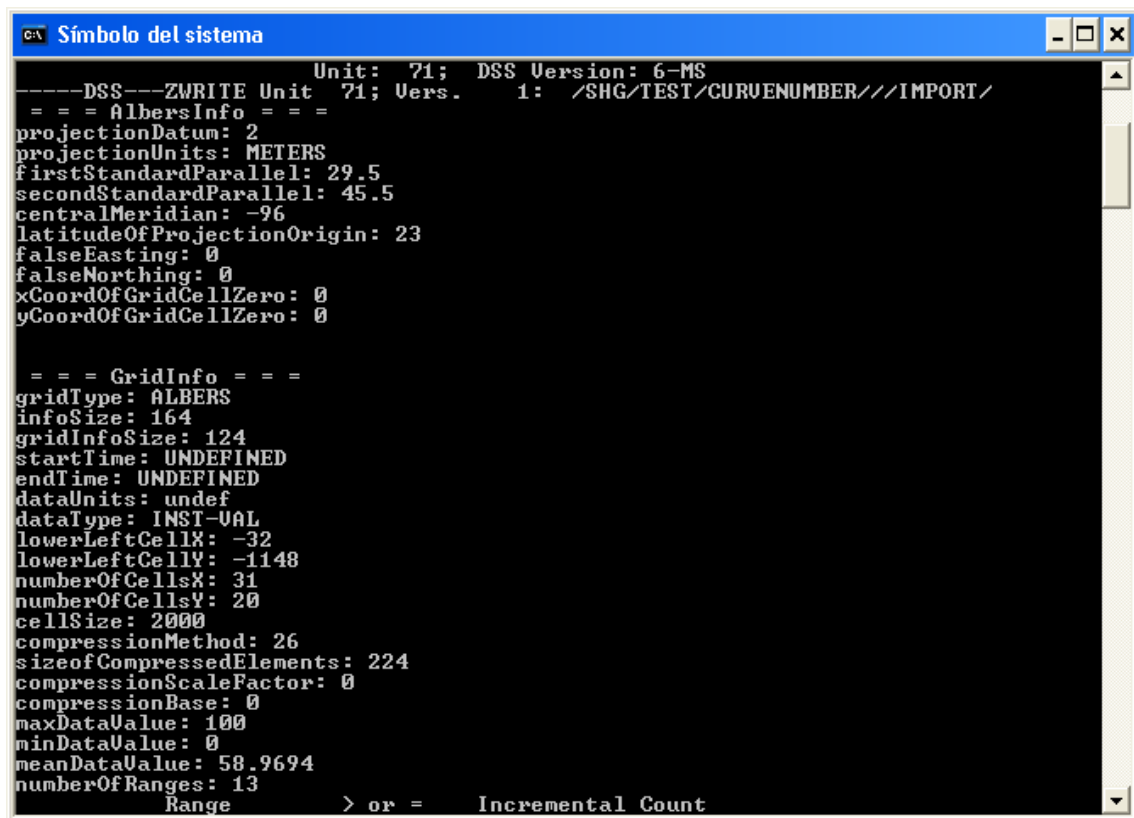
Las coordenadas reales tomadas del Modclark.shp, deben multiplicarse por el tamaño de la grid, ya que se usa el sistema de coordenadas SHG (Standar Hydrologic Grid) el cual es un sistema de coordenadas de mallas basado en el mapa de proyección cónica “Albers equal area” e indica su posición de la forma (i, j), siendo i la coordenada Este y j la coordenada Norte, en proyección Albers, para calcular cada coordenada se debe emplear la siguiente fórmula:

$$i = \text{floor}(\text{easting}/\text{cell size})$$

$j = \text{floor}(\text{northing}/\text{cell size})$

Siendo easting, la coordenada Este y northing la coordenada Norte de una proyección definida (no Albers) y floor es el elemento que redondea el valor obtenido y hace que la coordenada dé un número entero.

Para el caso en estudio, como ya se conocen las coordenadas  $i, j$  (-32,-1148) en esta proyección Albers, simplemente se multiplica por el tamaño de la malla para encontrar la coordenada que debe ingresarse en todos los archivos .asc existentes para que genere la coordenada real (Albers) en el ejecutable, es decir los archivos .asc deben tener coordenadas (-64000,-2296000) para grilla de 2000.



```
CA Símbolo del sistema
-----DSS---ZWRITE Unit 71; DSS Version: 6-MS
Vers. 1: /SHG/TEST/CURVENUMBER//IMPORT/
= = = AlbersInfo = = =
projectionDatum: 2
projectionUnits: METERS
firstStandardParallel: 29.5
secondStandardParallel: 45.5
centralMeridian: -96
latitudeOfProjectionOrigin: 23
falseEasting: 0
falseNorthing: 0
xCoordOfGridCellZero: 0
yCoordOfGridCellZero: 0

= = = GridInfo = = =
gridType: ALBERS
infoSize: 164
gridInfoSize: 124
startTime: UNDEFINED
endTime: UNDEFINED
dataUnits: undef
dataType: INST-VAL
lowerLeftCellX: -32
lowerLeftCellY: -1148
numberOfCellsX: 31
numberOfCellsY: 20
cellSize: 2000
compressionMethod: 26
sizeOfCompressedElements: 224
compressionScaleFactor: 0
compressionBase: 0
maxDataValue: 100
minDataValue: 0
meanDataValue: 58.9694
numberOfRanges: 13
Range > or = Incremental Count
```

Figura 11: Generación de la malla, Fuente: Autor.

### Anexo C. Ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas en Santander.

Código	Estación	Corriente	Categoría	Fecha de Instalación	Entidad Operadora	Elevación (m.s.n.m)	Norte	Este	Dpto.	Municipio
2311006	PADILLA	QDA LA MUERTA	PM	15/05/1984	IDEAM	100	1155921	1136873	SANTANDER	CIMITARRA
2312001	VERDE LA	GUAYABITO	PM	15/07/1976	IDEAM	305	1177555	1122279	SANTANDER	CIMITARRA
2312020	PTO ARAUJO ALER	CARARE	PM	15/10/1979	IDEAM	159	1206705	1126838	SANTANDER	CIMITARRA
2312022	PRADERA LA	PENA BONITA	PM	15/08/1980	IDEAM	2590	1081483	1126473	SANTANDER	JESUS MARIA
2312023	DANUBIO EL	GUAYABITO	PM	15/01/1979	FNC	1100	1138790	1120710	SANTANDER	LANDAZURI
2312029	PTO ARAUJO AUT	CARARE	PG	25/10/2004	IDEAM	92	1205358	1127000	SANTANDER	CIMITARRA
2312504	CAMPO CAPOTE	QDA CAPOTE	CO	15/08/1968	IDEAM	180	1214527	1121394	SANTANDER	PUERTO PARRA
2312505	CARARE	CARARE	CO	15/08/1974	IDEAM	168	1226392	1125336	SANTANDER	PUERTO PARRA
2312506	ALBANIA	QDA CANUTILLO	CO	15/03/1974	IDEAM	1690	1061318	1127220	SANTANDER	ALBANIA
2312512	CIMITARRA	QDA TORABA	CO	15/04/1975	IDEAM	300	1161201	1124597	SANTANDER	CIMITARRA
2312513	LANDAZURI	AGUA MIEL	CO	15/04/1975	IDEAM	1085	1139979	1120941	SANTANDER	LANDAZURI
2313001	CHUCURI	MAGDALENA	PM	15/09/1959	IDEAM	100	1265611	1122682	SANTANDER	BARRANCABERMEJ
2314001	PENA COLORADA	COLORADO	PM	15/01/1953	COLTABACO	1520	1212125	1113008	SANTANDER	SIMACOTA
2314004	PTE FERROCARRIL	OPON	PM	15/05/1980	IDEAM	95	1243008	1120628	SANTANDER	SIMACOTA
2314007	DOS BOCAS HDA	CASCAJALES	PM	15/08/1984	IDEAM	300	1229157	1111229	SANTANDER	ELCARMDECHUCU R
2314502	CARMEN EL	OPONCITO	CO	15/06/1973	IDEAM	815	1211505	1108669	SANTANDER	ELCARMDECHUCU R
2315004	BARRANCABER AU	MAGDALENA	PG	26/06/2007	IDEAM	76	1290934	1116646	SANTANDER	BARRANCABERMEJ
2315503	APTO YARIGUIES	MAGDALENA	SP	15/07/1931	IDEAM	126	1282001	1114924	SANTANDER	BARRANCABERMEJ
2315504	CENTRO EL	MAGDALENA	CO	15/01/1937	IDEAM	162	1250843	1114941	SANTANDER	BARRANCABERMEJ

Código	Estación	Corriente	Categoría	Fecha de Instalación	Entidad Operadora	Elevación (m.s.n.m)	Norte	Este	Dpto.	Municipio
2318002	PTO WILCHES	MAGDALENA	PM	15/05/1958	IDEAM	128	1295107	1049442	SANTANDER	PUERTO WILCHES
2318004	PORVENIR EL	QDA STOS GUTIER	PM	15/09/1972	IDEAM	154	1315326	1065969	SANTANDER	SABANA DETORRES
2318005	ESTABLO EL	QDA STOS GUTIER	PM	15/08/1972	IDEAM	98	1306504	1064400	SANTANDER	SABANA TORRES
2318007	SABAN DE TORRES	QDA STOS GUTIER	PM	15/05/1968	IDEAM	176	1330934	1102680	SANTANDER	SABANA TORRES
2318008	ELOY VALENZUELA	CGA. DE PAREDES	PM	15/08/1974	IDEAM	132	1316521	1083420	SANTANDER	SABANA TORRES
2318010	SITIO NUEVO	MAGDALENA	PM	15/08/1974	IDEAM	98	1413420	1108434	SANTANDER	PUERTO WILCHES
2318011	PATURIA	MAGDALENA	PM	15/08/1974	IDEAM	105	1380418	1030921	SANTANDER	PUERTO WILCHES
2318012	COQUERA LA	MAGDALENA	PM	15/08/1974	IDEAM	170	1321379	1116608	SANTANDER	PUERTO WILCHES
2318501	VILLA LEIVA	QDA STOS GUTIER	CP	15/01/1966	IDEAM	328	1295810	1074373	SANTANDER	SABANA TORRES
2318502	MONTERREY	MAGDALENA	CO	15/10/1988	PARTICULAR	100	1326673	1114705	SANTANDER	PUERTO WILCHES
2319004	BUCARAMANGA	DE ORO	PM	15/01/1953	COLTABACO	1018	1280375	1108365	SANTANDER	BUCARAMANGA
2319013	TONA	TONA	PM	15/05/1958	IDEAM	1910	1287783	1123079	SANTANDER	TONA
2319014	EL PLAYON	PLAYONERO	PM	15/05/1958	IDEAM	500	1317222	1097245	SANTANDER	EL PLAYON
2319017	FLORIDABLANCA	DE ORO	PM	15/10/1958	COLTABACO	860	1273005	1110222	SANTANDER	FLORIDABLANCA
2319018	ZARAGOZA	DE ORO	PM	15/01/1959	FNC	1100	1295097	1095448	SANTANDER	RIONEGRO
2319021	MAGARA	LEBRIJA	PM	15/11/1989	IDEAM	80	1330052	1049394	SANTANDER	SABANA TORRES
2319026	LAGUNA LA	QDA LA ANGULA	PM	15/05/1967	IDEAM	1050	1274819	1095486	SANTANDER	LEBRIJA
2319028	PALO GORDO	DE ORO	PM	15/06/1967	IDEAM	950	1261933	1104720	SANTANDER	GIRON
2319030	PICACHO EL	TONA	PM	15/07/1967	IDEAM	3310	1278565	1123101	SANTANDER	TONA

Código	Estación	Corriente	Categoría	Fecha de Instalación	Entidad Operadora	Elevación (m.s.n.m)	Norte	Este	Dpto.	Municipio
2319032	PROVINCIA	LEBRIJA	PM	15/10/1992	IDEAM	172	1311647	1071494	SANTANDER	SABANA DE TORRES
2319034	MATAJIRA	SURATA	PM	15/10/1967	IDEAM	996	1289601	1112027	SANTANDER	MATANZA
2319035	LLANO DE PALMAS	QDA HONDA	PM	15/11/1967	IDEAM	778	1293257	1097292	SANTANDER	RIONEGRO
2319036	PORTACHUELO	NEGRO	PM	15/10/1967	IDEAM	800	1302481	1100955	SANTANDER	RIONEGRO
2319038	PALMAS	QDA HONDA	PM	15/11/1967	IDEAM	855	1289566	1095458	SANTANDER	LEBRIJA
2319040	GALVICIA LA	TONA	PM	15/01/1968	IDEAM	1779	1282235	1115727	SANTANDER	FLORIDABLANCA
2319044	NARANJO EL	QDA SAN BENITO	PM	15/04/1971	IDEAM	825	1289550	1086253	SANTANDER	LEBRIJA
2319045	VETAS-EL POZO	VETAS	PM	15/03/1971	IDEAM	3220	1300711	1132251	SANTANDER	VETAS
2319046	PAPAYAL	LEBRIJA	PM	15/05/1971	IDEAM	100	1333739	1049391	SANTANDER	RIONEGRO
2319049	COCAL	NEGRO	PM	15/01/1991	FNC	700	1295111	1102811	SANTANDER	RIONEGRO
2319056	SAN RAFAEL	LEBRIJA	PM	15/12/1976	IDEAM	96	1330061	1056752	SANTANDER	SABAN DE TORRES
2319059	FLORESTA LA	QDA DE LA IGLESIA	PG	15/06/1978	IDEAM	925	1274837	1104694	SANTANDER	BUCARAMANGA
2319060	PANTANO EL	QDA LA ANGULA	PM	15/11/1967	IDEAM	1280	1265599	1093661	SANTANDER	GIRON
2319061	BONANZA	DE ORO	PM	15/11/1967	FNC	1250	1272986	1101014	SANTANDER	GIRON
2319062	COCOS LOS	SURATA	PM	15/10/1967	FNC	1300	1298806	1106485	SANTANDER	RIONEGRO
2319063	LOMA LA	DE ORO	PM	15/12/1967	FNC	1400	1273005	1110222	SANTANDER	FLORIDABLANCA
2319064	MIPORAL	DE ORO	PM	15/06/1967	FNC	1200	1273001	1108381	SANTANDER	FLORIDABLANCA
2319065	CEYLAN	SURATA	PM	15/01/1968	FNC	1300	1282211	1104678	SANTANDER	BUCARAMANGA
2319066	VILLA PAZ	SURATA	PM	15/04/1968	FNC	1400	1298802	1104644	SANTANDER	RIONEGRO
2319067	BELLAVISTA	SURATA	PM	15/12/1967	FNC	1120	1302493	1106477	SANTANDER	RIONEGRO
2319068	PALESTINA	SURATA	PM	15/01/1968	FNC	1350	1304336	1106473	SANTANDER	RIONEGRO
2319070	PIEDECUESTA	LATO	PG	15/07/1970	IDEAM	1000	1265631	1110238	SANTANDER	PIEDECUESTA

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Corriente</b>	<b>Categoría</b>	<b>Fecha de Instalación</b>	<b>Entidad Operadora</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Dpto.</b>	<b>Municipio</b>
	GJA									
2319072	TELECOM	LEBRIJA	PG	15/01/1979	CDMB	950	1271102	1094400	SANTANDER	BUCARAMANGA
2319073	FLORA LA	LEBRIJA	PG	15/01/1979	CDMB	1100	1261827	1094303	SANTANDER	BUCARAMANGA
2319074	MARIANA	LEBRIJA	PM	15/06/1981	CDMB	2250	1280310	1117627	SANTANDER	TONA
2319075	SEVILLA	LEBRIJA	PM	15/07/1981	CDMB	1900	1267670	1119428	SANTANDER	PIEDRECUESTA
2319076	PAUJIL EL	LEBRIJA	PM	15/07/1981	CDMB	1600	1295207	1090227	SANTANDER	RIONEGRO
2319077	ROBLE EL	LEBRIJA	PM	15/08/1981	CDMB	2200	1295190	1123241	SANTANDER	CHARTA
2319078	LAGO ALTO	LEBRIJA	PM	15/08/1981	CDMB	2700	1314018	1122312	SANTANDER	SURATA
	CLUB									
2319079	CAMPESTRE	LEBRIJA	PG	15/10/1982	CDMB	940	1273072	1106399	SANTANDER	FLORIDABLANCA
2319082	SILENCIO EL	CAHIRA SUR	PM	15/01/1988	FNC	1120	1309844	1095419	SANTANDER	RIONEGRO
2319083	B/GA IDEAM	SURATA	PG	15/10/1996	IDEAM	1025	1278528	1106527	SANTANDER	BUCARAMANGA
2319084	RESERVA LA	NEGRO	PM	15/01/1983	FNC	1200	1301060	1094062	SANTANDER	RIONEGRO
2319085	CARACOLI	FRIO	PM	15/04/2004	PARTICULAR	1100	1259692	1092860	SANTANDER	FLORIDABLANCA
2319086	PALOGORD AUTO	RIO DE ORO	PG	27/10/2005	IDEAM	690	1242844	1095571	SANTANDER	GIRON
2319504	UNIV IND SANTAN	TONA	CP	15/01/1957	IDEAM	1018	1272573	1093992	SANTANDER	BUCARAMANGA
2319509	VIVERO SURATA	SURATA	CO	15/09/1968	IDEAM	1725	1304366	1119357	SANTANDER	SURATA
2319510	CHARTA	SURATA	CO	15/11/1984	PARTICULAR	1935	1295223	1236161	SANTANDER	CHARTA
2319511	LLANO GRANDE	DE ORO	CO	15/07/1971	IDEAM	777	1271139	1099176	SANTANDER	GIRON
	APTO PALONE									
2319513	AUT	DE ORO	SP	15/08/1974	IDEAM	1189	1280356	1099158	SANTANDER	LEBRIJA
2319515	TOTUMOS LOS	FRIO	CO	15/08/1985	PARTICULAR	785	1272990	1102856	SANTANDER	GIRON
2319516	GRAMAL EL	TONA	CO	15/10/1984	PARTICULAR	2350	1289795	1125594	SANTANDER	TONA
	SAN ANTONIO									
2319519	AUT	FRIO	CP	15/01/1991	IDEAM	1480	1276696	1112056	SANTANDER	FLORIDABLANCA

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Corriente</b>	<b>Categoría</b>	<b>Fecha de Instalación</b>	<b>Entidad Operadora</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Dpto.</b>	<b>Municipio</b>
2319520	CACHIRI	CACHIRI	CO	15/06/1971	IDEAM	1850	1319114	1119321	SANTANDER	SURATA
2319521	ESPERANZA LA	LEBRIJA	CP	15/09/1979	PARTICULAR	1020	1273582	1111228	SANTANDER	FLORIDABLANCA
2319522	JULIAN REY	SANTA CRUZ	CP	15/01/1991	FNC	1360	1302493	1106477	SANTANDER	RIONEGRO
2319523	NEOMUNDO AUTO	ORO	CP	17/08/2005	IDEAM	970	1264726	1093885	SANTANDER	BUCARAMANGA
2401001	AGUAFRIA	SUAREZ	PM	15/02/1981	FNC	1400	1142334	1107074	SANTANDER	CHIMA
2401005	SEVILLA	SUAREZ	PM	15/06/1979	FNC	1390	1129701	1109124	SANTANDER	GUADALUPE
2401019	CUMBRE LA	SUAREZ	PM	15/04/1979	FNC	1650	1075122	1119510	SANTANDER	PUENTE NACIONAL
2401021	JESUS MARIA	QDA POTRERO	PM	15/03/1958	IDEAM	1920	1077003	1122512	SANTANDER	JESUS MARIA
2401023	CONFINES	GUAYACA	PM	15/08/1958	IDEAM	1523	1141204	1103198	SANTANDER	CONFINES
2401024	OIBA	OIBITA	PM	15/11/1958	IDEAM	1400	1127507	1105705	SANTANDER	OIBA
2401064	BOLIVAR	BOLIVAR	PM	15/03/1974	IDEAM	2260	1096684	1121431	SANTANDER	BOLIVAR
2401065	OLIVAL	TOLOTA	PM	15/11/1973	IDEAM	1502	1109555	1107591	SANTANDER	SUAITA
2401066	SIMACOTA	SUAREZ	PM	15/11/1973	IDEAM	1050	1160281	1105336	SANTANDER	SIMACOTA
2401067	SUCRE	UVASA	PM	15/02/1974	IDEAM	2270	1085825	1122642	SANTANDER	SUCRE
2401068	CENTRAL 2	SUAREZ	PG	15/03/1960	CAR	2145	1060917	1120556	SANTANDER	PUENTE NACIONAL
2401076	SUAITA	LENGUARUCO	PM	15/03/1958	IDEAM	1617	1104768	1110862	SANTANDER	SUAITA
2401082	GUAVATA	EL NIDO	PM	15/08/1980	IDEAM	2018	1089706	1119560	SANTANDER	GUAVATA
2401085	PALMA LA	UBAZA	PM	15/08/1980	IDEAM	2110	1062078	1110849	SANTANDER	GAMBITA
2401088	BUENAVISTA	SUAREZ	PM	15/01/1970	FNC	1850	1091623	1117849	SANTANDER	BARBOSA
2401089	RECREO EL	SUAREZ	PM	15/04/1970	FNC	1550	1108853	1112005	SANTANDER	SUAITA
2401090	CITE	SUAREZ	PM	15/08/1970	FNC	1600	1089742	1116363	SANTANDER	BARBOSA
2401091	CHAPA	OIBITA	PM	15/02/1970	FNC	1600	1124597	1100584	SANTANDER	CHARALA
2401092	CIELO ROTO	SUAREZ	PM	15/07/1970	FNC	1540	1108219	1111513	SANTANDER	SUAITA

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Corriente</b>	<b>Categoría</b>	<b>Fecha de Instalación</b>	<b>Entidad Operadora</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Dpto.</b>	<b>Municipio</b>
2401093	PINOS LOS	OIBITA	PM	15/03/1970	FNC	1350	1133274	1104860	SANTANDER	OIBA
2401107	SANTUARIO EL	SUAREZ	PM	15/09/1984	IDEAM	1800	1144572	1110100	SANTANDER	EL GUACAMAYO
2401525	LAJA LA	SUAREZ	CO	15/11/1973	IDEAM	1400	1127403	1109175	SANTANDER	GUADALUPE
2401526	CHIMA	SUAREZ	CO	15/12/1973	IDEAM	1090	1146184	1106971	SANTANDER	CHIMA
2401527	VELEZ GRANJA	QDA PALENQUE	CO	15/03/1974	IDEAM	2170	1094945	1118434	SANTANDER	VELEZ
2401528	GAMBITA	LENGUARUCO	CO	15/05/1974	IDEAM	1900	1073402	1109029	SANTANDER	GAMBITA
2402001	SAN GIL-LA CASCA	FONCE	PM	15/07/1950	COLTABACO	1470	1173649	1098604	SANTANDER	SAN GIL
2402004	ENCINO	PIENTA	PG	15/11/1954	IDEAM	1814	1098093	1100534	SANTANDER	ENCINO
2402006	VILLANUEVA	FONCE	PM	15/03/1956	FNC	1450	1121705	1100698	SANTANDER	CHARALA
2402008	VALLE DE SAN JOSE	FONCE	PM	15/04/1958	IDEAM	1300	1152309	1099767	SANTANDER	VALLE DE SAN JOSE
2402012	COROMORO	TAQUIZA	PM	15/11/1973	IDEAM	1520	1123997	1097890	SANTANDER	COROMORO
2402013	CURITI 2	FONCE	PM	15/11/1973	IDEAM	1626	1176603	1096110	SANTANDER	CURITI
2402014	MESON EL	FONCE	PM	15/03/1979	FNC	1200	1153477	1099430	SANTANDER	VALLE DE SAN JOSE
2402015	MAMONAL EL HDA	FONCE	PM	15/10/1979	IDEAM	1100	1174291	1097743	SANTANDER	SAN GIL
2402017	CUCHICUTE	FONCE	PM	15/07/1967	FNC	1550	1176737	1096429	SANTANDER	CURITI
2402018	FLORES LAS	FONCE	PM	15/06/1967	FNC	1700	1166091	1101994	SANTANDER	PINCHOTE
2402019	LA LAGUNA	FONCE	PM	15/08/1967	FNC	1550	1151899	1100518	SANTANDER	PARAMO
2402020	LEJIA LA	FONCE	PM	15/04/1967	FNC	1500	1132626	1099755	SANTANDER	OCAMONTE
2402022	PAVAS LAS	TURE	PM	15/04/1983	IDEAM	2625	1095604	1096544	SANTANDER	COROMORO
2402023	PUEBLO VIEJO	TAQUIZA	PM	15/04/1983	IDEAM	2000	1113117	1096438	SANTANDER	COROMORO
2402025	PLAZUELA LA	LA HONDA	PM	15/01/1991	FNC	1700	1159648	1101743	SANTANDER	SOCORRO

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Corriente</b>	<b>Categoría</b>	<b>Fecha de Instalación</b>	<b>Entidad Operadora</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Dpto.</b>	<b>Municipio</b>
2402026	NOGAL EL	RIACHUELO	PM	15/11/1977	FNC	1560	1130700	1098297	SANTANDER	CHARALA
2402027	SAN GIL	FONCE	PM	15/01/1994	FNC	1600	1176528	1098485	SANTANDER	SAN GIL
2402028	CHAPOLA LA	HONDA	PM	15/06/1996	FNC	1700	1158989	1101257	SANTANDER	SOCORRO
2402501	SAN GIL	FONCE	CO	15/03/1930	COLTABACO	1200	1173649	1098604	SANTANDER	SAN GIL
2402502	CUCHARO EL	FONCE	CP	15/11/1953	IDEAM	975	1170317	1100768	SANTANDER	PINCHOTE
2402504	ESC AGR MOGOTE	MOGOTICOS	CP	15/11/1973	IDEAM	1667	1150492	1094509	SANTANDER	MOGOTES
2402505	CHARALA	PIENTA	CO	15/11/1973	IDEAM	1350	1123666	1101150	SANTANDER	CHARALA
2402507	ALBERTO SANTOS	HONDA	CP	15/01/1994	FNC	1500	981633	1184288	SANTANDER	SOCORRO
2402508	HATO GRAND HDA	CURITI	CP	05/01/2006	PARTICULAR	2000	1171213	1094614	SANTANDER	CURITI
2402509	MOGOTES AUTOM	MOGOTICOS	PM	25/10/2004	IDEAM	1673	1150492	1094509	SANTANDER	MOGOTES
2403006	CAPITANEJO	CHICAMOCHA	PM	15/02/1947	COLTABACO	1100	1150878	1086302	SANTANDER	CAPITANEJO
2403008	SANTOS LOS	CHICAMOCHA	PM	15/01/1953	COLTABACO	1295	1203911	1096312	SANTANDER	LOS SANTOS
2403020	SAN JOAQUIN	ONZAGA	PM	15/02/1958	IDEAM	2000	1139169	1091959	SANTANDER	SAN JOAQUIN
2403021	CERRITO	SERVITA	PM	15/02/1958	IDEAM	2440	1202250	1084078	SANTANDER	CERRITO
2403027	SAN ANDRES	GUACA	PM	15/02/1956	IDEAM	1702	1207174	1088341	SANTANDER	SAN ANDRES
2403029	MACARAVITA	NEVADO	PM	15/07/1958	IDEAM	1856	1139602	1083165	SANTANDER	MACARAVITA
2403030	CEPITA	CHICAMOCHA	PM	15/08/1958	IDEAM	600	1199344	1092672	SANTANDER	CEPITA
2403032	CARCASI	TUNEBO	PM	15/08/1958	IDEAM	1976	1164170	1083636	SANTANDER	CARCASI
2403033	TOPE EL	UMPALA	PM	15/09/1958	IDEAM	2050	1229484	1090051	SANTANDER	SANTA BARBARA
2403034	MOLAGAVITA	NEGRO	PM	15/10/1958	IDEAM	2150	1178848	1088537	SANTANDER	MOLAGAVITA
2403037	SUSA	SUSA	PG	15/11/1959	IDEAM	3080	1096948	1092536	SANTANDER	ONZAGA

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Corriente</b>	<b>Categoría</b>	<b>Fecha de Instalación</b>	<b>Entidad Operadora</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Dpto.</b>	<b>Municipio</b>
2403049	REGADERO	CHICAMOCHA	PM	15/07/1969	COLTABACO	500	1203911	1096312	SANTANDER	LOS SANTOS
2403063	BARAYA	GUACA	PM	15/12/1973	IDEAM	2362	1228424	1086738	SANTANDER	GUACA
2403068	PARAMO EL	TUNEBO	PG	15/06/1974	IDEAM	2310	1167018	1082333	SANTANDER	CARCASI
2403075	GUACA	GUACA	PM	15/08/1976	IDEAM	2362	1216463	1088374	SANTANDER	GUACA
2403085	ASERRIO EL	CHAGUACA	PM	15/08/1980	IDEAM	2500	1102527	1090689	SANTANDER	ONZAGA
2403089	INST AGRICOLA	NEVADO	PM	15/08/1960	FNC	1800	1130602	1080066	SANTANDER	MOGOTES
2403095	MALAGA 2	SERVITA	PG	15/12/1973	IDEAM	2237	1181516	1085941	SANTANDER	MALAGA
2403526	CAPITANEJO	CHICAMOCHA	CO	15/06/1974	IDEAM	1160	1147955	1086215	SANTANDER	CAPITANEJO
2403539	PAR. ALMORZA AU	SERVITA	CP	25/10/2004	IDEAM	3600	1220733	1083257	SANTANDER	CERRITO
2403540	VOLCAN EL	SERVITA	CO	09/08/2006	IDEAM	2841	1203018	1083455	SANTANDER	CERRITO
2404001	BARICHARA	SUAREZ	PM	15/01/1953	COLTABACO	1300	1189200	1101038	SANTANDER	BARICHARA
2404002	VILLANUEVA	SOGAMOSO	PM	15/01/1956	COLTABACO	1200	1192937	1099340	SANTANDER	VILLANUEVA
2404005	STA ISABEL	SOGAMOSO	PM	15/11/1973	IDEAM	1300	1188819	1100214	SANTANDER	BARICHARA
2404006	REMOLINO	SUAREZ	PM	15/08/1979	IDEAM	630	1186214	1102483	SANTANDER	CABRERA
2404007	CHOCOS	SUAREZ	PM	15/08/1979	FNC	1400	1174541	1103705	SANTANDER	HATO
2405006	SAN VICENTE	CHUCURI	PM	15/04/1958	IDEAM	721	1238043	1104445	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405007	PUTANA LA	SOGAMOSO	PM	15/07/1973	IDEAM	150	1282139	1060489	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405009	NEW YORK	QDA RAMO	PM	15/01/1967	FNC	960	1236525	1104175	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405010	FUENTE LA	SUAREZ	PM	15/06/1973	IDEAM	815	1203898	1101856	SANTANDER	ZAPATOCA
2405011	ALBANIA	QDA VIZCAINA	PM	15/07/1973	IDEAM	300	1254299	1110628	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405012	PARROQUIA LA	CHUCURI	PM	15/02/1967	FNC	500	1252391	1104515	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405013	STA CRUZ	CHUCURI	PM	15/12/1987	FNC	750	1235822	1103688	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405014	NAZARETH	CHUCURI	PM	15/05/1979	FNC	1000	1251679	1104028	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405015	GUAYANA LA	SOGAMOSO	PM	15/02/1981	FNC	1800	1218709	1100302	SANTANDER	ZAPATOCA

Código	Estación	Corriente	Categoría	Fecha de Instalación	Entidad Operadora	Elevación (m.s.n.m)	Norte	Este	Dpto.	Municipio
2405016	CASA DE TEJA	CHUCURI	PM	15/01/1988	FNC	960	1247320	1105256	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405017	FLORESTA LA	SOGAMOSO	PM	15/04/1967	FNC	950	1207102	1079410	SANTANDER	SAN VIC DE CHUCU
2405503	ZAPATOCA	QDA ZAPATOCA	CO	15/06/1973	IDEAM	1810	1218819	1101309	SANTANDER	ZAPATOCA
2405504	PALMAR EL	SUAREZ	CO	15/02/1984	IDEAM	940	1177067	1103353	SANTANDER	PALMAR
2406003	BONANZA	SOGAMOSO	PM	15/08/1978	FNC	1500	1280327	1082586	SANTANDER	LEBRIJA
2406004	AGUASCLARAS	QDA AGUASCLARA	PM	15/07/1973	IDEAM	188	1291106	1105400	SANTANDER	SABANA DE TORRES
2406005	MESA LA	QDA LOS SANTOS	PM	15/11/1973	IDEAM	1460	1182651	1096036	SANTANDER	LOS SANTOS
2406006	PTE LA PAZ	SOGAMOSO	PM	15/04/1979	IDEAM	180	1276629	1075227	SANTANDER	BETULIA
2406007	PARROQUIA LA	QDA AGUA BLANC	PG	15/09/1959	IDEAM	267	1272956	1084440	SANTANDER	GIRON
2406008	PAYOA 5	QDA PAYOA	PM	15/11/1984	IDEAM	175	1310336	1103685	SANTANDER	SABANA DE TORRES
2406009	PTE LA PAZ AUTO	SOGAMOSO	PG	05/09/2004	IDEAM	239	1279248	1102885	SANTANDER	BETULIA
2406501	BRISAS LAS HDA	SOGAMOSO	CO	15/07/1973	IDEAM	138	1319598	1112620	SANTANDER	PUERTO WILCHES
2406503	TRIGUEROS HDA	SOGAMOSO	CP	15/03/1996	IDEAM	400	1274794	1080754	SANTANDER	GIRON
3701005	TABETA	SARTANEJA	PM	15/05/1979	IDEAM	3168	1192203	1080229	SANTANDER	CONCEPCION
3701006	PORTILLO EL	ANGOSTURA	PM	15/12/1976	IDEAM	3824	1239171	1085742	SANTANDER	GUACA
3701502	BERLIN AUTOM.	JORDAN	CO	15/05/1968	IDEAM	3214	1285967	1134131	SANTANDER	TONA
	LA VEGA	R. MANCO	PM		AMB	2025	1263104	1123953	SANTANDER	PIEDECUUESTA
	EL BRASIL	R. TONA	PM		AMB	1941	1282860	1114643	SANTANDER	TONA
2319074	LA MARIANA	Q. DOS AGUA	PM	01/06/1981	CDMB	2250	1281215	1116827	SANTANDER	TONA
	EL RASGÓN	Q. EL RASGO	CO	01/08/1985	CDMB	2185	1270294	1119913	SANTANDER	PIEDECUUESTA
2318003	CASA NUEVA	Q. STOS. GU	PM	01/10/1970	IDEAM	136	1324533	1058598	SANTANDER	SABANA DE T
	EL PAJARAL	Q. GOLONDRI	PM		AMB	2363	1281171	1119018	SANTANDER	TONA

<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Corriente</b>	<b>Categoría</b>	<b>Fecha de Instalación</b>	<b>Entidad Operadora</b>	<b>Elevación (m.s.n.m)</b>	<b>Norte</b>	<b>Este</b>	<b>Dpto.</b>	<b>Municipio</b>
	PIEDRAS BLA	R. SALADO	PM		AMB	3409	1278916	1132432	SANTANDER	TONA
	EL VAHO	R. MATADERO	PM		AMB	3493	1279498	1136338	SANTANDER	SILOS
	MORROQUITO	Q. LOS ARCO	PM		AMB	2522	1289680	1121269	SANTANDER	TONA
	PANTANO	Q. LA AMARI	PM		AMB	2285	1290296	1120538	SANTANDER	TONA
	LA GRANJA	R. SURATA	PM		AMB	1223	1295054	1112752	SANTANDER	MATANZA
	HUERTA GRAN	R. VETAS	PM		AMB	1688	1296784	1119445	SANTANDER	CHARTA
	MIRAFLORES	Q. EL ROBLE	PM		AMB	2341	1304646	1116287	SANTANDER	MATANZA
	CALIFORNIA	R. VETAS	PM		AMB	2022	1304239	1125493	SANTANDER	CALIFORNIA
	LA LORA O E	R. SURATA	PM		AMB	2428	1311424	1121143	SANTANDER	SURATA
2319008	PTO. SANTOS	R. LEBRIJA	PM	01/01/1958	COLTABACO	120	1311655	1077014	SANTANDER	LEBRIJA
2319009	PORTACHUELO	R. SANTA CR	PM	01/01/1958	F. N. CAFET	1400	1304340	1108313	SANTANDER	MATANZA