



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AUTORES: AGUILAR ALBÁN, JOHN HENRY
SUÁREZ VILLACRÉS, RAÚL DAVID**

**TEMA: IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS
FORESTALES APLICANDO UN MODELO DE PROBABILIDAD Y SU
SUBSECUENTE PREDICCIÓN POTENCIAL CON LA METODOLOGÍA
DE AUTÓMATAS CELULARES EN EL DISTRITO METROPOLITANO
DE QUITO**

DIRECTOR: ING. PADILLA, OSWALDO

CODIRECTOR: DR. TOULKERIDIS, THEOFILOS

SANGOLQUÍ, OCTUBRE 2013

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

C E R T I F I C A D O

Nosotros, ING. OSWALDO PADILLA y DR. THEOFILOS TOULKERIDIS

CERTIFICAN

Que, el Proyecto de grado titulado “IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES APLICANDO UN MODELO DE PROBABILIDAD Y SU SUBSECUENTE PREDICCIÓN POTENCIAL CON LA METODOLOGÍA DE AUTÓMATAS CELULARES EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, realizado por los señores RAÚL DAVID SUÁREZ VILLACRÉS y JOHN HENRY AGUILAR ALBÁN, ha sido revisado prolijamente y cumple con los requerimientos: teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE, por lo que nos permitimos acreditarlo y autorizar su entrega al Sr. Ing. Francisco León L., en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. El trabajo en mención consta de dos empastados y dos discos compactos el cual contienen el documento en formato portátil de Acrobat (pdf).

Sangolquí, Octubre de 2013

ING. OSWALDO PADILLA
DIRECTOR

DR. THEOFILOS TOULKERIDIS
CODIRECTOR

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Raúl David Suárez Villacrés y John Henry Aguilar Albán

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado titulado “IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES APLICANDO UN MODELO DE PROBABILIDAD Y SU SUBSECUENTE PREDICCIÓN POTENCIAL CON LA METODOLOGÍA DE AUTÓMATAS CELULARES EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, Octubre de 2013

Raúl David Suárez Villacrés

Jonh Henry Aguilar Albán

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Raúl David Suárez Villacrés y John Henry Aguilar Albán

Autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE, la publicación en la biblioteca virtual de la Institución, el proyecto de grado titulado “IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES APLICANDO UN MODELO DE PROBABILIDAD Y SU SUBSECUENTE PREDICCIÓN POTENCIAL CON LA METODOLOGÍA DE AUTÓMATAS CELULARES EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, Octubre de 2013

Raúl David Suárez Villacrés

Jonh Henry Aguilar Albán

DEDICATORIA

A mis padres Raúl y Nelly, por ser el ejemplo y los pilares de mi vida. Con su amor, comprensión, esfuerzo, responsabilidad y trabajo; me han enseñado a seguir adelante y culminar el camino por más obstáculos que en él presenten. Quienes con sus oraciones y palabras, me brindan la fortaleza y seguridad por donde he ido; y con su bendición he sabido que Dios siempre estará conmigo.

A mi abuelita Lauri, por su cariño, voluntad, preocupación y ejemplo, ha sido mi segunda mamá.

A mi ñaño Roberto, por ser como un hermano, quien me ha sabido brindar su alegría, apoyo, consejo, optimismo, pero especialmente enseñado a buscar la unidad de la familia y respetar la individualidad de cada persona.

A mi abuelito José, por su ejemplo de tenacidad y fortaleza.

Raúl

Quiero dedicar primeramente a dos personas maravillosas, ellos quienes han sido mi luz, mi paz y tranquilidad, quienes con sus consejos y enseñanzas me han guiado a través de este tiempo, agradeciéndoles de corazón su cariño incondicional quiero dedicarles este trabajo, a ustedes mis abuelitos y padres Luis y María.

A Cristina, Mabel, Sonia también se los quiero dedicar por el tiempo compartido, por ser mis guías y ejemplos a seguir, A mi hermano Erick a quien lo adoro y me ha dado recuerdos maravillosos, esto también es para ti.

A mis amigos Francisco, Juan, Andrés, Romel, Marcelo, Alexander, Oswaldo, Herlann que más que amigos han sido mis hermanos, a ustedes les dedico como parte de mi gran cariño y gratitud, y por ultimo pero no menos importante a Sofía, quien ha sido una gran fortaleza en mi.

En general a todos a quienes dedico este trabajo como símbolo de mi esfuerzo y perseverancia, es principalmente por creer en mí.

Henry

AGRADECIMIENTOS

A nuestros directores de tesis, Ing. Oswaldo Padilla y Dr. Theofilos Toulkeridis, por su paciencia, interés, voluntad, pero en especial sus conocimientos y consejos aplicados a la realización de este estudio y la vida profesional.

Al Ing. David Acosta, Gerente General de la empresa Kaymanta Consultores S.A., por su amistad, consejo, consideración, respeto y voluntad. Además, de brindarme la oportunidad de dar mis primeros pasos en la vida profesional y confiar en mí trabajo.

Al Ing. Mauricio Naranjo por permitirme adquirir experiencia en el campo profesional.

A Ángel, Josué, Yadira y Jacke, por su amistad, apoyo, confianza y respeto. Por ser partícipes de nuestros triunfos y en especial los tropiezos que no han sido derrotas, pero nos han enseñado a levantarnos nuevamente y siempre tendernos la mano.

A Kary C., Gaby P., Andrés E., Fausto G., David A., por su amistad, apoyo y comprensión; con quienes hemos caminado por esta etapa de nuestras vidas.

Raúl

Agradezco al Ing. Oswaldo Padilla y Dr. Theofilos Toulkeridis, por haberme guiado en el transcurso de la elaboración de esta tesis, ah sido para mí un honor trabajar bajo la tutela de dos grandes profesionales como son ustedes.

Y en general a todos quienes han sido partícipes en múltiples etapas de mi vida, aquellos que desde muy lejos me han apoyado, quienes han caminado conmigo durante mucho tiempo sin importar que tan malos momentos hayamos tenido que pasar, a ellos quienes nunca ha sido mezquinos, y me han aceptándome tal cual soy; a todos ellos, porque de algún modo sus enseñanzas y momentos compartidos se han quedado plasmadas en mi.

En especial quiero agradecer a mis amigos Mónica, Vane, David por su amistad y apoyo incondicional.

Henry

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I	1
GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	4
1.3 Descripción del área de estudio.....	5
1.4 Ubicación geográfica.....	6
1.5 Objetivos	7
1.5.2 Específicos.....	7
1.5.3 Metas.....	8
CAPÍTULO II	9
FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1 Incendios forestales.....	9
2.1.1 Características de los incendios forestales.....	9
2.1.2 Factores presentes en el inicio del fuego en el incendio forestal	10
2.1.3 Fenómenos físicos que propagan el incendio forestal	11
2.1.4 Formas de un incendio forestal	12
2.1.5 Partes de un incendio forestal.....	13
2.1.6 Tipos de incendios forestales	14
2.1.7 Factores que rigen el comportamiento del fuego.....	16
2.1.8 Incendios forestales provocados por la naturaleza.....	17
2.1.9 Incendios forestales provocados por el ser humano	19
2.1.10 Incendios forestales en el Ecuador	22
2.1.11 Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito	23
2.1.12 Áreas afectadas por incendios forestales en la época seca del año 2012.....	25
2.2 Sistema de Información Geográfica.....	26
2.2.1 Definición	26
2.2.2 Datos geográficos	27
2.2.3 Componentes de los datos geográficos.....	27
2.2.4 Modelos de datos	27
2.3 Los Automatas Celulares y la Vida Artificial.....	32

2.3.1 Introducción.....	32
2.3.3 Definición de Autómata Celular	34
2.3.4 Elementos de un Autómata Celular.....	34
2.3.5 Tipos de límites.....	35
2.3.6 Vecindad de un Autómata Celular	36
CAPÍTULO III.....	37
DEFINICIÓN DE VARIABLES	37
3.1 Variables bióticas.....	37
3.1.1 Cobertura vegetal	37
3.1.2 Índice de combustibilidad	42
3.2 Variables físicas	46
3.2.1 Modelo Digital de Elevación	46
3.2.2 Pendiente	48
3.2.3 Orientación	50
3.2.4 Focos de incendios forestales.....	52
3.3 Variables meteorológicas	55
3.3.1 Humedad relativa.....	58
3.3.2 Precipitación	59
3.3.3 Temperatura.....	60
3.4 Variables antrópicas.....	61
3.4.1 Áreas artificiales	61
3.4.2 Áreas cultivadas.....	65
CAPÍTULO IV	67
MODELAMIENTO ESPACIAL DE VARIABLES.....	67
4.1 Identificación de áreas de concentración de focos de incendio.....	68
4.2 Ubicación de puntos de observación y generación de cuencas visuales para incendios forestales	72
4.2.1 Delimitación de cuadrantes	74
4.2.2 Análisis de la exposición visual de la superficie	74
4.2.3 Control del análisis de visibilidad	74
4.2.4 Procesamiento de puntos de observación	78
4.2.5 Selección de puntos de observación.....	79

4.2.6 Determinación de prioridades de observación.....	80
4.3 Evaluación Multicriterio para la identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales	83
4.3.1 Decisión multicriterio	84
4.3.2 Selección de criterios	87
4.3.3 Tratamiento de criterios	88
4.3.4 Normalización de criterios	89
4.3.5 Método de comparación por pares de Saaty	90
4.3.6 Diseño de la jerarquía	91
4.3.7 Proceso de evaluación.....	91
4.3.8 Sumatoria Lineal Ponderada	99
4.4 Generación del modelo de predicción y probabilidad de incendios forestales con la metodología de Autómatas Celulares.....	102
4.4.1 Descripción del software para el modelamiento.....	102
4.4.2 Interfaz gráfica.....	102
4.4.3 Estructura y formato de datos.....	103
4.4.4 Desarrollo del modelo.....	104
CAPÍTULO V	156
ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS	156
5.1 Concentración de focos de incendio.....	156
5.2 Puntos de observación y cuencas visuales para incendios forestales.....	161
5.3 Lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales.....	167
5.4 Predicción y probabilidad de incendios forestales con la metodología de Autómatas Celulares	170
5.4.1 Calibración.....	170
5.4.2 Validación.....	178
CAPÍTULO VI	180
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	180
6.1 Conclusiones	180
6.2 Recomendaciones	185
BIBLIOGRAFÍA	187

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Trabajos relacionados a la aplicación de Autómatas Celulares	3
Tabla 2.1: Áreas afectadas por incendios forestales en el DMQ desde el 2000 al 2012.....	24
Tabla 2.2: Análisis histórico de los incendios forestales en el DMQ	25
Tabla 2.3: Áreas quemadas por tipo de material.....	25
Tabla 3.1: Categorías, clases y subclases del mapa de cobertura vegetal del DMQ	38
Tabla 3.2: Índice de combustibilidad del mapa de cobertura vegetal del DMQ (Nivel III).....	43
Tabla 3.3: Clasificación de la pendiente del terreno	48
Tabla 3.4: Clasificación de la orientación del terreno.....	50
Tabla 3.5: Número de focos de incendio en el DMQ por año desde el 2000 al 2012.....	54
Tabla 3.6: Humedad relativa de los dos últimos trimestres de los años 1997 al 2012.....	58
Tabla 3.7: Precipitación de los dos últimos trimestres de los años 1997 al 2012... ..	59
Tabla 3.8: Temperatura de los dos últimos trimestres de los años 1997 al 2012....	60
Tabla 3.9: Superficie de ocupación de las áreas artificiales en el DMQ.....	62
Tabla 3.10: Superficie de ocupación de las áreas cultivadas en el DMQ	65
Tabla 4.1: Concentración de focos de incendio en el DMQ desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012.....	70
Tabla 4.2: Restricciones de observación para el control del análisis de visibilidad.....	79
Tabla 4.3: Criterios y objetivos en la Evaluación Multicriterio.....	84
Tabla 4.4: Criterios y sus factores para la evaluación.....	87
Tabla 4.5: Consideración de los criterios y sus factores para la evaluación.....	89
Tabla 4.6: Escala de Saaty	92
Tabla 4.7: Matriz de comparación biunívoca.....	93
Tabla 4.8: Cálculo de los autovectores (W_i).....	94
Tabla 4.9: Cálculo de los pesos parciales (P_i)	95
Tabla 4.10: Cálculo de los autovectores normalizados (T_i).....	96
Tabla 4.11: Cálculo del factor λ_i	97
Tabla 4.12: Valores del índice de consistencia aleatoria (RCI).....	98
Tabla 4.13: Criterios y pesos obtenidos con el modelo APH	100
Tabla 5.1: Focos de incendio en el DMQ de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre desde el año 2000 al 2012.....	156
Tabla 5.2: Distribución de los focos de incendio por parroquia rural en el DMQ	158

Tabla 5.3: Distribución de los puntos de observación para la detección de incendios forestales por administración zonal en el DMQ	161
Tabla 5.4: Distribución de los tipos de puntos de observación para la detección de incendios forestales por administración zonal en el DMQ	163
Tabla 5.5: Distribución de los puntos de observación para la detección de incendios forestales y su área de cobertura en el DMQ	163
Tabla 5.6: Criterios y pesos obtenidos con el modelo APH	167
Tabla 5.7: Matriz de cambio Single Step	170
Tabla 5.8: Matriz de cambio Multi Step	170
Tabla 5.9: Transiciones generadas	171
Tabla 5.10: Transición: 1→2 Variable: var_static/orientación.....	174
Tabla 5.11: Transición: 1→2 Variable: var_static/río_1	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Ubicación del Distrito Metropolitano de Quito.....	6
Figura 2.1: Elementos del triángulo de fuego.....	9
Figura 2.2: Propagación del fuego	11
Figura 2.3: Incendio circular.....	12
Figura 2.4: Incendio elíptico.....	12
Figura 2.5: Incendios irregulares.....	13
Figura 2.6: Partes de un incendio	14
Figura 2.7: Incendio de superficie	14
Figura 2.8: Incendio de copas.....	15
Figura 2.9: Incendio de subsuelo.....	15
Figura 2.10: Triangulo y tetraedro de comportamiento del fuego	16
Figura 2.11: Brotes verdes de pino en diciembre del 2008 (izq.) y pinar quemado en el verano de septiembre del 2007 (der.) en el área de Montaña Lina – España	18
Figura 2.12: Árboles de eucalipto (izq.) y bosque de eucalipto quemado en junio del 2012 (der.) en la Loma de Guayabillas - Ecuador.....	19
Figura 2.13: Datos vector y raster en la representación de objetos del mundo real.....	28
Figura 2.14: Tipos de datos vector	29
Figura 2.15: Celdas de un raster	29
Figura 2.16: Estructura del raster	30
Figura 2.17: Representación de datos discretos en formato raster	31
Figura 2.18: Representación de datos continuos en formato raster	32
Figura 3.1: Cobertura vegetal (Nivel III).....	41
Figura 3.2: Índice de combustibilidad a partir de la cobertura vegetal (Nivel III).....	45
Figura 3.3: Modelo digital de elevación	47
Figura 3.4: Pendientes del terreno.....	49
Figura 3.5: Orientación del terreno	51
Figura 3.6: Focos de incendio en el DMQ desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012	54
Figura 3.7: Humedad relativa del tercer trimestre (izq.) y cuarto trimestre (der.) de los años 1997 al 2012.....	58
Figura 3.8: Precipitación del tercer trimestre (izq.) y cuarto trimestre (der.) de los años 1997 al 2012.....	59
Figura 3.9: Temperatura del tercer trimestre (izq.) y cuarto trimestre (der.) de los años 1997 al 2012.....	60
Figura 3.10: Áreas artificiales del DMQ.....	64
Figura 3.11: Áreas cultivadas del DMQ	66
Figura 4.1: Modelo espacial para la determinación de la concentración de focos de incendios forestales en el DMQ.....	68

Figura 4.2: Concentración de focos de incendio en el DMQ desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012.....	71
Figura 4.3: Modelo espacial para la ubicación de puntos de observación y generación de cuencas visuales para incendios forestales	73
Figura 4.4: Parámetros para controlar los análisis de cuenca visual	75
Figura 4.5: Desplazamiento de visibilidad	76
Figura 4.6: Direcciones de acimut de visibilidad	77
Figura 4.7: Límites del ángulo vertical de visibilidad.....	77
Figura 4.8: Radio de visibilidad	78
Figura 4.9: Distribución de los puntos de observación para incendios forestales en el DMQ.....	82
Figura 4.10: Modelo espacial para la identificación lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales	85
Figura 4.11: Valoración de áreas óptimas para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales	101
Figura 4.12: Cubo de datos raster.....	104
Figura 4.13: Estructura de la matriz de transición.....	104
Figura 4.14: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> (focos de incendio 2001) y <i>Determine Transition Matrix</i>	105
Figura 4.15: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> (focos de incendio 2009) y <i>Determine Transition Matrix</i>	106
Figura 4.16: Intervalo de tiempo entre los raster de focos de incendio inicial y final.....	106
Figura 4.17: Conexión interna entre el <i>Determine Transition Matrix</i> y <i>Save Lookup Table</i>	107
Figura 4.18: Estructura del <i>Cubo Raster</i>	109
Figura 4.19: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> y <i>Create Cube Map (Number and Name Map)</i>	110
Figura 4.20: Conexión interna entre <i>Create Cube Map</i> y <i>Save Map</i>	110
Figura 4.21: Estructura para la determinación de pesos de evidencia	111
Figura 4.22: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> y <i>Calc Distance Map</i> ..	112
Figura 4.23: Conexión interna entre <i>Calc Distance Map</i> y <i>Name Map</i>	112
Figura 4.24: Conexión interna entre <i>Load Map</i> y <i>Name Map</i>	113
Figura 4.25: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> (focos de incendio 2001) y <i>Determine Weights of Evidence Ranges</i>	113
Figura 4.26: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> (focos de incendio 2009) y <i>Determine Weights of Evidence Ranges</i>	114
Figura 57: Categorización de las variables dentro del <i>functor Determine Weights of Evidence Ranges</i>	115
Figura 4.28: Conexión interna entre <i>Determine Weights of Evidence Ranges</i> y <i>Save Weights</i>	116

Figura 4.29: Estructura del cálculo de coeficientes de los pesos de evidencia	116
Figura 4.30: Conexión interna entre <i>Calc Distance Map</i> y <i>Name Map</i>	117
Figura 4.31: Conexión interna entre <i>Load Map</i> y <i>Name Map</i>	118
Figura 4.32: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> (focos de incendio 2009) y <i>Determine Weights of Evidence Coefficients</i>	118
Figura 4.33: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> (focos de incendio 2009) y <i>Determine Weights of Evidence Coefficients</i>	119
Figura 4.34: Conexión interna entre <i>Load Weights</i> y <i>Determine Weights of Evidence Coefficients</i>	119
Figura 4.35: Conexión interna entre <i>Determine Weights of Evidence Coefficients</i> y <i>Save Weights</i>	120
Figura 4.36: Estructura del cálculo de coeficientes de correlación	121
Figura 4.37: Conexión interna entre <i>Calc Distance Map</i> y <i>Name Map</i>	122
Figura 4.38: Conexión interna entre <i>Load Map</i> y <i>Name Map</i>	122
Figura 4.39: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> (focos de incendio 2001) y <i>Determine Weights of Evidence Coefficients</i>	123
Figura 4.40: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> (focos de incendio 2009) y <i>Determine Weights of Evidence Coefficients</i>	123
Figura 4.41: Conexión interna entre <i>Load Weights</i> y <i>Determine Weights of Evidence Coefficients</i>	124
Figura 4.42: Conexión interna entre <i>Determine Weights of Evidence Coefficients</i> y <i>Save Weights</i>	124
Figura 4.43: Estructura del modelo de simulación	126
Figura 4.44: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> y <i>Mux Categorical Map</i>	127
Figura 4.45: Conexión interna entre <i>Patcher</i> y <i>Mux Categorical Map</i>	128
Figura 4.46: Conexión interna entre <i>Mux Categorical Map</i> y <i>Calc Distance Map</i> ...	128
Figura 4.47: Conexión interna entre <i>Load Lookup Table</i> y <i>Calc Change Matrix</i>	129
Figura 4.48: Conexión interna entre <i>Mux Categorical Map</i> y <i>Calc Change Matrix</i> ..	129
Figura 4.49: Conexión interna entre <i>Load Map</i> y <i>Name Map</i>	130
Figura 4.50: Conexión interna entre <i>Calc Distance Map</i> y <i>Name Map</i>	130
Figura 4.51: Conexión interna entre <i>Load Weights</i> y <i>Calc W. of E. Probability Map</i>	131
Figura 4.52: Conexión interna entre <i>Mux Categorical Map</i> y <i>Calc W. of E. Probability Map</i>	131
Figura 4.53: Valor de los parámetros en la función <i>Patcher</i>	132
Figura 4.54: Conexión interna entre <i>Calc W. of E. Probability Map</i> y <i>Patcher</i>	133
Figura 4.55: Conexión interna entre <i>Mux Categorical Map</i> y <i>Patcher</i>	133
Figura 4.56: Conexión interna entre <i>Calc Change Matrix</i> y <i>Patcher</i>	134
Figura 4.57: Número de iteraciones programadas dentro del <i>functor Repeat</i>	134
Figura 4.58: Conexión interna entre <i>Calc W. of E. Probability Map</i> y <i>Save Map</i> (mapas de probabilidades)	135

Figura 4.59: Conexión interna entre <i>Patcher</i> y <i>Save Map</i> (mapas de simulación).....	135
Figura 4.60: Matrices obtenidas de la construcción y ejecución del modelo de simulación	136
Figura 4.61: Estructura del modelo de simulación con formación de parches.....	137
Figura 4.62: Estructura de la validación de la simulación mediante una función exponencial de decaimiento.....	139
Figura 4.63: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map</i> y <i>Number Map</i>	140
Figura 4.64: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map (Calculate Map of Final Landscape Map)</i> y <i>Calculate Reciprocal Similarity Map</i>	140
Figura 4.65: Conexión interna entre <i>Load Categorical Map (Calculate Map of Simulated Changes)</i> y <i>Calculate Reciprocal Similarity Map</i>	141
Figura 4.66: Conexión interna entre <i>Calculate Reciprocal Similarity Map</i> y <i>Number Value (value #1)</i>	141
Figura 4.67: Conexión interna entre <i>Calculate Reciprocal Similarity Map</i> y <i>Number Value (value #2)</i>	142
Figura 4.68: Conexión interna entre <i>Calculate Reciprocal Similarity Map</i> y <i>Map (If then)</i>	142
Figura 4.69: Conexión interna entre <i>Calculate Value</i> e <i>If then</i>	143
Figura 4.70: Conexión interna entre <i>Calculate Reciprocal Similarity Map</i> y <i>Map (If not then)</i>	143
Figura 4.71: Conexión interna entre <i>Calculate Value</i> e <i>If Not Then</i>	143
Figura 4.72: Conexión interna entre <i>Map (If Then)</i> y <i>Map Junction</i>	144
Figura 4.73: Conexión interna entre <i>Map (If Not Then)</i> y <i>Map Junction</i>	144
Figura 4.74: Estructura de la validación de la simulación usando ventanas múltiples y una función de decaimiento constante.....	146
Figura 4.75: Conexión interna entre <i>Step</i> y <i>Set Lookup Table Value</i>	147
Figura 4.76: Conexión interna entre <i>Calculate Value</i> y <i>Set Lookup Table Value</i>	147
Figura 4.77: Conexión interna entre <i>Mux Lookup Table</i> y <i>Set Lookup Table Value</i>	147
Figura 4.78: Conexión interna entre <i>Step</i> y <i>Calculate Reciprocal Similarity Map</i>	148
Figura 4.79: Conexión interna entre <i>Set Lookup Table Value</i> y <i>Mux Lookup Table</i>	148
Figura 4.80: Estructura de la ejecución de la simulación con formación de parches y expansiones	150
Figura 4.81: Conexión interna entre <i>Calc Change Matrix</i> y <i>Modulate Change Matrix</i>	151
Figura 4.82: Conexión interna interna entre <i>Calc W. of E. Probability Map</i> y <i>Expander</i>	151
Figura 4.83: Conexión interna entre <i>Mux Categorical Map</i> y <i>Expander</i>	152
Figura 4.84: Conexión interna entre <i>Modulate Change Matrix</i> y <i>Expander</i>	152

Figura 4.85:	Conexión interna entre <i>Expander</i> y <i>Add Change Matrix</i>	153
Figura 4.86:	Conexión interna entre <i>Modulate Change Matrix</i> y <i>Add Change Matrix</i>	153
Figura 4.87:	Conexión interna entre <i>Expander</i> y <i>Patcher</i>	153
Figura 4.88:	Conexión interna entre <i>Add Change Matrix</i> y <i>Patcher</i>	154
Figura 4.89:	Estructura de modelo de proyección	155
Figura 5.1:	Distribución de la concentración de focos de incendio por parroquia en el DMQ.....	160
Figura 5.2:	Distribución de los puntos de observación para incendios forestales en las administraciones zonales del DMQ.....	162
Figura 5.3:	Distribución de los puntos de observación para incendios forestales con sus cuencas visuales	166
Figura 5.4:	Áreas óptimas para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales	169
Figura 5.5:	Cubo <i>Raster</i> visto desde <i>Map View</i>	171
Figura 5.6:	Variables estáticas dentro del Cubo <i>Raster</i> visto desde el <i>Map View</i>	172
Figura 5.7:	Ejemplo del armazón de los pesos de evidencia.....	173
Figura 5.8:	Pesos de evidencia, Transición: 1 →2.....	176
Figura 5.9:	Pesos de evidencia, Transición: 2 →1.....	177
Figura 5.10:	Modelo de simulación de focos de incendio de año 2013	178
Figura 5.11:	Modelo de probabilidad de focos de incendio	179

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1: Hectáreas de vegetación natural en las parroquias rurales del DMQ.....	40
Cuadro 4.1: Focos de incendio en el DMQ de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre desde el año 2000 al 2012	69
Cuadro 5.1: Focos de incendio en el DMQ de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre desde el año 2000 al 2012	157
Cuadro 5.2: Distribución de los focos de incendio por parroquia rural en el DMQ	159

GLOSARIO

AC: Autómata Celular

APH: *Analytic Hierarchy Process* (en español Proceso Analítico Jerárquico)

CBDMQ: Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito

DMQ: Distrito Metropolitano de Quito

EPMAPS: Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento

EPMMOP: Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas

ESRI: *Enviromental Systems Research Institute*

FAO: *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (en español Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)

GAD: Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Pichincha

IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

IGM: Instituto Geográfico Militar

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales

INAMHI: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

MDMQ: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito

MECN: Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales

MDE: Modelo digital de elevación

SAMDMQ: Secretaría de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito

SIG: Sistema de Información Geográfica

RESÚMEN

El modelamiento espacial relacionado a la gestión de incendios forestales para el Distrito Metropolitano de Quito, permite su orientación a varias aplicaciones operativas planteadas en este estudio para: la predicción de incendios forestales (con el modelamiento mediante la información que incluye variables que fueron organizadas como: bióticas, físicas, meteorológicas y antrópicas; para la generación del modelo de predicción y probabilidad de incendios forestales con la técnica de Autómatas Celulares), detección de incendios (para el emplazamiento de puntos de observación considerando áreas con gran visibilidad desde las que se cubra la mayor parte del terreno mediante la generación de cuencas visuales y el conocimiento de cuáles son las áreas de mayor peligro de incendios forestales), extinción de incendios (mediante la identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales utilizando la Evaluación Multicriterio) y la evaluación de los incendios (con la identificación de áreas de concentración de focos de incendio).

Palabras clave: autómatas celulares, cuencas visuales, focos de incendio, incendios forestales, reservorios de agua

SUMMARY

The spatial modeling related to forest fire management for the Metropolitan District of Quito, allows multiple applications operating orientation raised in this study: forest fire prediction (with information modeling by including variables that were organized as: biotic, physical, meteorological and anthropogenic, to generate the prediction model and likelihood of forest fires cellular automata technique), fire detection (for the location of observation points considering areas with high visibility from which will cover most of the field by generating viewshed and knowledge of what are the areas of greatest risk of forest fires), fire suppression (by identifying optimal locations for placement of water storage infrastructure for wildfire mitigation using multicriteria evaluation) and assessment of fires (with the identification of areas of concentration of wildfire hotspots).

Keywords: cellular automata, viewshed, wildfire hotspots, wildfires, water reservoirs

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

Hallazgos arqueológicos y etnológicos sustentan la teoría de que el fuego ha sido utilizado por el hombre para modificar su ambiente geográfico. La quema de vegetación se ha utilizado en algunos sistemas socioeconómicos para la regeneración de pastos, eliminación de especies faunísticas dañinas, disminución de la vegetación natural para establecer cultivos, etc. Éstas técnicas que forman parte de la tradición de campesinos, pequeños productores y pueblos indígenas, son practicadas en diversas zonas del Planeta a fin de establecer nuevos espacios aptos para la agricultura (Chuvieco & Martín, 2004).

Según la FAO (2010), para algunos ecosistemas del planeta, los incendios son esenciales para mantener su biodiversidad, dinámica y productividad; puesto que inducen su regeneración, conservan o mejoran la biodiversidad, capacidad de carga de los sistemas pastoriles y productividad agrícola. Además, el fuego constituye una herramienta importante en el manejo de las tierras agrícolas, mediante el uso de incendios controlados. Sin embargo, el fuego muchas veces avanza sin control afectando vegetación boscosa, biomasa y tierras de cultivo, lo que causa erosión en el suelo por el agua y viento.

De acuerdo a Denham (2009), en la actualidad existen distintas estrategias, estudios, herramientas, planes, etc., para la prevención de incendios, definición de áreas de riesgo, reducción de los efectos del fuego, mejoramiento de la seguridad de las personas implicadas, etc. Sin embargo, llevar a cabo estas actividades no es sencillo, pues se debe trabajar con factores bióticos, físicos, meteorológicos y humanos (comportamiento de la población); los cuales a más de interactuar entre sí, poseen su propio patrón de comportamiento, resultando un sistema heterogéneo y complejo. Es por esto, que han sido creadas y desarrolladas herramientas de ayuda al hombre en la lucha contra el fuego, las mismas que son decisivas para la disminuir los daños a la propiedad privada y pública, evitar pérdidas económicas y materiales, reducir la propagación del fuego y el riesgo a las personas afectadas por el fuego. Algunas de estas herramientas son informáticas, aplicadas en la predicción y simulación del comportamiento del fuego, las cuales pueden variar en el modelo de fuego implementado, cantidad y tipo de entradas, formato y cantidad de salidas, nivel de conocimiento del usuario, tipo de fuego que simulan, etc.

Para la representar el comportamiento y propagación del fuego, se han diseñado distintos modelos y técnicas que difieren unos de otros ya que las condiciones donde se desarrolla el fuego son distintas y su comportamiento es diverso.

Los modelos de comportamiento del fuego utilizan datos específicos del sitio donde se desarrolla el fuego. Estos modelos que predicen la propagación del fuego son: estadístico, físico, físico – estadístico y probabilístico.

Los simuladores utilizan, a más de un modelo para el comportamiento del fuego, técnicas de simulación que permiten la representación de la propagación del fuego en el terreno, entre las cuales se encuentran: *bond percolation*, propagación elíptica y Autómatas Celulares; poniendo mayor énfasis a ésta última por ser empleada para el presente estudio.

La técnica de Autómatas Celulares representa el terreno como una malla de celdas, donde cada una de ellas contiene valores; cada celda presenta un estado inicial y un conjunto de reglas aplicadas para todas ellas. Los Autómatas Celulares fueron desarrollados por Jonh Von Neumann como herramienta para la investigación de los sistemas autorreproductivos; actualmente son usados en el modelamiento y simulación de fenómenos urbanos (Aguilera, Carrillo, & Grageda, 2001). Es por ello que esta técnica ha sido empleada para el modelamiento de usos del suelo y predicción y simulación de los incendios forestales en el ámbito internacional; siendo expuesta en congresos y aplicada en proyectos tal como se indica en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1: Trabajos relacionados a la aplicación de Autómatas Celulares

Autor/es	Tema	Año de publicación
Francos A.	Algunas técnicas para el análisis y la prevención ante riesgos naturales de incendios, deslizamientos e inundaciones.	2008
Peredo M. & Ramallo R.	Aplicación de Autómatas Celulares a simulación básica de incendios forestales.	2003
Denham	Predicción de la evolución de los incendios forestales guiada dinámicamente por datos.	2009
REDDAF Consortium	Reducing emissions from deforestation and degradation in Africa.	2012
Astudillo T. & Huilcamaigua S.	Utilización de Autómatas Celulares para modelar el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal y su comparación con técnicas alternativas. Caso de estudio: Sector comprendido entre agrícola Payamino y Callanayacu, provincia de Orellana.	2011
Recopilación: Aguilar H. & Suárez R. (2013)		

1.2 Justificación

Existen ciertos ecosistemas forestales que dependen del fuego para su regeneración, mientras que los más vulnerables pueden quedar devastados por los incendios; los cuales no solamente afectan las funciones y servicios de los bosques, sino también a bienes materiales e incluso a vidas humanas y sus medios de vida.

Según estimaciones de la FAO (2010), anualmente se ven afectadas 350 millones de hectáreas de bosque por los incendios forestales, el 95% de ellos a causa de la actividad humana; constituyéndose menos del 10% de todas las ocurrencias como quemas controladas, mientras que las demás se denominan incendios forestales, los mismos que en promedio, afectan al 1% de todo el bosque mundial cada año.

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), entre los meses de junio y septiembre del año 2012, se registraron 2.565 incendios forestales, que quemaron 3.796 hectáreas. De acuerdo a un análisis realizado por el Área de Estudios e Investigaciones Climáticas del INAMHI sobre el comportamiento de las precipitaciones entre el 2009 y 2012 (años caracterizados por su déficit de lluvias), durante junio, julio, agosto y septiembre (meses críticos por la ausencia de lluvias), con los monitoreos de las estaciones Iñaquito (norte) y La Tola (Tumbaco), determinó que en los últimos años el estado del tiempo ha sido muy irregular, por lo que la ciudad tuvo un periodo seco bastante intenso el cual fue un factor determinante para los incendios forestales (El Comercio (a), 2012).

Debido al gran número de incendios forestales ocurridos en el DMQ durante la época seca del año 2009 y 2012, se ha considerado la realización de aplicaciones operativas encaminadas a la gestión de incendios forestales relacionadas a su predicción (simulación y probabilidad de ocurrencia de incendios mediante la técnica de Autómatas Celulares), detección (emplazamiento de puntos de observación para la detección de incendios forestales), extinción (colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales) y evaluación (identificación de áreas de concentración de focos de incendio). Todo esto con la incorporación de los componentes espacial y temático de los datos en un mismo proceso, mediante las operaciones que presenta un Sistema de Información Geográfica (SIG) y su posterior integración en procesos más complejos a través del modelamiento espacial.

1.3 Descripción del área de estudio

El Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) tiene una superficie aproximada de 423.000 Ha, posee 32 parroquias urbanas y 33 rurales. En el sector urbano predomina la economía basada en el comercio, industria y servicios; mientras que en el sector rural destaca la agricultura, agroindustria y ganadería (MDMQ - Secretaría de Ambiente (a), 2011).

Altitudinalmente se encuentra desde los 500m en el noroccidente, hasta aproximadamente los 4.100m en la cordillera oriental y 4.800m de altitud en la cordillera occidental (Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN), 2009). La vegetación natural en el DMQ cubre el 72,3% del total de su territorio con 306.705 Ha, las áreas cultivadas corresponden al 20,54% con 87.112 Ha y las áreas

artificiales que representan el 5,83% ocupan 24.732 Ha (MDMQ - Secretaría de Ambiente (b), 2011).

1.4 Ubicación geográfica

El presente proyecto comprende el Distrito Metropolitano de Quito, perteneciente a la Provincia de Pichincha, Ecuador (*ver Figura 1.1*).



Figura 1.1: Ubicación del Distrito Metropolitano de Quito

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011)

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Identificar áreas vulnerables a incendios forestales aplicando un modelo de probabilidad y su subsecuente predicción potencial con la metodología de Autómatas Celulares en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ).

1.5.2 Específicos

- Identificar focos de incendios forestales en el DMQ y su recurrencia mediante datos proporcionados por el sistema de incendios del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE) desde el año 1997 al 2012.
- Generar un modelo de probabilidad y su subsecuente predicción potencial de incendios forestales con la metodología de Autómatas Celulares.
- Realizar un análisis de visibilidad (cuencas visuales), para la ubicación de puestos de observación fijos en el área de estudio para la alerta temprana y detección de un evento de incendio forestal.
- Identificar lugares óptimos para la construcción de infraestructura que sirva como abastecimiento de agua para la mitigación de incendios con un costo reducido y beneficio máximo.
- Levantar información de indicadores sociales, variables físicas y socioeconómicas de cada parroquia del DMQ.
- Estructurar y recopilar la información generada para su incorporación al Geoportál IDEESPE.

1.5.3 Metas

- Realizar un análisis y su mapa respectivo, sobre de las zonas de recurrencia de incendios forestales y su extensión durante los años 2000 al 2012 del área de estudio.
- Hacer el análisis y su mapa, acerca de las zonas de riesgo potencial y su probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, representado en un mapa.
- Establecer la ubicación de puestos de observación fijos para realizar una navegación, que simule un recorrido móvil del área de estudio y una visión en relieve desde el punto donde se ubica algún puesto de vigilancia específico. Además, representar en un mapa las visuales óptimas dentro de la zona de estudio.
- Generar un mapa de puntos estratégicos para la posible colocación de infraestructura de almacenamiento de agua eficiente para atención de incendios forestales.
- Crear una geodatabase y sus metadatos con los registros de las zonas afectadas por eventos de incendios forestales.
- Realizar tablas, datos estadísticos y tabulados de las variables e indicadores levantados para las parroquias del DMQ.
- Realizar un artículo científico para su publicación en una revista con SCI y exposición en un congreso internacional.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 Incendios forestales

2.1.1 Características de los incendios forestales

El fuego es una reacción química, producida por la ignición y combustión de materiales (*ver Figura 2.1*); siendo tres los elementos necesarios para que la combustión e ignición ocurran: aire para la contribución de oxígeno, combustible para arder y fuente de calor para elevar el combustible a la temperatura de ignición (Denham, 2009).

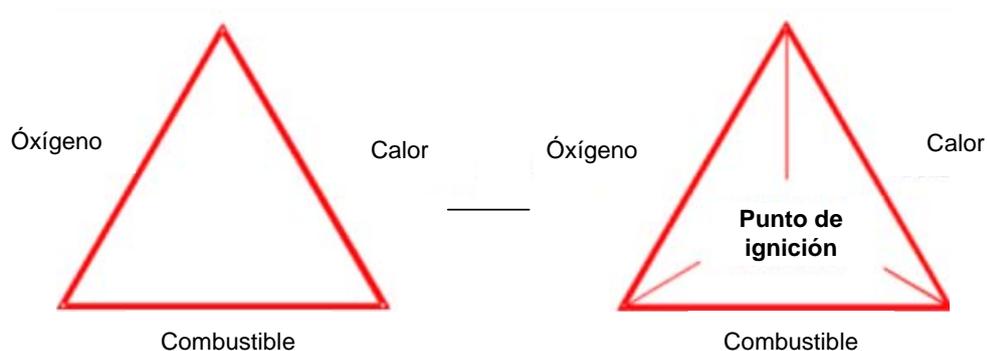


Figura 2.1: Elementos del triángulo de fuego

Fuente: Denham (2009)

2.1.2 Factores presentes en el inicio del fuego en el incendio forestal

La mejor forma para combatir un incendio es la prevención, razón por la cual se ha diseñado el triángulo de fuego para conocer y explicar cuáles son los elementos que se deben atacar preferiblemente antes del inicio de un incendio (Bonilla, 2001; Blanco et al, 2008).

Para prevenir o sofocar un incendio, como mínimo se debe reducir uno de los tres elementos presentes en el triángulo de fuego, por lo que es necesario saber lo que corresponde a cada uno de estos factores y enfocarlos hacia los incendios forestales:

- **Combustible:** Referente a un incendio forestal, es definido como toda la materia orgánica muerta y seca que se encuentra acumulada en el suelo natural de un área verde.
- **Calor:** Fuente de energía calorífica natural o artificial que interviene en este proceso dando paso a un punto de ignición.
- **Comburente:** Sustancia que interviene en el proceso de combustión, en este caso es el oxígeno, que se encuentra presente en la atmósfera en forma de gas y se transporta fácilmente por el aire en cantidades suficientes para sostener una combustión.

El triángulo de fuego permite comprender el inicio del proceso de combustión, desde cómo el material combustible en las condiciones adecuadas para que una fuente de calor natural o artificial entre en un proceso de combustión, haciendo que el combustible esté en punto de ignición y sea avivado por el oxígeno, el mismo que tiene que ser suficiente para dar el inicio a un incendio forestal.

2.1.3 Fenómenos físicos que propagan el incendio forestal

De acuerdo a Denham (2009), el fuego empieza en un punto específico y se propaga por el terreno debido a tres fenómenos (*ver Figura 2.2*):

- **Conducción:** Transmisión del calor desde una región con mayor temperatura a otra con menor temperatura, aumentándola a esta última.
- **Convección:** Movimiento ascendente de un fluido más caliente y menos denso, mientras que el menos denso y más frío desciende; existe transferencia de calor de una parte del fluido a otra parte del mismo.
- **Radiación:** Intercambio de calor entre sustancias que pueden estar separadas por un vacío.

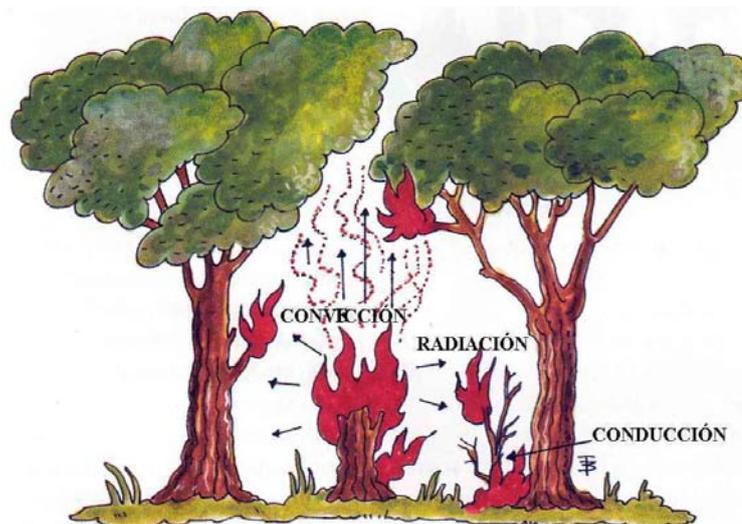


Figura 2.2: Propagación del fuego

Fuente: Blanco et al (2008)

2.1.4 Formas de un incendio forestal

- **Circular:** Presente en terrenos sin pendiente, con poco viento y combustible distribuido uniformemente (*ver Figura 2.3*).

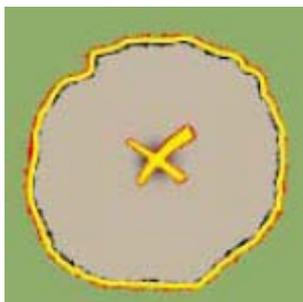


Figura 2.3: Incendio circular

Fuente: Bonilla (2001)

- **Elíptico:** Ocurre en un terreno llano, con diferentes tipos de combustible y viento fuerte circulando en una sola dirección (*ver Figura 2.4*).

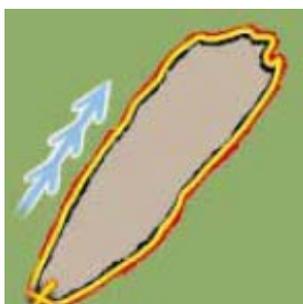


Figura 2.4: Incendio elíptico

Fuente: Bonilla (2001)

- **Irregular:** Depende de qué factor se presente como dominante, pudiendo ser el combustible, el topográfico o el viento (*ver Figura 2.5*).

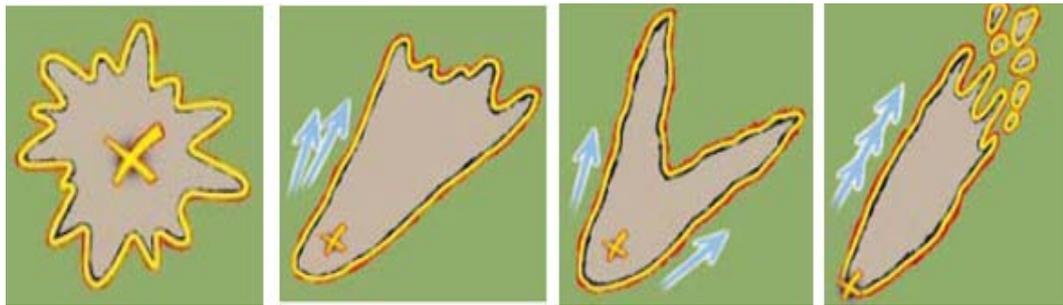


Figura 2.5: Incendios irregulares

Fuente: Bonilla (2001)

2.1.5 Partes de un incendio forestal

Según los Bomberos de Navarra (2002), el incendio forestal se lo divide en dos partes primordiales; la parte interna del incendio que es todo lo que queda consumido por el paso de la llama y la parte externa o perímetro, siendo aquí donde la combustión se presenta en forma física a través del fuego, el mismo que al presentar diferente comportamiento dentro del incendio se han identificado ciertas partes como (ver *Figura 2.6*):

- **Borde:** Perímetro del incendio que se encuentra en llamas.
- **Frente:** La parte del borde por donde el fuego avanza con más rapidez e intensidad.
- **Cola:** Zona que menos progresa
- **Flancos:** Contornos laterales.

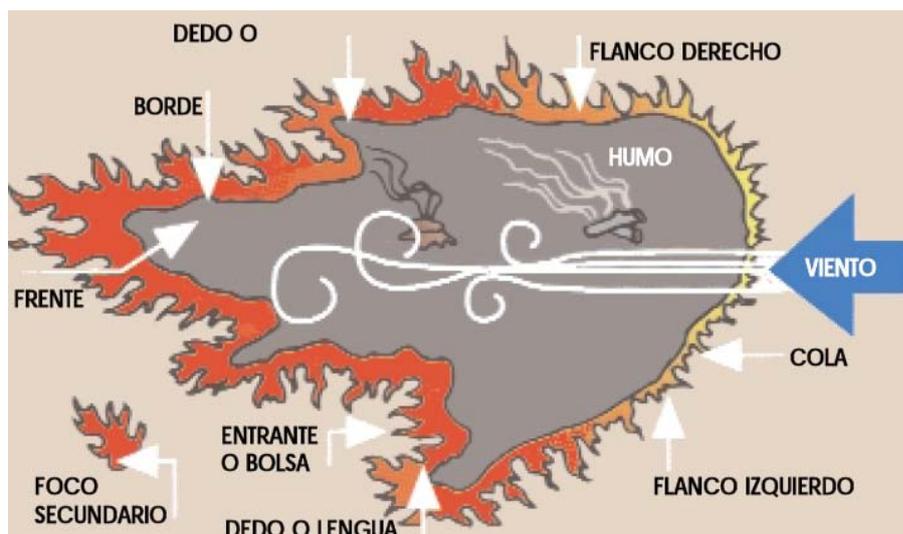


Figura 2.6: Partes de un incendio

Fuente: Bomberos de Navarra (2002)

2.1.6 Tipos de incendios forestales

La Junta de Andalucía (s.f), establece que dependiendo de la zona donde se inicie el fuego, los incendios forestales se definen como:

- **Superficiales:** Incendios que se propagan al ras de suelo, consumiendo arbustos, hierbas, material vegetal muerta, matorrales, pastos y vegetación menor. Estos incendios son los más comunes y frecuentes; además de ser los precursores para el inicio de otros tipos de incendios (*ver Figura 2.7*).

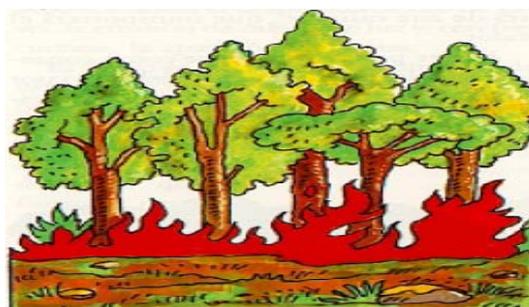


Figura 2.7: Incendio de superficie

Fuente: Junta de Andalucía (s.f)

- **De copas:** Denominados así porque el fuego se propaga por las copas de los árboles y tiende a desplazarse con rapidez. Son muy difíciles de extinguir, ya que al encontrarse en una altura considerable, el viento alcanza mayor fuerza y velocidad en la parte superior en relación al viento a nivel del suelo (*ver Figura 2.8*).

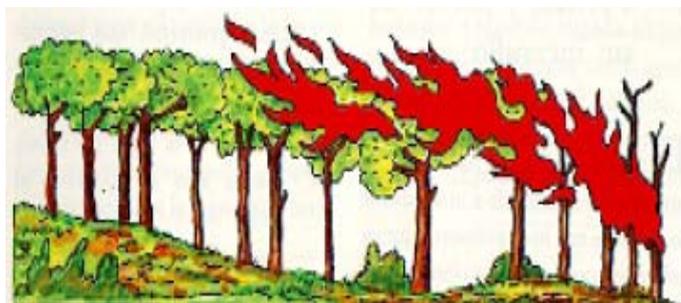


Figura 2.8: Incendio de copas

Fuente: Junta de Andalucía (s.f)

- **De subsuelo:** Incendios que se desplazan por debajo del suelo, consumiendo las raíces y la vegetación seca. Son difíciles de encontrar puesto que no producen humo pero y su avance es lento (*ver Figura 2.9*).



Figura 2.9: Incendio de subsuelo

Fuente: Junta de Andalucía (s.f)

2.1.7 Factores que rigen el comportamiento del fuego

El comportamiento de un incendio forestal está sujeto a las condiciones del lugar en el que este se dé, es por esto que Blanco et al (2008), lo ha dividido en tres factores generales (ver Figura 2.10):

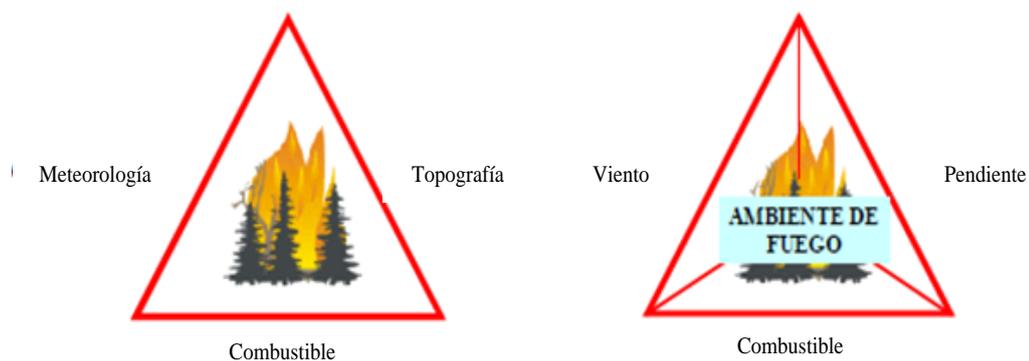


Figura 2.10: Triángulo y tetraedro de comportamiento del fuego

Fuente: Blanco et al (2008)

- **Meteorología:** Referente a todo aquello que se encuentra en la atmósfera y pueda ser de utilidad en el desarrollo del incendio forestal. Es así, que dentro de la meteorología existen factores específicos como: humedad relativa, nubes, precipitación, temperatura y viento; quienes son analizados de forma detallada ya que interactúan directamente con los incendios forestales, ayudando a determinar el tipo de incendio al que pertenece.
- **Topografía:** Engloba a factores específicos que ayudan a establecer el comportamiento del incendio como: altura, exposición, orientación, pendiente y rugosidad del terreno.
- **Combustible:** La vegetación es tomada en cuenta en referencia a los incendios forestales, ya que al ser analizada es posible determinar la intensidad de la llama

que está presente en un incendio. Se encuentra relacionada con: cantidad de carga, compactación, composición química, contenido de humedad, continuidad, forma y tamaño, densidad y ubicación.

Estos factores se encuentran ligados al comportamiento físico del fuego y suelen ser la entrada para los modelos de predicción y simulación de incendios forestales.

2.1.8 Incendios forestales provocados por la naturaleza

Los incendios forestales se presentan de forma natural en el planeta provocados por un rayos en una tormenta eléctrica o en una época seca donde la vegetación se encuentra deshidratada alcanzando un grado alto de combustibilidad; cuando este ocurre en función de factores ambientales y el ser humano no ha intervenido es catalogado como un fenómeno natural.

Como fenómeno natural, se encuentra en varios ecosistemas del mundo donde la fauna y flora han aprendido a convivir con él. Ejemplos claros de ello, son el pino canario (*Pinus canariensis*) y el eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill). El primero, ubicado en zonas mediterráneas, es el único tipo de conífera que resiste el fuego y tiene la capacidad de para mantener células vivas en el interior de la madera, que si no es afectada se encargan del nuevo brote (*ver Figura 2.11*). Dispersa sus semillas llamadas también piñones, por acción del viento, las cuales se abren con el calor (El Mundo, 2009).

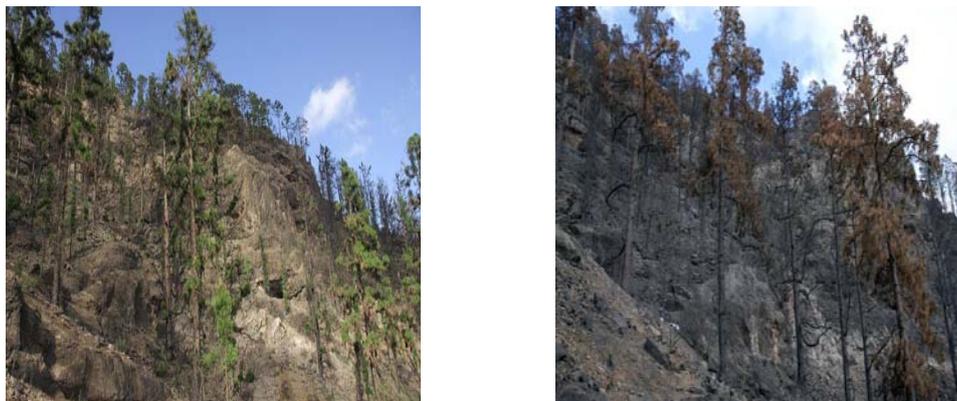


Figura 2.11: Brotes verdes de pino en diciembre del 2008 (izq.) y pinar quemado en el verano de septiembre del 2007 (der.) en el área de Montaña Lina – España

Fuente: El Mundo (2009)

El segundo, originario de Australia e introducido en la Sierra ecuatoriana durante la presidencia de Gabriel García Moreno por decreto, con el fin de obtener material de construcción y leña; se localiza especialmente en el callejón Interandino a alturas entre los 2.200 y 3.200m (*ver Figura 2.12*). Los árboles jóvenes son susceptibles al fuego, pero éste no causa su muerte. Durante los incendios del 2012 en Quito, algunos ecologistas señalaron que este árbol contribuye a la propagación de los incendios forestales ya que los aceites esenciales que contiene esta planta pudieron haber complicado el control de las llamas (Ecuador Forestal, 2013; El Comercio (b), 2012).



Figura 2.12: Árboles de eucalipto (izq.) y bosque de eucalipto quemado en junio del 2012 (der.) en la Loma de Guayabillas - Ecuador

Fuente: El Comercio (2012)

2.1.9 Incendios forestales provocados por el ser humano

De acuerdo a Chuvieco & Martín (2004), es importante considerar el factor humano en la planificación de las labores de gestión y protección contra incendios forestales. Este factor ha sido desestimado frente a los físicos (meteorológicos, topográficos y vegetación), muchas veces debido a la dificultad existente para modelar, representar y valorar espacialmente la influencia del ser humano en el inicio y propagación del fuego.

Un número importante de factores se encuentran relacionados con la percepción y actitud de la población, puesto que los incendios causados por el hombre se producen en un determinado ámbito geográfico, siendo el resultado de una pauta social originada en las condiciones ambientales y socioeconómicas de un sitio (Zárraga, 1990).

Los factores antrópicos relacionados con la ocurrencia de de los incendios forestales pueden ser en función de la existencia o no de intencionalidad.

a. Factores no intencionados

Factores relacionados directa o indirectamente con el riesgo de ignición y/o propagación, pero que no confirman la existencia de intencionalidad sino de negligencia. Más bien, se tratan de incendios con fines utilitarios, vinculados con el mantenimiento de actividades tradicionales en el área rural y las transformaciones socioeconómicas experimentadas en estas áreas; siendo algunas de ellas:

- **Transformaciones socioeconómicas:** Relacionadas al desarrollo económico y social que un país ha experimentado; caracterizado por la abandono de las zonas rurales hacia las urbanas, a razón de mayores posibilidades de empleo y suministro de servicios básicos. Este factor ha desencadenado ciertos efectos tales como:
 - Abandono de actividades tradicionales de monte.
 - Abandono de cultivos en tierras marginales.
 - Población rural envejecida.
 - Aumento de usos recreativos en áreas forestales.
 - Crecimiento de áreas urbanas.
 - Basureros mantenidos con fuego.
 - Desinterés por el monte y su conservación.

- **Mantenimiento de actividades económicas tradicionales en áreas rurales:** En el área rural el fuego es utilizado como herramienta cultural en para fines agrícolas, ganaderos y forestales; teniendo ciertas aplicaciones como:
 - **Agricultura:** Eliminación de los restos de cosechas anteriores y preparación del suelo para nuevas siembras.
 - **Ganadería:** Mantenimiento, regeneración de nuevos pastos y creación de zonas abiertas al ganado.
 - **Labores forestales:** Mantenimiento de zonas de cultivo forestal.

b. Factores que generan conflictos

Factores generadores de conflictos que pueden desembocar en el inicio intencionado de un incendio o favorecer su propagación.

Aquí destaca el factor económico, que influye en la aparición o resolución de conflictos manifestados con el uso del fuego intencionado; razón por la cual es importante tomar en cuenta otros factores que lo pueden condicionar, tales como el inducir el aumento de empleo en el monte, presión de la población, productividad o rentabilidad del sector forestal, uso del fuego forestal para la preparación del terreno, etc.

Junto al factor económico, otros de tipo sociológico como la acción de pirómanos, rencillas o venganzas se establecen como causas intencionadas de incendio.

2.1.10 Incendios forestales en el Ecuador

Paulatinamente, los incendios forestales han ido en aumento, causando grandes impactos ambientales, económicos y sociales. Las provincias que presentan mayor incidencia y potencialidad a este evento, han tenido grandes pérdidas en sus cultivos, plantaciones forestales y vegetación natural; por lo que se han visto obligados a invertir recursos e implementar planes de contingencia.

En el Ecuador, son pocos los incendios forestales que han sido provocados por fenómenos naturales, la mayoría de ellos se debe a la acción humana intencionada y no intencionada. Ésta última se da en regiones se dedicadas a la actividad agrícola, forestal y ganadera o que poseen ecosistemas de bosque secos.

Relativamente, la alta cantidad de incendios forestales afectan a la producción agrícola, mientras que otro se relaciona con la vegetación herbácea (páramos), arbustiva (matorrales), arbórea, bosques húmedos y secos de gran valor natural y social por su biodiversidad. Además, el alto porcentaje de tierras no legalizadas en el área rural, principalmente sobre los procesos legales de la tenencia de la tierra.

Según un informe de la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR), durante el periodo comprendido entre el 1 de junio hasta el 20 de septiembre del año 2012, se quemaron 17.484,560 Ha de bosque. Siendo la provincia de Pichincha con 2.458 incendios forestales, la que mayor número de ellos registra; le sigue Imbabura y Loja con 209 y 74 incendios, respectivamente. En cuanto a número de hectáreas de bosque quemadas, encabeza Imbabura con 2.630,910 Ha, continúan El Oro (2.333,5

Ha), Pichincha (2311 Ha aproximadamente) y Cotopaxi (2.029,05 Ha) (El Comercio (c), 2012).

2.1.11 Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito

De acuerdo a Estacio & Narváez (2012), el Cuerpo de Bomberos del DMQ (CBDMQ), reporta como incendios forestales aquellos relacionados con espacios periurbanos (laderas del Pichincha y zonas de protección) y espacios públicos con vegetación arbórea y arbustiva de la ciudad (bordes de quebradas espacios vacantes o espacios de recreación). Sus registros se relacionan con su “accesibilidad reactiva” para responder este tipo de emergencias; razón por la cual existen muchos eventos de los que no existen registros debido a su lejana localización respecto a la ciudad, como es el caso de los sitios boscosos. Según reportes del CBDMQ, en el año 2009 se estimaron 300 Ha afectadas por los incendios forestales; sin embargo, la Secretaría de Ambiente del MDMQ (SAMDMQ) determinó 2.700 Ha quemadas equivalentes al 0,6% del DMQ. A partir de esto, fueron establecidas zonas correspondientes a relieves de montaña donde las condiciones de actividades antrópicas, clima y vegetación favorecen a la generación de estos eventos, siendo las más importantes: el cerro Ilaló, volcanes Atacazo, Pichincha, Casitahua y los sectores de San José de Minas, Pomasqui y Guayllabamba.

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), entre los meses de junio y septiembre del año 2012, se registraron 2.565 incendios forestales, que quemaron 3.796 hectáreas. De las zonas afectadas, el 31% corresponde a herbazales y arbustos

secos, 24% a arbustos húmedos, 16% bosques húmedos, 13% pastos, 6% eucaliptos, 3% páramos, 4% cultivos y otros 3% (El Comercio (d, e y f), 2012).

Efectos tales como: daños en áreas naturales protegidas, destrucción de la infraestructura pública y privada, erosión del suelo al dejarlo descubierto provocando así problemas de deslaves y deslizamientos, migración y muerte de la fauna y flora endémica de determinadas zonas; todo esto, generando un importante gasto de recursos económicos y humanos para la mitigación y posterior recuperación de las áreas afectadas por los incendios forestales.

Aproximadamente en estos últimos 12 años, se ha evidenciado un aumento en la recurrencia de incendios forestales, provocando un daño ambiental enorme en el DMQ según un análisis estadístico realizado por el Cuerpo de Bomberos del Distrito Metropolitano de Quito (2012), que se muestra en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1: Áreas afectadas por incendios forestales en el DMQ desde el 2000 al 2012

Año	Área afectada (Ha)
2000	342
2001	1034
2002	441
2003	98
2004	583
2005	462
2006	208,3
2007	235
2008	28,6
2009	320
2010	91
2011	168,0

Fuente: Cuerpo de Bomberos del DMQ (2012)

A más del registro de los incendios forestales ocurridos en el DMQ, se ha identificado zonas de riesgo y áreas susceptibles a estos eventos (*ver Tabla 2.2*), con las áreas quemadas por el tipo de vegetación combustible quemada (*ver Tabla 2.3*).

Tabla 2.2: Análisis histórico de los incendios forestales en el DMQ

Zona	Sector en riesgo
1 Valle de Tumbaco	Lado oriental del cerro Ilaló, Cordillera Oriental, laderas de los ríos: Guambi, Chiche, San Pedro, Machángara, Guayllabamba, laderas del nuevo aeropuerto y zona franca
2 Valle de Los Chillos	Zonas ubicadas en la margen derecha e izquierda de los ríos Pita y San Pedro, El Tingo, Guangopolo e Ilaló
3 Eloy Alfaro	Unguí
4 La Delicia	Camino antiguo a Nono, Atucucho, El Condado y Quebrada Rumihurco.
5 Norte	Parque Metropolitano, La Pulida, Rumipamba, Atucucho, Carcelén, Puellaró, Perucho, Chavezpamba y San José de Minas
6 Calderón	Comité del Pueblo, La Bota y El Carmen
8 Quitumbe	Santa Rosa y Santospamba

Fuente: Cuerpo de Bomberos del DMQ (2012)

Tabla 2.3: Áreas quemadas por tipo de material

Material	Área afectada (Ha)	Porcentaje (%)
Arbolada	342	11,47
Matorral	1034	30,19
Pastizal	441	51,82
vegetación muerta	98	3,70
basura	583	2,71

Fuente: Cuerpo de Bomberos del DMQ (2012)

2.1.12 Áreas afectadas por incendios forestales en la época seca del año 2012

El 2012 se registró un alto índice de incendios forestales debido a la época seca, es así que los factores y las condiciones del ambiente se prestaron para que este

fenómeno se dé en el país. En la mayoría de los casos se determinó que el 90% de los incendios forestales fueron debido a la actividad humana. El verano se presentó antes de lo esperado según el INAMHI, quien dio a conocer que generalmente esta época seca es propia de los meses de julio hasta septiembre; sin embargo, en el año 2012 se empezó en junio.

La región Sierra fue la más afectada, especialmente las provincias de Pichincha, Imbabura, Tungurahua y Azuay, en las que no solo fueron afectadas la fauna y flora de las áreas protegidas o parque nacionales, sino también existieron pérdidas de vidas humanas y daños a la propiedad pública y privada, razón por la cual se declaró la alerta naranja.

En el DMQ se registró una gran cantidad de incendios forestales, por lo que fue necesario que el CBDMQ sea apoyado por brigadas militares, policía nacional y metropolitana y los cuerpos de bomberos de Guayas, Tungurahua, Baños, Pelileo, Patate, Mocha, Cevallos, etc.

2.2 Sistema de Información Geográfica

2.2.1 Definición

Según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (s.f), el término SIG proviene del acrónimo Sistema de Información Geográfica (en inglés GIS, *Geographic Information System*), definido como un conjunto de técnicas metodológicas para modelar variables, eventos y fenómenos geográficos mediante procesos manuales o automatizados, que permitan recopilar datos, almacenarlos, analizarlos (mediante

modelos) y presentar la información en forma de resultados entendibles para el usuario final, de manera local o a través de alguna forma de acceso público.

2.2.2 Datos geográficos

Los datos geográficos son entidades ubicadas espacialmente mediante un sistema de coordenadas que representan elementos u objetos pertenecientes a la superficie terrestre, que permiten la ubicación georreferenciada y la descripción de los eventos, variables y fenómenos espaciales, mediante características: geométricas y descriptivas.

2.2.3 Componentes de los datos geográficos

De acuerdo a Moreno (2008), los datos geográficos que un SIG integra corresponden a tres componentes o dimensiones: la espacial, la temática y la temporal.

2.2.4 Modelos de datos

Un modelo de datos geográfico es una representación de la realidad generado mediante la selección y simplificación de sus partes, que posee un sistema de referenciación. Además, define la manera en la cual se van a representar las características espaciales en un SIG.

Las reglas según las cuales se modeliza el mundo real por medio de objetos discretos constituyen el modelo de datos.

Resulta importante aclarar que “el ‘modelo de datos’ hace referencia a la conceptualización del espacio y ‘estructura de datos’ se refiere a la implementación de esa conceptualización” (IGAC, s.f). Siendo los tipos de modelos de datos: modelo vector y modelo *raster* (ver Figura 2.13).

VECTOR	Punto: establecimientos comerciales
	Línea: vías
	Polígono: barrios
RASTER	Pixel: alturas del terreno
	Pixel: tipo de suelo

Figura 2.13: Datos vector y *raster* en la representación de objetos del mundo real

Fuente: IGAC (s.f)

a. Modelo de datos vector

El modelo vector utiliza los elementos geométricos básicos: puntos, líneas y polígonos para representar los objetos geográficos discretos a elementos gráficos más simples. Los cuales basan su representación en vértices y segmentos (ver Figura 2.14).



Figura 2.14: Tipos de datos vector

Fuente: ESRI (2013)

b. Modelos de datos *raster*

El modelo *raster* utiliza una representación del mundo real no discreta, como sucede en el vector (interrumpida por puntos y líneas), sino continua, mediante una superficie dividida en celdas regulares organizadas en una cuadrícula de filas y columnas. Los objetos geográficos son representados por celdas, cada una de ellas se las conoce como *pixel* y “representan una cualidad cuantificable de observación, la mínima, representada en cada localización mediante un tono o color, que se traduce a un valor numérico o nivel digital (ND)” (Moreno, 2008) (ver *Figura 2.15*).

Celda

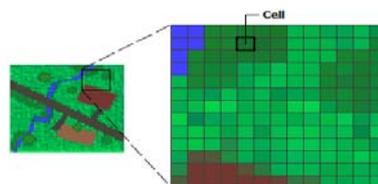


Figura 2.15: Celdas de un *raster*

Fuente: ESRI (2013)

Cada celda de un *raster* contiene un valor que representa información. A más de la proyección cartográfica, el sistema de coordenadas de los datos *raster*, incluye su tamaño de celda y una coordenada de referencia. Estas propiedades permiten describir los datos *raster* mediante una serie de valores de celda que comienzan en la fila superior izquierda.

El origen de un *raster* está situado en el extremo superior izquierdo, al contrario del sistema de coordenadas cartesiano cuyo origen se encuentra en el extremo inferior izquierdo (ver Figura 2.16).

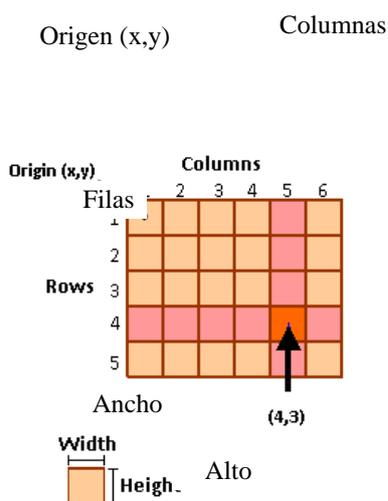


Figura 2.16: Estructura del *raster*

Fuente: ESRI (2013)

Es posible almacenar datos que representan fenómenos del mundo real en formato *raster*:

- **Datos discretos:** Representan objetos como el uso del suelo o datos del suelo (ver Figura 2.17).

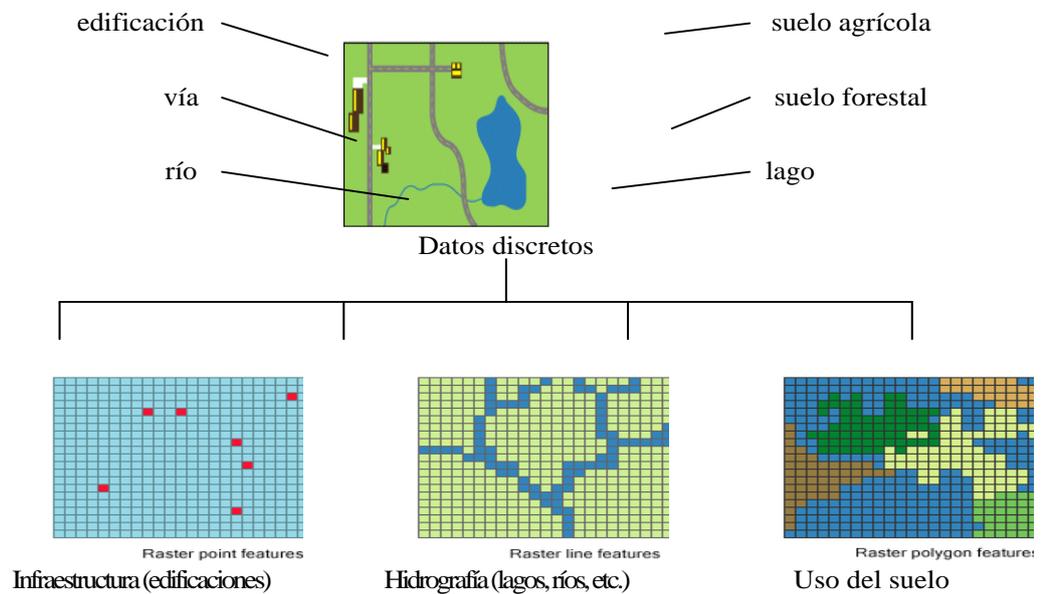


Figura 2.17: Representación de datos discretos en formato *raster*

Fuente: ESRI (2013)

- **Datos continuos:** Representan fenómenos como la temperatura o elevación, o datos espectrales como fotografías aéreas o imágenes satelitales (ver Figura 2.18).

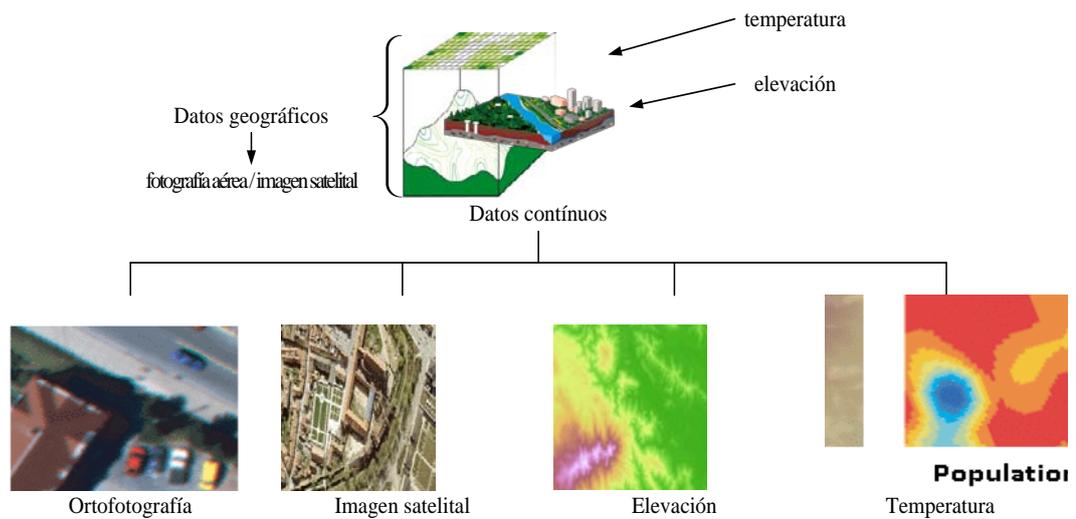


Figura 2.18: Representación de datos continuos en formato *raster*

Fuente: ESRI (2013)

2.3 Los Autómatas Celulares y la Vida Artificial

2.3.1 Introducción

El término de Vida Artificial se refiere al interés del ser humano por explicar y modelar la vida mediante el desarrollo de sistemas artificiales que demuestren la conducta de los seres vivos definiendo su comportamiento en función de reglas a través de modelos de simulación y herramientas informáticas. Es por ello que los Autómatas Celulares (AC) teniendo como objetivo el fenómeno de autoreproducción, tienden a imitar procesos y comportamientos de los seres vivos, lo que conlleva a ser tomados en cuenta como ejemplo de búsqueda de inteligencia y desarrollo de la Vida Artificial (López, 2011).

2.3.2 Antecedentes

En 1987 durante la Primera Conferencia Internacional de la Síntesis y Simulación de Sistemas Vivientes, evento dedicado a la investigación científica multidisciplinaria en el campo ambiental, computacional y social; un grupo de investigadores encabezados por Christopher Langton propusieron por primera vez el término Vida Artificial. Esta reunión se enfocó en la necesidad de comprender y así desarrollar modelos matemáticos que contribuyan a explicar los sistemas complejos que la vida y el mundo presentan. Los participantes concluyeron que los modelos lineales y ciertos cambios en sus parámetros afectaban gran parte de su comportamiento, lo cual impedía describir muchos de los fenómenos naturales, razón por la que decidieron utilizar modelos no lineales.

En la década de 1930, la Vida Artificial tiene sus bases en las ideas de Alan Turing, las cuales contribuyeron al diseño y construcción de una máquina que era capaz de realizar operaciones de manipulación de símbolos, lectura e interpretación de instrucciones.

Durante los años 40, John Von Neumann con la colaboración de Stanislaw Ullam, en su propósito por desarrollar una máquina capaz de autoreplicarse, es decir, una máquina que construya otras a partir de sí misma, obtuvo un modelo matemático definido bajo ciertas reglas, el cual definió la Teoría de Autómatas Celulares publicado en el libro "*Theory of Self-reproducing Automata*" (Juárez, 2006, López, 2001; Reyes, 2011).

2.3.3 Definición de Autómata Celular

Un Autómata Celular (AC) constituye un modelo matemático para un sistema dinámico, que se encuentra compuesto por un conjunto de celdas ordenadas en fila, en forma de matriz o en tres dimensiones; las cuales actualizan su estado o valor a partir del estado previo de cada celda y de sus vecinas en un determinado periodo de tiempo. La regla que rige el cambio de un estado a otro del conjunto de celdas, se establece según una expresión matemática conocida como regla de transición local; esta regla determina que la transición sea la misma para todas las celdas y es una función de los estados de las celdas vecinas. Los estados varían de un momento a otro en unidades de tiempo discreto, las cuales son posibles de cuantificar con valores enteros a intervalos regulares (León & Basurto, 2008; López, 2011; Paredo & Ramallo, 2003; Reyes, 2011).

2.3.4 Elementos de un Autómata Celular

Según López (2011), Paredo & Ramallo (2003) y Reyes (2011), un AC consta de los siguientes elementos:

- **Espacio celular:** Red n celdas de estado finito, cada una de ellas posee un patrón idéntico de conexiones locales con otras celdas, con condiciones de límite, si se trata de una red finita.
- **Conjunto de estados:** Es finito y en cada instante la celda debe tomar un valor de este conjunto de estados.
- **Reglas de transición:** Reglas que determinan el comportamiento del autómata celular, las cuales definen el cambio de estado de cada celda en función de sus

propios estados previos y de sus vecinas en un instante determinado. Está conformada de una celda central y sus vecindades.

- **Vecindades:** Define el conjunto de celdas y su posición relativa respecto a cada una de ellas. Cada celda actualiza su estado junto con el de las celdas conectadas a ellas, a partir del suyo y del grupo de celdas que se encuentran a su alrededor que forman una vecindad. En la celda central de la vecindad es sobre la cual se realizan los cálculos

2.3.5 Tipos de límites

De acuerdo a Reyes (2011), para entender mejor la representación visual de un AC, los diferentes tipos de límites o fronteras del plano en el cual se desarrolla se clasifica en:

- **Frontera abierta:** Las celdas fuera del espacio del autómata toman un valor fijo.
- **Frontera reflectora:** Las celdas fuera del espacio del autómata toman los valores que están dentro.
- **Frontera periódica o circular:** Las celdas fuera de la frontera interactúan con sus vecinas inmediatas y con las que se encuentran en el extremo opuesto del arreglo.
- **Sin frontera:** La representación de autómata no tiene límites, es infinito. Esto solo es práctico cuando se cuenta con un software que simule la evolución del autómata.

2.3.6 Vecindad de un Autómata Celular

De acuerdo a la dimensión en la que se genere un AC (línea, espacio, plano, etc.), tendrá determinado número de vecinos:

- **Una dimensión:** La celda tendrá 2 vecinas.
- **Dos dimensiones:** La celda contará con 4 vecinas (arriba, abajo, derecha e izquierda) u 8 vecinas (si se toma en cuenta también las diagonales).
- **Tres dimensiones:** La celda poseerá 26 vecinos.

CAPÍTULO III

DEFINICIÓN DE VARIABLES

Para el desarrollo de los objetivos propuestos en el estudio, se incluyeron una serie de variables que fueron organizadas como: bióticas, físicas, meteorológicas y antrópicas; las cuales cambian de manera gradual con el paso del tiempo o lo hacen a muy largo plazo (áreas artificiales y cultivadas, cobertura vegetal, índice de combustibilidad, orientación y pendiente del terreno) y otras que lo hacen de manera rápida en un breve período de tiempo (focos de incendio, humedad relativa, precipitación y temperatura) (Chuvieco & Martín, 2004).

3.1 Variables bióticas

3.1.1 Cobertura vegetal

Para el análisis de la vegetación natural en el DMQ que cubre el 72,3% del total de su territorio (306.705 Ha), se empleó el mapa de cobertura vegetal escala 1:25.000 elaborado por la Secretaría de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (SAMDQM) del año 2011 (*ver Figura 3.1, Anexo A01*), el mismo que establece tres niveles jerárquicos (*ver Tabla 3.1*) correspondientes a: categorías, clases y subclases que caracterizan y describen el tipo de cobertura vegetal y uso del suelo (MDMQ - Secretaría de Ambiente (b), 2011):

- **Nivel I:** Presenta seis categorías relacionadas a la cobertura del suelo, las cuales delimitan la ubicación y tendencia de dominio de los diferentes tipos de cobertura.
- **Nivel II:** Contempla 16 clases derivadas de las categorías del nivel I con cierto nivel de detalle, puesto que toma en cuenta criterios climáticos y fisionómicos.
- **Nivel III:** Engloba en 42 subclases, una mayor descripción de las categorías y clases mencionadas anteriormente, mediante la incorporación de criterios ambientales, ecológicos y fitogeográficos que influyen sobre cada región florística.

Tabla 3.1: Categorías, clases y subclases del mapa de cobertura vegetal del DMQ

Nivel I (categoría)	Nivel II (clase)	Nivel III (subclase)
Vegetación natural	Bosques húmedos	Bosques altimontanos norte andinos de Polylepis
		Bosques altimontanos norte andinos siempreverdes
		Bosques bajos y arbustales altoandinos paramunos
		Bosques montanos pluviales de los Andes del Norte
		Bosques pluviales piemontanos de los Andes del Norte
		Bosques siempreverde estacionales montano bajos
	Bosques secos	Bosque seco interandino
		Vegetación ribereña del piso montano xerofítico
	Arbustos húmedos	Arbustales bajos y matorrales altoandinos paramunos
		Arbustal montano de los Andes del norte
	Arbustos secos	Arbustal secos interandinos
	Herbazales húmedos	Bofedales altoandinos paramunos
Pajonales altimontanos y montanos paramunos		
Pajonales edafoxerófilos altimontanos		

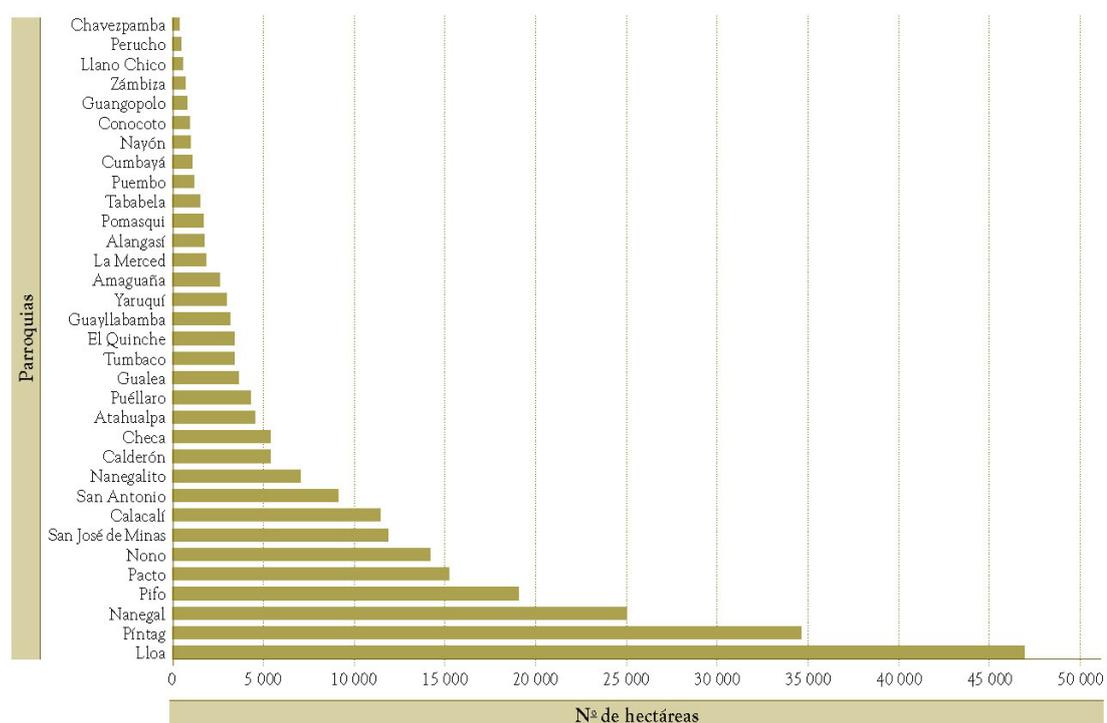
		Vegetación geliturbada y edafoxerofila subnival paramuna
	Herbazales secos	Herbazal montano
		Vegetación saxícola montana interandina de los Andes del norte
Áreas seminaturales	Vegetación en regeneración natural	Bosque secundario
		Matorral en regeneración
		Suro con árboles
		Suro con arbustos
	Vegetación cultivada latifoliadas	Eucalipto adulto
	Eucalipto joven y regeneración	
	Vegetación cultivada coníferas	Pinos y ciprés
Áreas cultivadas	Cultivos	Cultivos ciclo corto
		Cultivos semipermanentes y permanentes
		Suelos en preparación
	Pastos	Pastos cultivados
	Pastos naturales	
Espacios abiertos	Suelos desnudos	Arenales
		Glaciares
		Roca
	Suelos desnudos de origen antropogénico	Canteras
		Quemas
	Suelos erosionados	
Áreas artificiales	Infraestructura	Aeropuertos
		Edificaciones
		Invernaderos
		Relleno sanitario
Cuerpos de agua	Agua en cauces naturales	Lagunas
		Ríos
	Agua en cauces artificiales	Reservorios

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011b)

De acuerdo a la memoria técnica del mapa de cobertura vegetal (MDMQ - Secretaría de Ambiente (b), 2011), se evidencia la presencia de vegetación natural y áreas seminaturales en las 33 parroquias del DMQ; siendo Lloa la parroquia rural que posee mayor número de hectáreas con vegetación natural (46.992 Ha), seguida de la

parroquia de Pintag, Nanegal, Pifo, Pacto, Nono, San José de Minas y Calacalí. Mientras que las parroquias con menos de 1.000 Ha de vegetación natural son: Cumbayá, Nayón, Conocoto, Guangopolo, Zámiza, Llano Chico, Perucho y Chavezpamba (ver Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1: Hectáreas de vegetación natural en las parroquias rurales del DMQ



Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011b)

Según un documento del GAD de la Provincia de Pichincha (2012), la economía de estas parroquias está basada en la actividad agrícola, forestal y ganadera, las cuales generan efectos tales como: aumento en la expansión de la frontera agrícola, deforestación y malas prácticas agrícolas. Además, el alto porcentaje de tierras no legalizadas en el área rural, principalmente sobre los procesos legales de la tenencia de la tierra.

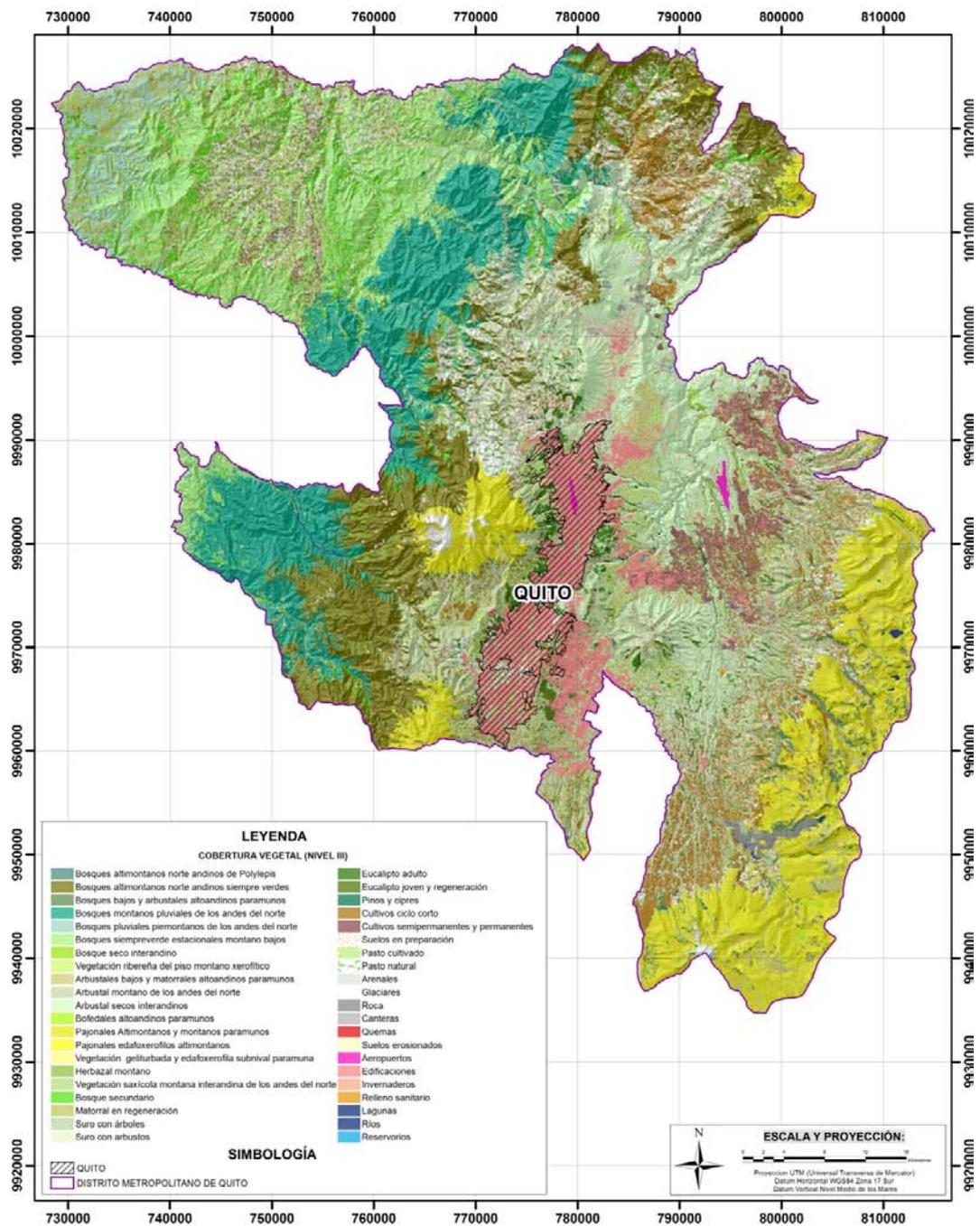


Figura 3.1: Cobertura vegetal (Nivel III)

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011)

3.1.2 Índice de combustibilidad

La combustibilidad se define como la capacidad del sistema forestal para extender y mantener el fuego, medida como la cantidad de sustancias que son combustibles y contribuyen a la ignición de un material. A cada tipo de vegetación le corresponde una combustibilidad e inflamabilidad determinadas, que varían en función de la cantidad y tipo de biomasa y distribución espacial (RINAMED, 2003).

El índice de combustibilidad generado por la SAMDMQ a partir del mapa de cobertura vegetal del DMQ (*ver Figura 3.2, Anexo A02*), construido mediante el análisis de las características de las formaciones vegetales considerando los tipos de ecosistemas y agrobiodiversidad; permitió conocer las diferentes especies vegetales y sus estratos asociados a su nivel de combustión (*ver Tabla 3.2*), el mismo que se expresa con la siguiente ecuación (MDMQ - Secretaría de Ambiente (c), 2012):

$$IC = 39 + 0,23BV(E1 + E2 - 7,18) \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

Donde:

BV: Biovolumen de la formación vegetal comprendido entre 0 - 50.

Obtenido de las tasas de recubrimiento de cada uno de los cuatro estratos de vegetación (lineales altos, lineales bajos, herbáceos, vegetación no vascular – capa de humus, hojarasca, tomillares), tasas de recubrimiento de los tacones (troncos de árboles talados) y restos arbóreos. Comprenden entre 0 (ausencia de estrato) a 10 (estrato formando una cobertura cerrada con altitud y densidad).

E1: Valor de intensidad calórica (comprendidas entre 1 y 8) de las dos especies dominantes, correspondiente a los estratos lineales altos.

E2: Valor de intensidad calórica (comprendidas entre 1 y 8) de las dos especies dominantes, correspondiente a los estratos lineales bajos o herbáceos.

Tabla 3.2: Índice de combustibilidad del mapa de cobertura vegetal del DMQ (Nivel III)

Nivel III (subclase)	Índice de combustibilidad	Combustibilidad
Bosques altimontanos norte andinos de Polylepis	35	Débil
Bosques altimontanos norte andinos siempreverdes	34	Débil
Bosques bajos y arbustales altoandinos paramunos	54	Muy elevado
Bosques montanos pluviales de los Andes del Norte	34	Débil
Bosques pluviales piemontanos de los Andes del Norte	27	Débil
Bosques siempreverde estacionales montano bajos	27	Débil
Bosque seco interandino	50	Elevado
Vegetación ribereña del piso montano xerofítico	44	Medio
Arbustales bajos y matorrales altoandinos paramunos	54	Muy elevado
Arbustal montano de los Andes del norte	41	Moderado
Arbustal secos interandinos	50	Elevado
Bofedales altoandinos paramunos	29	Débil
Pajonales altimontanos y montanos paramunos	54	Muy elevado
Pajonales edafoxerófilos altimontanos	54	Muy elevado
Vegetación geliturbada y edafoxerofila subnival paramuna	35	Débil
Herbazal montano	42	Moderado
Vegetación saxícola montana interandina de los Andes del norte	42	Moderado
Bosque secundario	41	Moderado
Matorral en regeneración	40	Moderado
Suro con árboles	41	Moderado
Suro con arbustos	41	Moderado
Eucalipto adulto	48	Medio
Eucalipto joven y regeneración	42	Moderado
Pinos y ciprés	48	Medio
Cultivos ciclo corto	44	Medio
Cultivos semipermanentes y permanentes	41	Moderado
Suelos en preparación	44	Medio
Pastos cultivados	40	Moderado
Pastos naturales	42	Moderado
Arenales	36	Débil

Glaciares	36	Débil
Roca	36	Débil
Canteras	37	Débil
Quemas	37	Débil
Suelos erosionados	37	Débil
Aeropuertos	39	Débil
Edificaciones	39	Débil
Invernaderos	39	Débil
Relleno sanitario	39	Débil
Lagunas	39	Débil
Ríos	39	Débil
Reservorios	39	Débil

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011c)

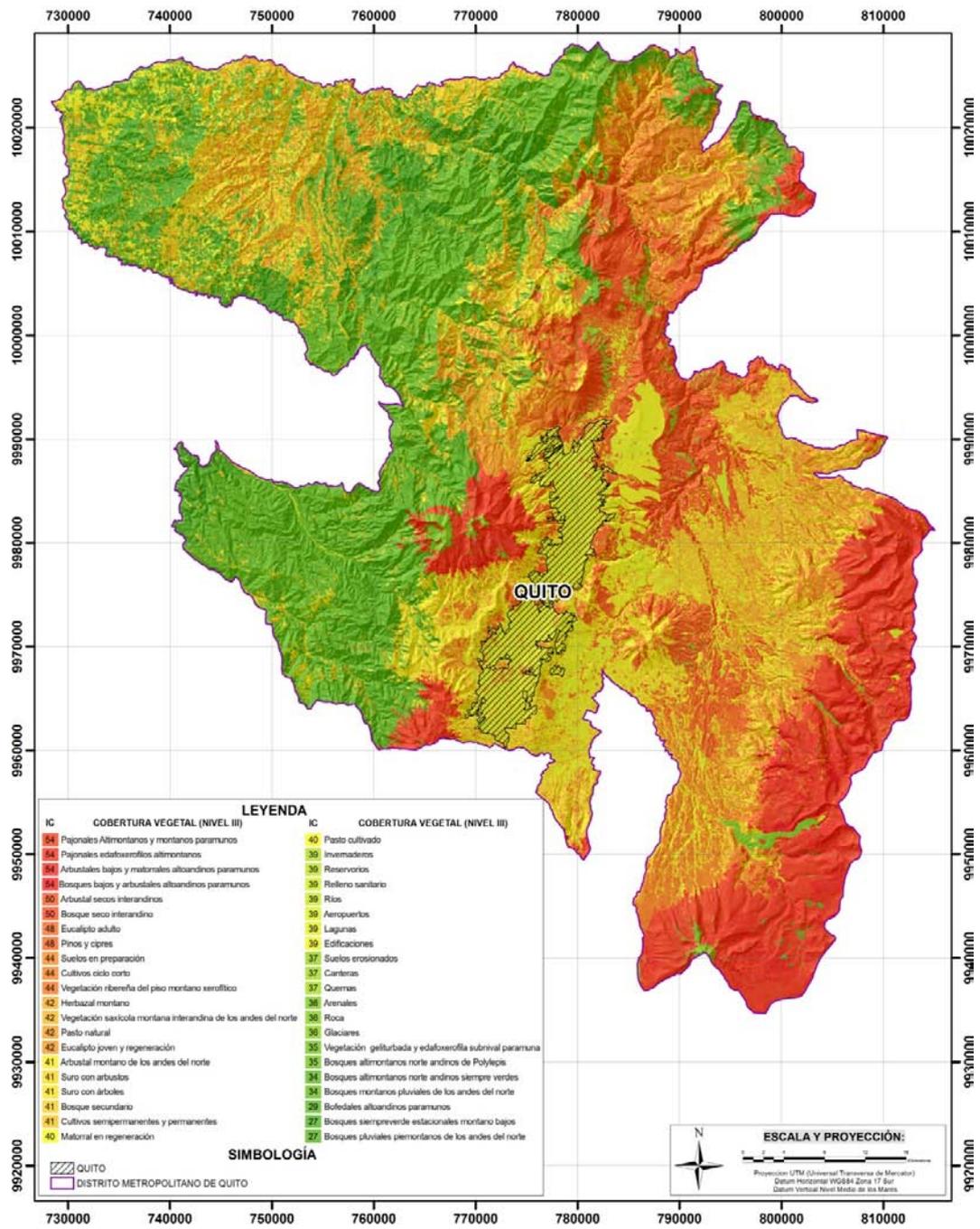


Figura 3.2: Índice de combustibilidad a partir de la cobertura vegetal (Nivel III)

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011)

3.2 Variables físicas

3.2.1 Modelo Digital de Elevación

En la generación del primer modelo digital de elevación (MDE), intervienen los *feature class* que contienen la información vector de: puntos acotados, vértices y curvas de nivel a escala 1:50.000, los cuales contienen datos de elevación. Para la interpolación de los datos, se utilizó la herramienta *Topo to Raster* de *ArcGIS 9.3*, la misma que se fundamenta en un método de interpolación basado en el programa ANUDEM desarrollado por Michael Hutchinson (1988, 1989), diseñado específicamente para crear MDE hidrológicamente correctos (ESRI (a), 2013). La resolución espacial establecida fue de 20m.

Posteriormente, al segundo MDE de 2m de resolución que cubre el 50% del área del DMQ, se realizó un remuestreo con la herramienta *Resample*, la cual cambia el tamaño de celda a 20m y su método de muestreo con convolución cúbica.

Con estos dos MDE se realizó un mosaico de 20m de resolución espacial en un *raster dataset* ya existente, para lo cual se consideró minimizar los cambios abruptos a lo largo de los límites de los *raster* combinando los valores de celda superpuestos; obteniendo finalmente un MDE con una elevación máxima de 4.869m y mínima de 431m para el DMQ (ver *Figura 3.3, Anexo A03*).

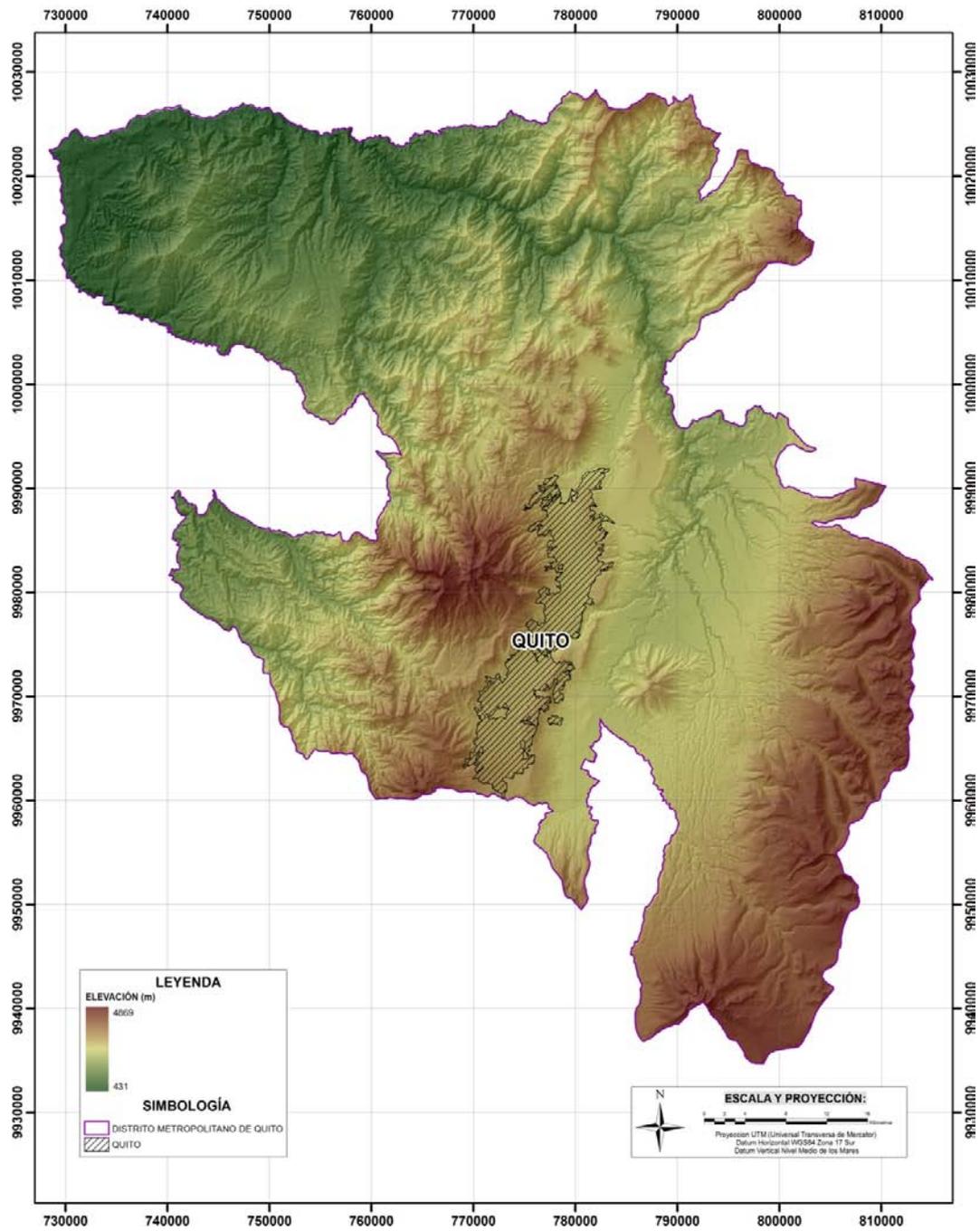


Figura 3.3: Modelo digital de elevación

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

3.2.2 Pendiente

El MDE fue necesario para la obtención de un *raster* de pendientes, el mismo que permite conocer la gradiente en el valor de z desde cada celda de una superficie del *raster*. Los valores se expresaron en porcentajes, para posteriormente clasificarse de acuerdo a la morfología del terreno.

De acuerdo a la morfología del terreno en el DMQ, se señala en la Tabla 3.3 que el relieve escarpado con pendientes superiores al 70% cubre un área de 62.787,553 Ha, los relieves montañosos con pendientes entre 27 – 70% ocupan 185.590,466 Ha, los relieves inclinados con pendientes entre 4 – 27% alcanzan 140.390,248 Ha y el plano con pendientes de 0 a 4% suman 34.362,120 Ha (*ver Figura 3.4, Anexo A04*).

Tabla 3.3: Clasificación de la pendiente del terreno

Clase	Rango (%)	Morfología del terreno	Área (Ha)	Porcentaje del área en el DMQ (%)
1	0 – 4	Plano	34.362,120	8,12
2	4 – 9	Suavemente inclinado	35.217,969	8,32
3	9 – 27	Fuertemente inclinado	105.172,279	24,86
4	27 – 47	Montañoso	99.285,300	23,46
5	47 – 70	Muy montañoso	86.305,166	20,40
6	70 - 100	Escarpado	62.787,553	14,84

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

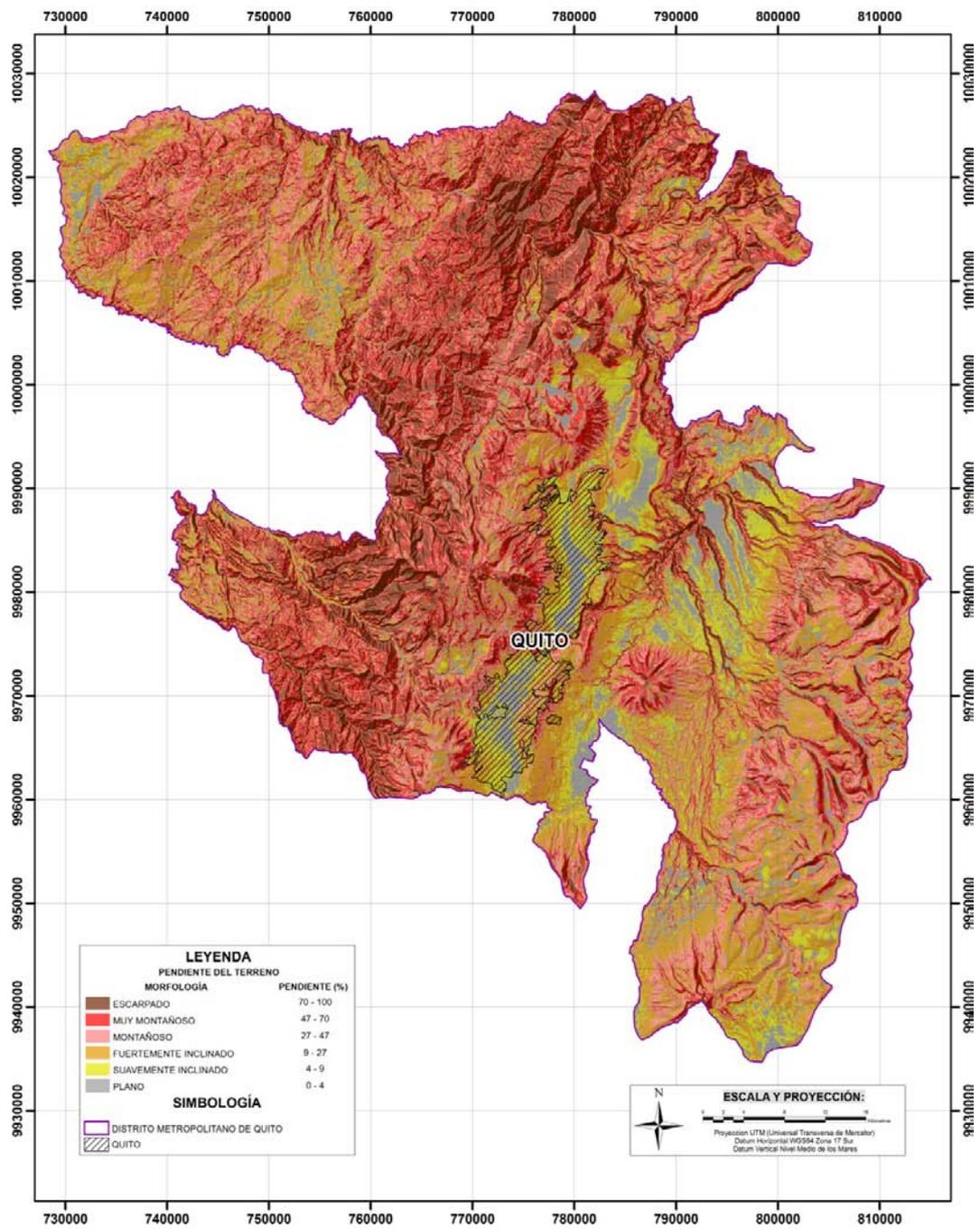


Figura 3.4: Pendientes del terreno

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

3.2.3 Orientación

La orientación, generada con el MDE y la utilización de la herramienta *Aspect – Line* de *ArcGIS 9.3*, identifica la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor desde cada celda hacia sus vecinas. En los valores de cada celda del *raster* de salida se indica la dirección, medida en sentido horario en grados de 0 a 360° desde el norte. Estos valores son agrupados en nueve clases, una corresponde a áreas sin pendiente que se le asigna una orientación de – 1 y los demás en referencia a los puntos cardinales.

En la Tabla 3.4 respecto al DMQ, únicamente el 4,05% corresponde a planicies que ocupan 17.145,657 Ha (*ver Figura 3.5, Anexo A05*).

Tabla 3.4: Clasificación de la orientación del terreno

Clase	Orientación (grados)	Pendiente del terreno	Área (Ha)	Porcentaje del área en el DMQ (%)
1	-1	Planicie	17.145,657	4,05
2	0 – 22,5 y 337,5 – 360	Norte	48.037,049	11,35
3	22,5 – 67,5	Noreste	105.172,279	12,28
4	67,5 – 112,5	Este	48.125,554	11,37
5	112,5 – 157,5	Sureste	40.884,962	9,66
6	157,5 – 202,5	Sur	37.517,820	8,87
7	202,5 – 247,5	Suroeste	50.397,136	11,91
8	247,5 – 292,5	Oeste	64.236,746	15,18
9	292,5 – 337,5	Noroeste	64.827,324	15,32

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

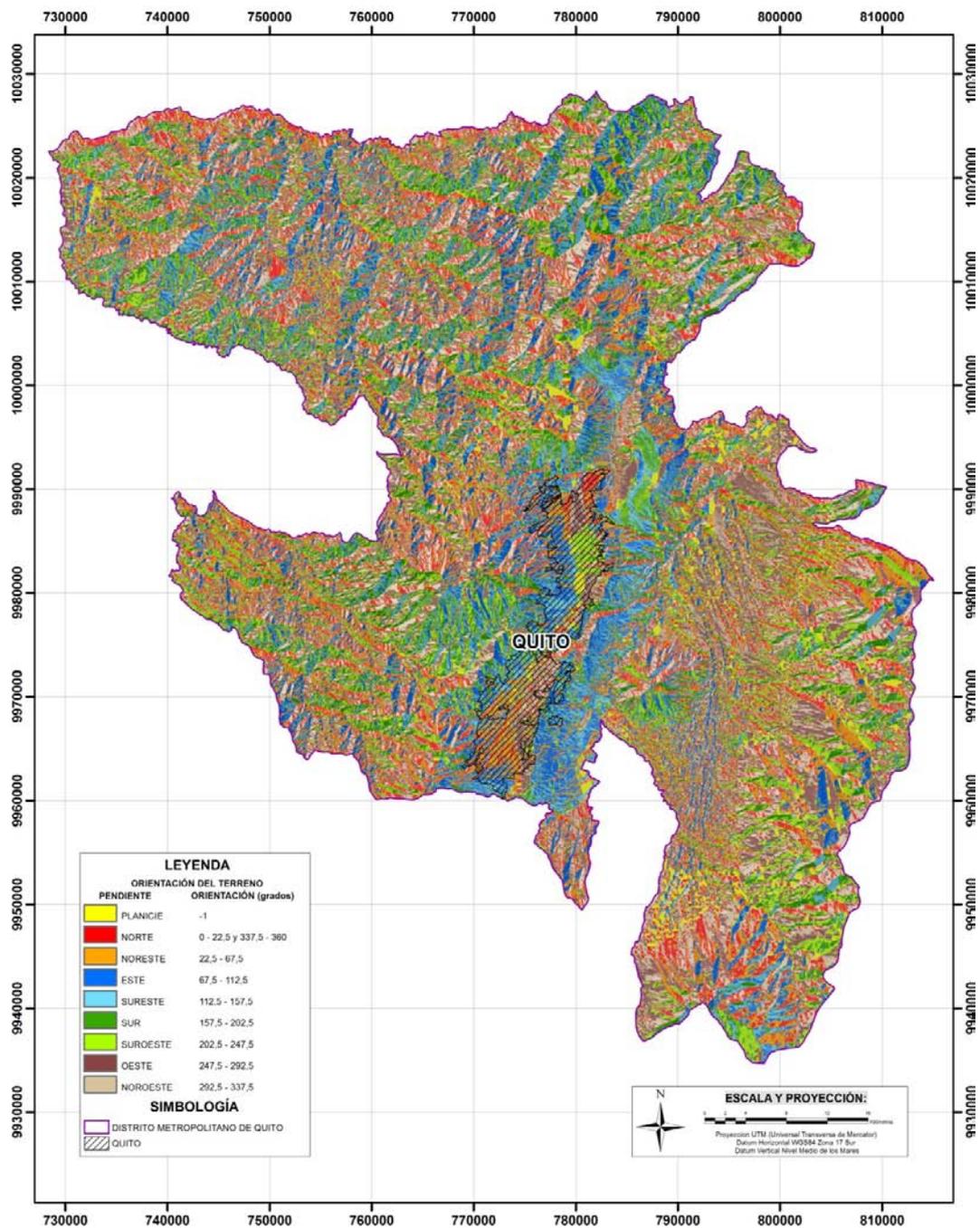


Figura 3.5: Orientación del terreno

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

3.2.4 Focos de incendios forestales

Los focos de calor se definen como la acumulación de temperatura en un área determinada, los cuales son considerados puntos potenciales de fuego, pero que no necesariamente representan una quema o incendio (Fuentes, 2010). En el 2013, según el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE), estos focos se representan mediante puntos que indican la existencia de calor en un pixel al momento en el que un satélite pasó por un área de la superficie terrestre. La relación, foco de calor - incendio, no es directa puesto que un foco de calor puede corresponder a uno o varios incendios dentro de un mismo pixel. Además, si un incendio extenso es detectado en algunos pixeles vecinos, dará como resultado que varios focos de calor estarán asociados a un mismo incendio.

Para identificar focos de calor, el INPE procesa imágenes de satélites que poseen sensores ópticos en la franja termal – media de 4 μ m, ya que un material en llamas emite energía principalmente en esta franja y su rango va de 3,7 a 4,1 μ m. Son utilizadas imágenes que tengan esta franja característica y en ellas se selecciona el pixel con mayor temperatura, en general saturando el sensor. Los satélites generadores de estas imágenes son:

- **Satélites geostacionarios:** Los satélites GOES – 10, GOES – 12 y MSG – 2 se encuentran a 35.785km de distancia de la Tierra, los mismos que generan algunas imágenes por hora. La resolución espacial de ellos es de 4km.
- **Satélites polares:** Los satélites NOAA – 12, NOAA – 15, NOAA - 16, NOAA - 17 y NOAA – 18 están a 800km y proporcionan imágenes AVHRR. Mientras que los satélites NASA AQUA y TERRA, a 700km proveen imágenes MODIS.

Éstos satélites generan un conjunto de imágenes por día y tienen una resolución espacial de 1km.

Los satélites de órbita polar detectan incendios con un frente de 30m de largo y 1m de ancho, en tanto que los de órbita geostacionaria, el frente precisa tener el doble del tamaño para su localización.

Existen ciertas situaciones que impiden la detección de incendios por parte de los satélites tales como: fuego dentro de bosques densos sin afectación a las copas, incendios menores a 30m de frente, nubosidad en determinadas áreas, quemas de corta duración, siniestros en laderas montañosas e imprecisión en la localización del foco de incendio de 1 a 6km.

A través del sistema *Queimadas* del INPE¹ (2013), se recopiló información de 501 focos de incendio (*ver Tabla 3.5*), representados como puntos en el DMQ y su área de influencia, desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012. A continuación, fueron seleccionados los focos de incendio de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre, correspondientes a la época seca de la región Sierra.

Se utilizaron únicamente los datos de los satélites polares (NOAA – 12, NOAA – 15, NOAA - 16, NOAA - 17, NOAA – 18, NASA AQUA y TERRA) por su resolución espacial de 1km (*ver Figura 3.6, Anexo A06*).

¹ INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales, 2012. Portal de monitoreo de incendios y fuego. Disponible en <http://www.inpe.br/queimadas>. Consultado el: 06/01/2013

Tabla 3.5: Número de focos de incendio en el DMQ por año desde el 2000 al 2012

Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	TOTAL
TOTAL_{total}	4	105	43	18	30	38	10	8	2	134	4	7	98	501

Fuente: INPE (2013)

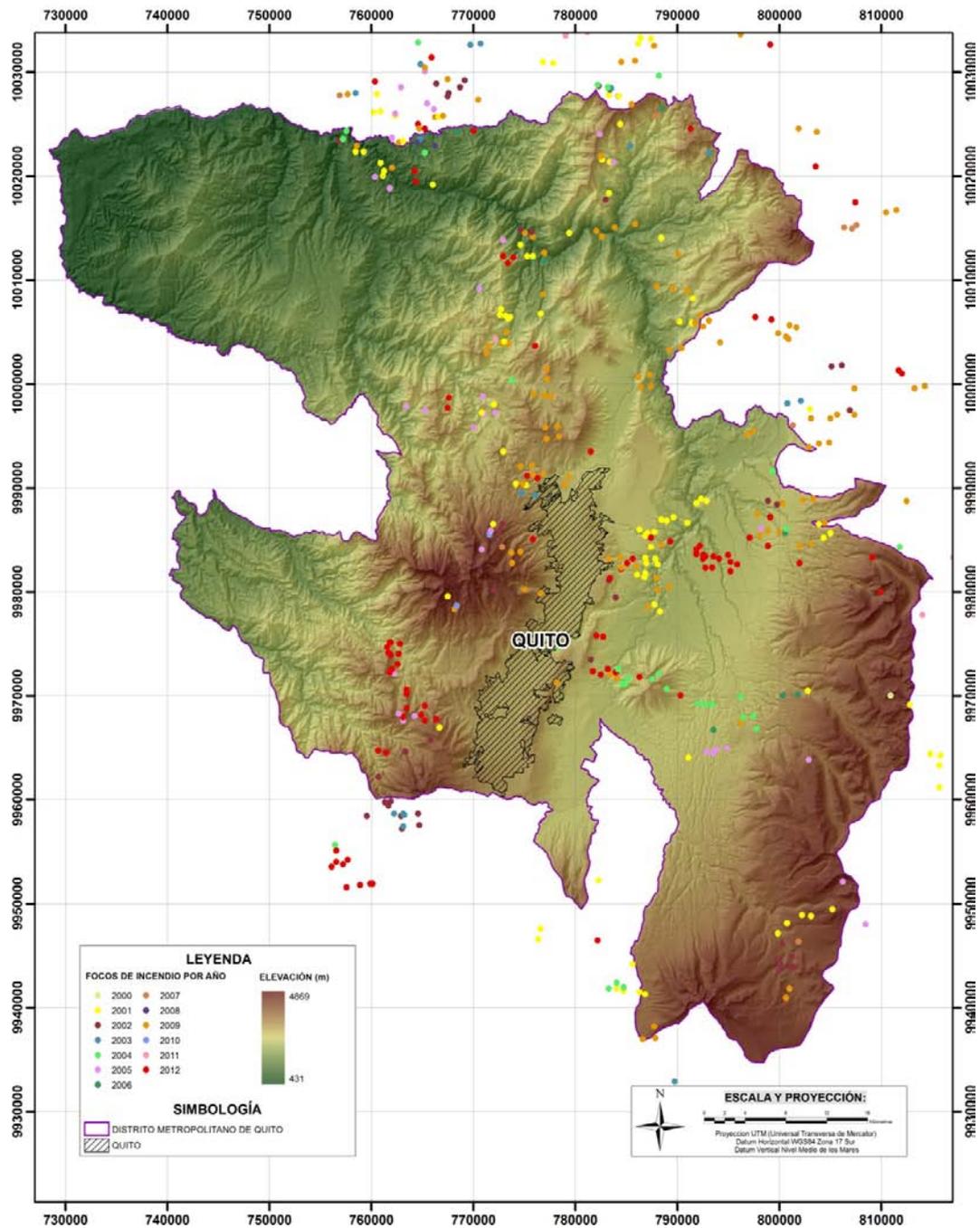


Figura 3.6: Focos de incendio en el DMQ desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012

Fuente: INPE (2013)

3.3 Variables meteorológicas

Datos mensuales de las estaciones meteorológicas localizadas dentro y fuera del DMQ, proporcionados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), desde el año 1997 al 2012, corresponden a: humedad relativa, precipitación y temperatura. Las estaciones se seleccionaron en base a su ubicación y disponibilidad de información para generar superficies de fenómenos que son continuos en el espacio.

Los datos mensuales de las estaciones meteorológicas fueron organizados en trimestres y de ellos se obtuvo su media aritmética, de los cuales se tomaron en cuenta para la interpolación, los últimos dos de cada año (tercer y cuarto trimestre).

A través de la interpolación como procedimiento “que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral con un valor estimado), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales con valores reales)” (Bosque, 1992); se generaron superficies de interpolación para calcular los valores de: humedad relativa, precipitación y temperatura.

Se utilizó como técnica de interpolación local, la media ponderada por el inverso de la distancia, denominada en inglés *Inverse Distance Weighted (IDW)*, la misma que opera alrededor de las cercanías del punto que está interpolando para asegurar que las estimaciones se realicen solamente con datos de lugares vecinos y se ajusten en lo posible a la realidad; los valores de las zonas más próximas a predecir tendrán

más influencia y por ende más peso que los que están más lejos (Moreno, 2008). La fórmula general es:

$$Z_{(S_0)} = \sum_{i=1}^N \lambda * Z_{(S_i)} \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

Donde:

$Z_{(S_0)}$: Valor a predecir para el lugar S_0 .

N: Número de puntos muestrales alrededor del lugar a predecir.

λ : Peso asignado a cada punto muestral.

$Z_{(S_i)}$: Valor observado del lugar S_i .

Conforme aumenta la distancia el peso disminuye por el factor p, esto a razón de que a medida que se incrementa la distancia entre los puntos observados y el punto calculado, el peso tendrá un punto muestral sobre el predicho decrecerá exponencialmente. La fórmula determinarla es:

$$\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p} \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

Donde:

d_{i0} : Distancia entre el lugar de predicción S_0 y cada lugar muestral S_i .

Para la predicción, los pesos de los lugares utilizados se escalarán a fin de que su sumatoria sea 1:

$$\sum_{i=1}^N \lambda = 1 \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

Para el cálculo de superficies de las variables meteorológicas en *ArcGIS 9.3*, usando el IDW como interpolador exacto, se tomó en cuenta un número mínimo y

máximo de vecinos, 3 y 15 respectivamente. Además, de un valor óptimo p igual a dos, conocido como distancia inversa al cuadrado, el mismo que hace mínimo el error de predicción o error cuadrático medio. Todos los puntos fueron considerados igualmente en todas direcciones al no existir influencias direccionales en los pesos de los datos, por lo que el modo de búsqueda de vecindad fue el círculo.

En la obtención de la validación de los modelos, para todos los puntos, la *Cross – Validation* (validación cruzada) de *ArcGIS 9.3* omite de manera secuencial un punto y predice su valor usando el resto de los valores para luego comparar el valor observado con el estimado; con lo cual brinda una noción de la manera en que el modelo predice valores desconocidos. Para que los valores predichos sean consistentes la media debe estar próxima a cero y el error cuadrático medio lo más bajo posible.

De acuerdo a las superficies generadas de las variables meteorológicas, correspondientes a las medias del tercer (julio, agosto y septiembre) y cuarto trimestre (octubre, noviembre y diciembre) de cada año, se obtuvieron los siguientes resultados:

3.3.1 Humedad relativa

Se utilizaron los datos de 19 estaciones meteorológicas (*ver Anexo B01 y B02*), con los cuales se calcularon valores máximos y mínimos de humedad relativa para el tercer y cuarto trimestre de los años 1997 al 2012 que se muestran en la Tabla 3.6 (*ver Figura 3.6, Anexos A07 y A08*).

Tabla 3.6: Humedad relativa de los dos últimos trimestres de los años 1997 al 2012

Trimestre	Meses	Valor máximo (%)	Valor mínimo (%)
Tercer	julio, agosto y septiembre	94,173	57,486
Cuarto	octubre, noviembre y diciembre	95,744	71,425

Fuente: INAMHI (2013)

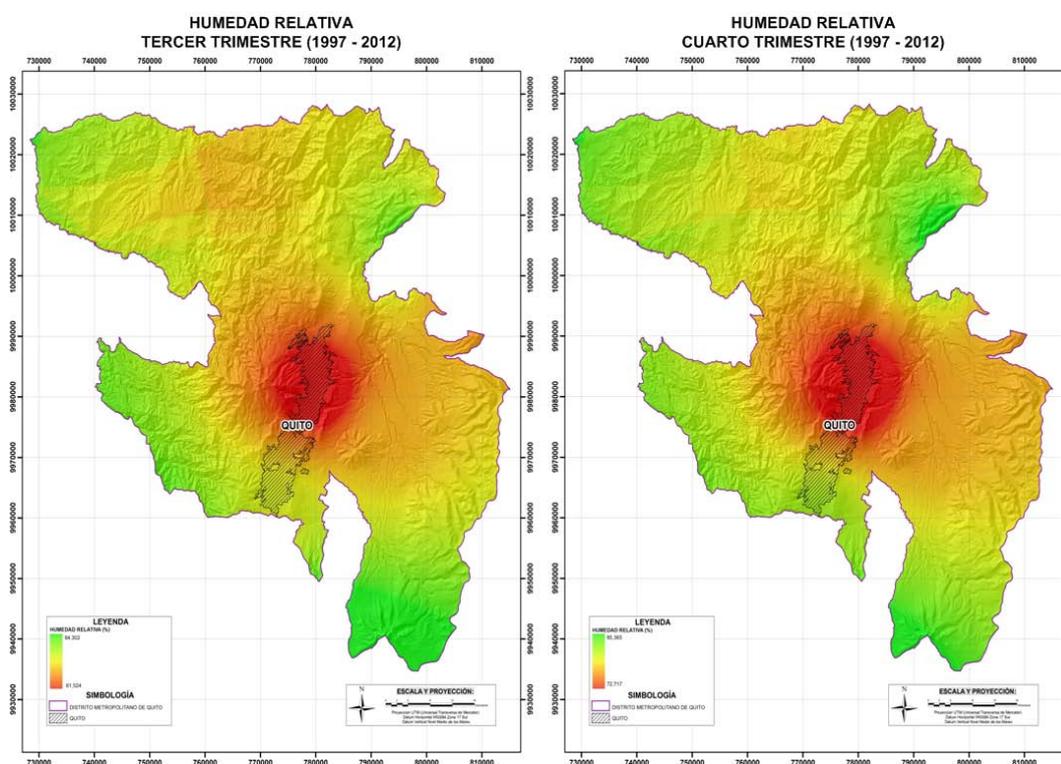


Figura 3.7: Humedad relativa del tercer trimestre (izq.) y cuarto trimestre (der.) de los años 1997 al 2012

Fuente: INAMHI (2013)

3.3.2 Precipitación

En la Tabla 3.7 se indican los valores máximos y mínimos de precipitación, calculados a partir de los datos de 43 estaciones meteorológicas (ver Anexo B03 y B04), para el tercer y cuarto trimestre de los años 1997 al 2012 (ver Figura 3.8, Anexos A09 y A10).

Tabla 3.7: Precipitación de los dos últimos trimestres de los años 1997 al 2012

Trimestre	Meses	Valor máximo (mm)	Valor mínimo (mm)
Tercer	julio, agosto y septiembre	218,806	12,590
Cuarto	octubre, noviembre y diciembre	377,633	38,094

Fuente: INAMHI (2013)

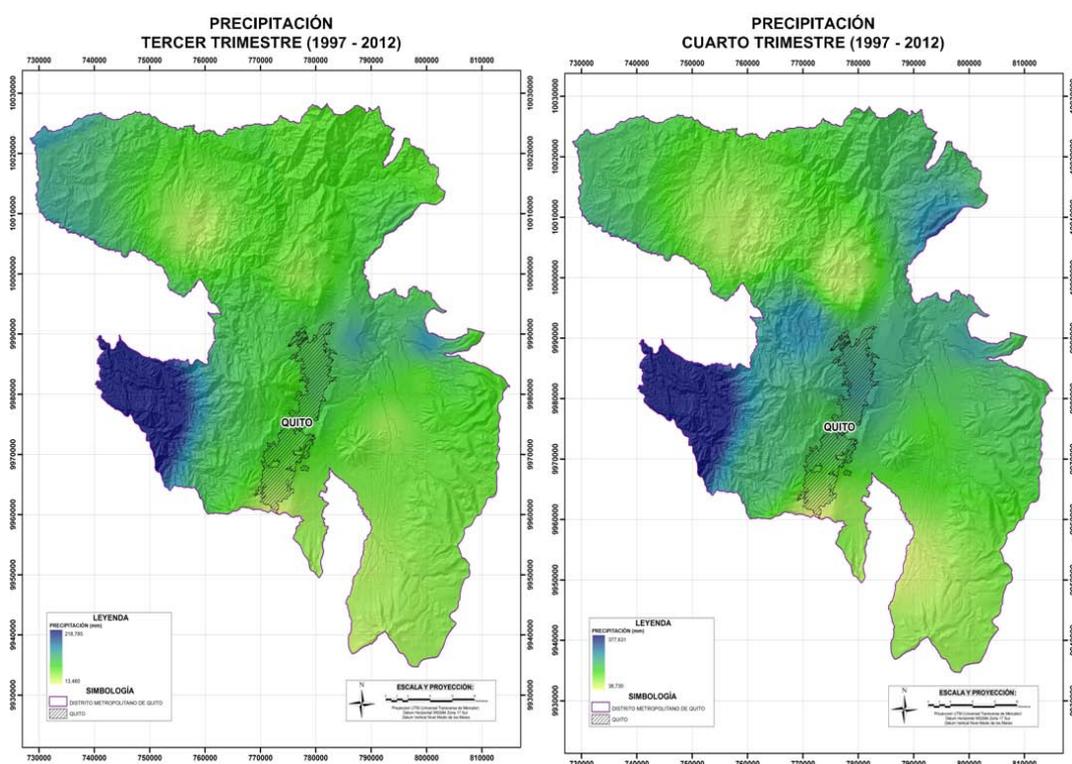


Figura 3.8: Precipitación del tercer trimestre (izq.) y cuarto trimestre (der.) de los años 1997 al 2012

Fuente: INAMHI (2013)

3.3.3 Temperatura

17 estaciones meteorológicas (*ver Anexo B05 y B06*), fueron tomadas en cuenta para conocer los valores máximos y mínimos de temperatura mostrados en la Tabla 3.8, para el tercer y cuarto trimestre de los años 1997 al 2012 (*ver Figura 3.9, Anexos A11 y A12*).

Tabla 3.8: Temperatura de los dos últimos trimestres de los años 1997 al 2012

Trimestre	Meses	Valor máximo (°C)	Valor mínimo (°C)
Tercer	julio, agosto y septiembre	26,103	8,025
Cuarto	octubre, noviembre y diciembre	26,036	10,836

Fuente: INAMHI (2013)

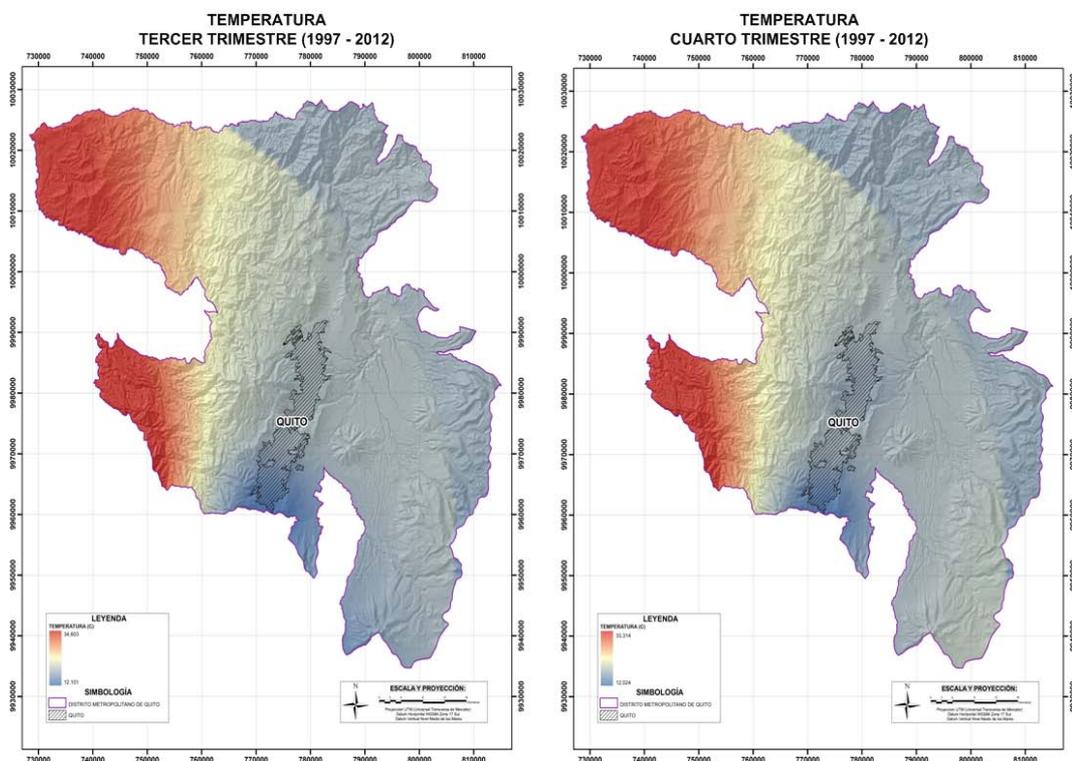


Figura 3.9: Temperatura del tercer trimestre (izq.) y cuarto trimestre (der.) de los años 1997 al 2012

Fuente: INAMHI (2013)

3.4 Variables antrópicas

Esta variable comprende el área urbana de la ciudad, poblados y áreas periféricas en proceso de incorporación a las áreas urbanas mediante un proceso gradual de urbanización o cambio de uso de suelo con fines comerciales, industriales, recreativos y de servicios (IDEAM, 2010).

Actividades antrópicas relacionadas al uso y ocupación del suelo (agricultura, comercio, industria, turismo, sector residencial, etc.), contribuyen a la generación de incendios forestales de forma voluntaria o involuntaria. Todas ellas producto de la expansión urbana y búsqueda de fuentes económicas en espacios periféricos de la ciudad que anteriormente permanecían inaccesibles o marginales (Estacio & Narváez, 2012).

3.4.1 Áreas artificiales

Se empleó como una de las variables antrópicas, la cobertura que contiene como categoría a las áreas artificiales (que cubre 24.732 Ha representando el 5,83% del DMQ) (*ver Tabla 3.9*), correspondiente a infraestructura que incluye: aeropuertos, edificaciones, invernaderos y rellenos sanitarios (*ver Figura 3.10, Anexo A13*); extraída del nivel III del mapa de cobertura vegetal del MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011b).

Tabla 3.9: Superficie de ocupación de las áreas artificiales en el DMQ

Nivel I (categoría)	Área (Ha)	Área en el DMQ (%)	Nivel II (clase)	Área (Ha)	Área en el DMQ (%)	Nivel III (subclase)	Área (Ha)	Área en el DMQ (%)
Áreas artificiales	24.732	5,83	Infraestructura	24.732	5,83	Aeropuerto	435	0,10
						Edificaciones	23.699	5,59
						Invernadero	568	0,13
						Relleno sanitario	30	0,01

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011b)

En las áreas artificiales existen elementos importantes (zonas agropecuarias a gran escala, equipamientos estratégicos de desarrollo para la ciudad, infraestructura comercial e industrial, sistema de energía eléctrica, sistema de transporte de combustibles y crudo), localizados en zonas susceptibles a incendios forestales, los cuales se encuentran expuestos y tienen su impacto en un sentido de escala distrital.

De acuerdo a Estacio & Narváez (2012), la generación de incendios forestales en el DMQ puede afectar espacios urbanos (barrios o cabeceras parroquiales) y rurales (centros poblados), poniendo en evidencia “los altos niveles de exposición que tienen las especies de flora y fauna de áreas de conservación y protección”. Consecuentemente, existen repercusiones potenciales a asentamientos humanos, elementos e infraestructura importante y espacios naturales de valor patrimonial. Esto cambia la percepción urbana de la única presencia de incendios relacionados con el área urbana de Quito y amplía el conocimiento hacia otras zonas estratégicas, correspondientes a relieves de montaña donde las condiciones de vegetación, clima y actividades antrópicas contribuyen estos eventos.

Dentro de las áreas artificiales han sido tomadas en cuenta coberturas tipo vector a escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar (IGM) del 2012, de la infraestructura para distribución de agua potable (acequias y acueductos), infraestructura de distribución y transporte de petróleo y derivados (oleoducto, gasoducto y poliducto), líneas de transmisión eléctrica, reservorios de agua y torres de comunicación. Cobertura de los hidrantes distribuidos en el DMQ a 1:5.000 proporcionado por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) del 2012. Además, de la infraestructura vial a escala 1:5.000 por la Empresa Pública Metropolitana de Movilidad y Obras Públicas (EPMMOP) del 2012.

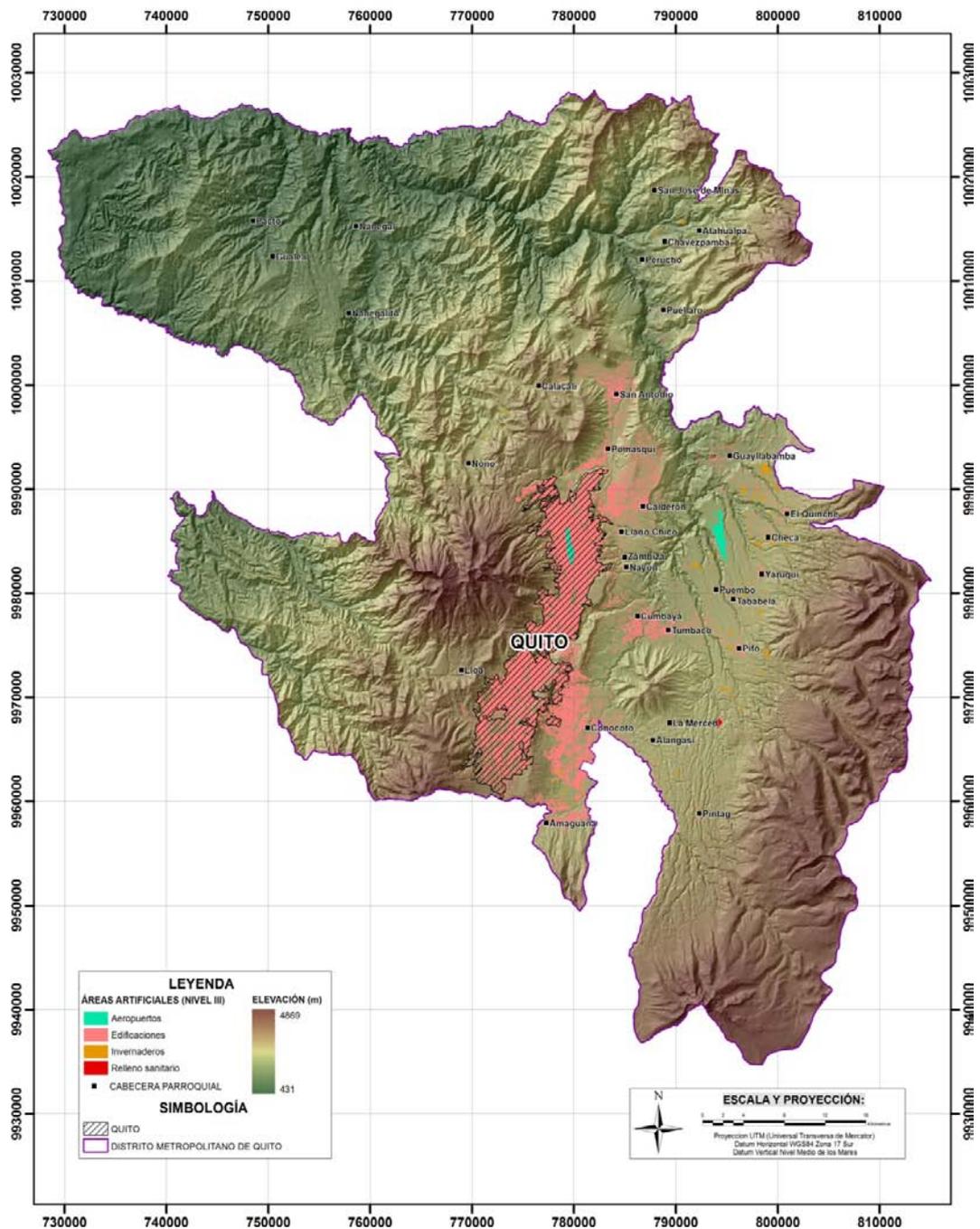


Figura 3.10: Áreas artificiales del DMQ

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011)

3.4.2 Áreas cultivadas

En la Tabla 3.10 se señalan las áreas cultivadas en el DMQ corresponden al 20,54% de su territorio (87.112 Ha), la misma que incluye cultivos (cultivos de ciclo corto, cultivos permanentes y semipermanentes) y pastos (pastos cultivados, pastos naturales y suelos en preparación) (*ver Figura 3.11, Anexo A14*).

Tabla 3.10: Superficie de ocupación de las áreas cultivadas en el DMQ

Nivel I (categoría)	Área (Ha)	Área en el DMQ (%)	Nivel II (clase)	Área (Ha)	Área en el DMQ (%)	Nivel III (subclase)	Área (Ha)	Área en el DMQ (%)
Áreas cultivadas	87.112	20,54	Cultivos	36.687	8,65	Cultivos ciclo corto	24.845	5,86
						Cultivos semipermanentes y permanentes	10.040	2,37
			Pastos	50.425	11,89	Pastos cultivados	16.958	4,00
						Pastos naturales	33.437	7,89
						Suelos en preparación	1.802	0,42

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011b)

La expansión de la frontera agrícola afecta a la vegetación natural, donde la deforestación y la utilización del fuego como herramienta más de la actividad agrícola; una de ellas relacionada a la cultura y tradición de la población rural y campesina, previas a las festividades de San Pedro y San Pablo al realizar quemas de vegetación residual de los cultivos, principalmente de maíz denominadas “chamizas” (Estacio & Narváez, 2012).

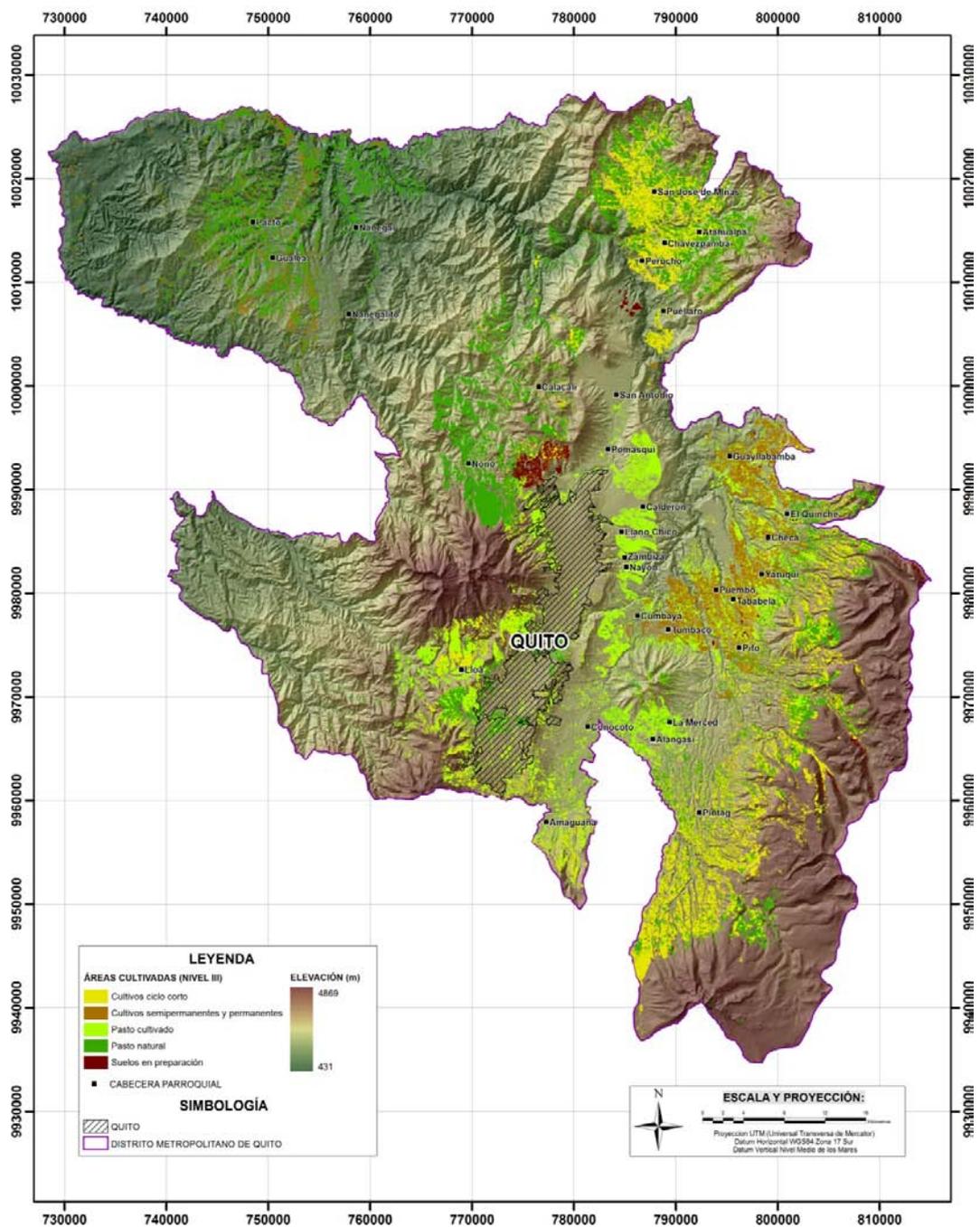


Figura 3.11: Áreas cultivadas del DMQ

Fuente: MDMQ - Secretaría de Ambiente (2011)

CAPÍTULO IV

MODELAMIENTO ESPACIAL DE VARIABLES

Con de la integración de los componentes espacial y temático de los datos en un mismo proceso mediante un conjunto de operaciones que presentan un SIG, es posible generar nuevos datos a partir de los originales, pudiendo ser integrados en procesos más largos a través de modelos espaciales (Gómez & Barredo, 2005). Estos modelos están relacionados a la gestión de incendios forestales (Chuvieco & Martín, 2004), ya que permiten su orientación a varias aplicaciones operativas planteadas en este estudio como:

- **Predicción de incendios:** Modelamiento mediante la información que incluye variables que fueron organizadas como: bióticas, físicas, meteorológicas y antrópicas; para la generación del modelo de predicción y probabilidad de incendios forestales con la técnica de Autómatas Celulares.
- **Detección de incendios:** Emplazamiento de puntos de observación considerando áreas con gran visibilidad desde las que se cubra la mayor parte del terreno mediante la generación de cuencas visuales y el conocimiento de cuáles son las áreas de mayor peligro de incendios forestales.
- **Extinción de incendios:** Identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales.
- **Evaluación de los incendios:** Identificación de áreas de concentración de focos de incendio.

4.1 Identificación de áreas de concentración de focos de incendio

Mediante la herramienta *Density Kernel* de *ArcGIS 9.3*, que calcula la densidad de las entidades de punto o línea dentro de una vecindad alrededor de cada celda de *raster* de salida, se establecieron superficies de densidad suavemente estrechadas a cada punto en base a la distribución espacial de los 501 focos de incendio para conocer y establecer sus sitios de concentración (ESRI (b), 2013). A continuación, en la Figura 4.1 se observa la secuencia de los procesos ejecutados sobre los datos:

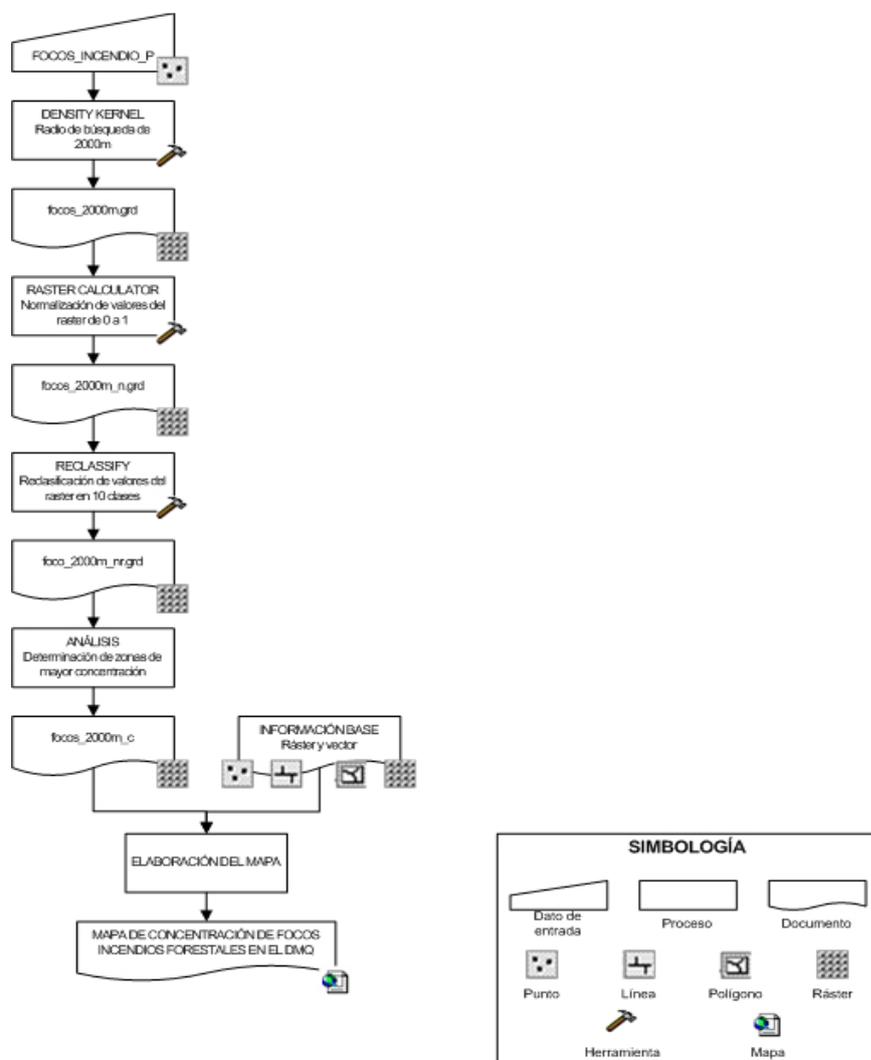
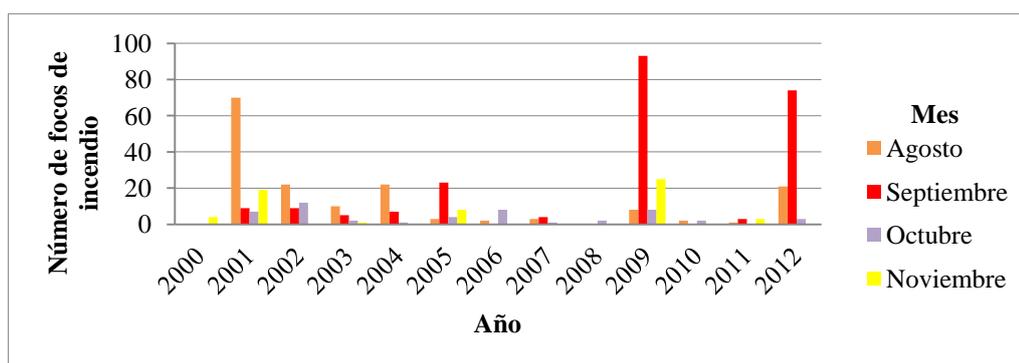


Figura 4.1: Modelo espacial para la determinación de la concentración de focos de incendios forestales en el DMQ

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

En el Cuadro 4.1 se observa que los años 2001, 2009 y 2012 durante los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre, fueron registrados mayor cantidad de focos de incendio en el DMQ.

Cuadro 4.1: Focos de incendio en el DMQ de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre desde el año 2000 al 2012



Fuente: INPE (2013)

A los focos de incendio representados como puntos se aplicaron áreas de búsqueda circular de 500, 750, 1.000, 1.500, 2.000 y 3.000m; siendo el radio de búsqueda de 2.000m el que mejor produjo un *raster* de densidad más generalizado y suave, el mismo que permite determinar la distancia para buscar las ubicaciones de los focos y calcular un valor de densidad. El valor de superficie de densidad es más alto en la ubicación del punto y disminuye conforme aumenta la distancia desde el punto llegando a cero.

Se obtuvo una cobertura *raster* de densidad *kernel* con un valor máximo de 1,510 el cual fue normalizado al valor máximo de 1 y mínimo de 0.

Finalmente, el *raster* normalizado resultante, fue reclasificado para determinar zonas de concentración en una escala espacio – temporal (ver *Tabla 4.1*), en la cual se tomó en cuenta el análisis espacial de densidad y la frecuencia de los focos de incendio en el DMQ (ver *Figura 4.2, Anexo A15*).

Tabla 4.1: Concentración de focos de incendio en el DMQ desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012

Reclasificación de valores de densidad	Concentración
0,50 – 1,00	Alta
0,30 – 0,50	Media
0,20 – 0,30	Baja

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

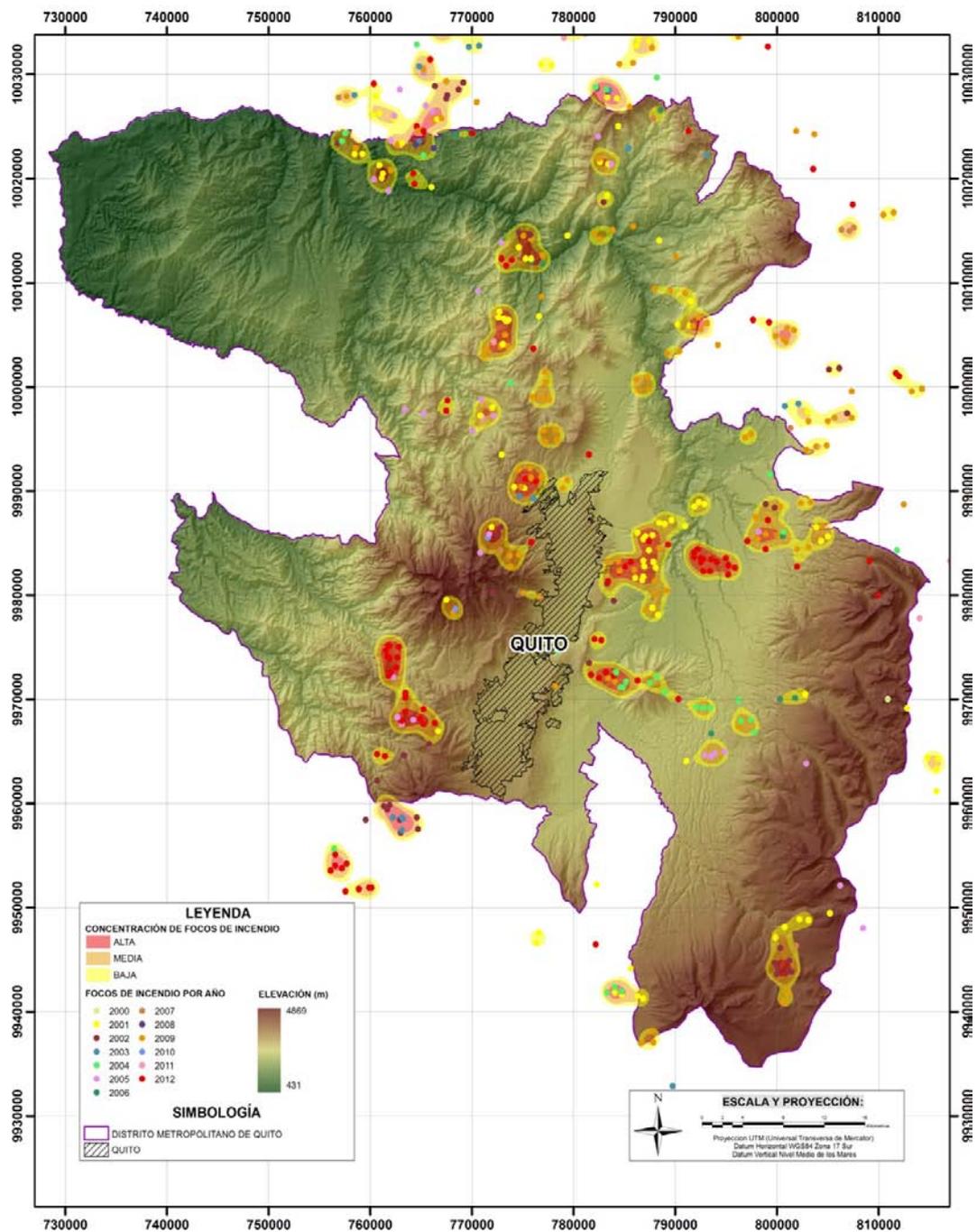


Figura 4.2: Concentración de focos de incendio en el DMQ desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

4.2 Ubicación de puntos de observación y generación de cuencas visuales para incendios forestales

De acuerdo a Chuvieco y Martín (2004), la gestión de incendios forestales consta de actividades posibles de realizar antes, durante y después del evento. Una de ellas, orientada como aplicación operativa en la detección de incendios es la localización de torres de vigilancia. Para la instalación de las mismas, es importante considerar zonas con gran visibilidad desde las que se cubra la mayor parte del terreno y conocer cuáles son los sitios de mayor peligro de incendios.

Las torres de vigilancia también pueden equiparse con cámaras de infrarrojo térmico para la detección de incendios. La señal se analiza automáticamente para indicar la ausencia o presencia de fuego y la información de tipos de combustible para detectar falsas alarmas; de existir fuego será una alarma si se produce en un área con presencia de combustible capaz de propagar un incendio, pero si se produce en un área urbana pero no combustible se considerará una falsa alarma (Ollero, Arrue, Martínez, & Murillo, 1999).

Es por ello, que una red de torres de vigilancia constituye un aspecto importante dentro de la infraestructura de prevención y protección ante incendios forestales, la misma que su eficiencia estará basada en un modelo espacial relacionado a la visibilidad de las cuencas y la concentración de focos de incendio (*ver Figura 4.3*).

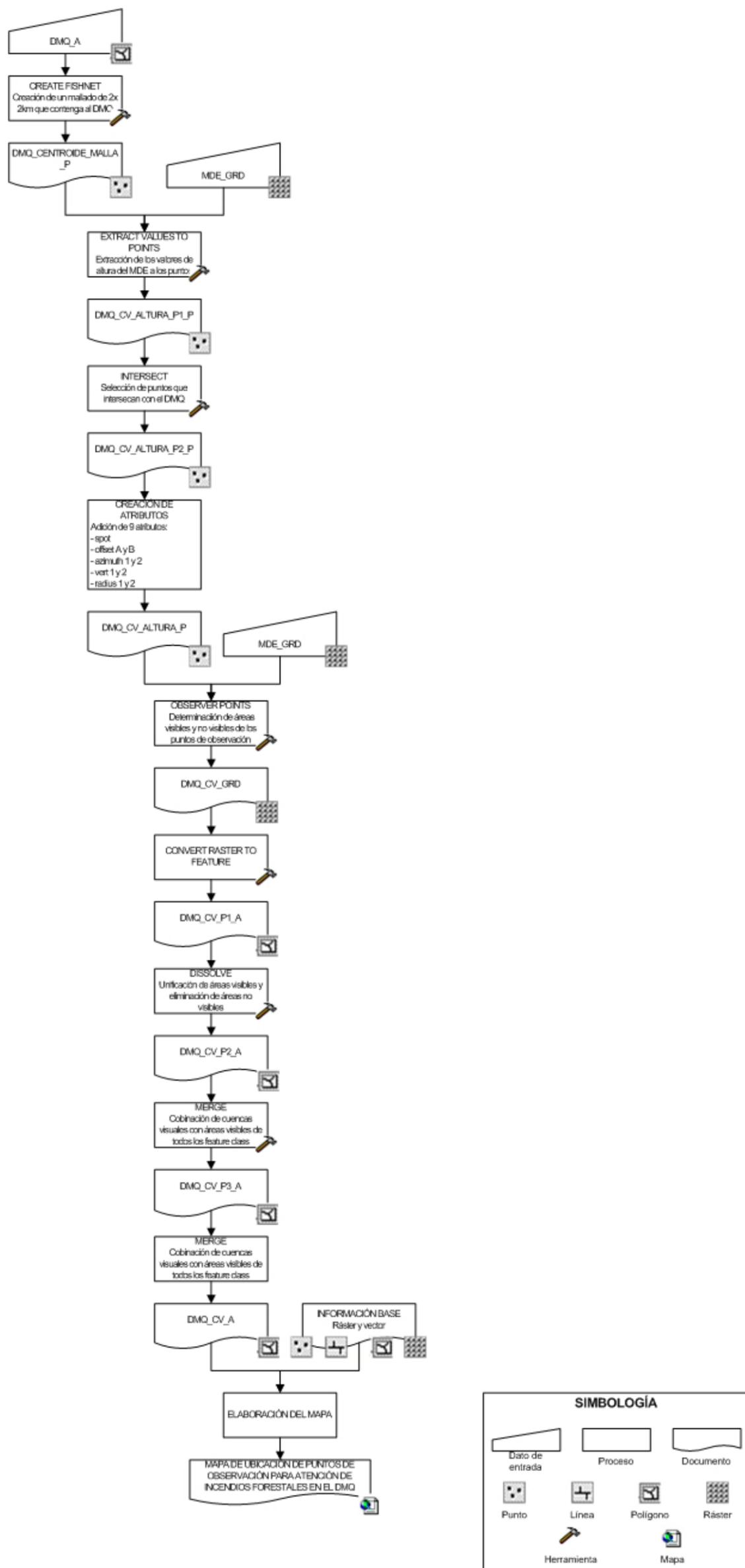


Figura 4.3: Modelo espacial para la ubicación de puntos de observación y generación de cuencas visuales para incendios forestales

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

4.2.1 Delimitación de cuadrantes

Al DMQ se aplicó un mallado con la herramienta *Fishnet de ArcGIS 9.3*, la cual generó dos *feature class*, el primero de líneas que representan los cuadrantes de 5 x 5km y otro de puntos que indican sus centroides, a los mismos que fueron asignados valores de altura por medio de la herramienta *Extract Values to Points* a partir del MDE.

4.2.2 Análisis de la exposición visual de la superficie

Para conocer cuán visibles pueden ser los objetos resultan útiles las herramientas de análisis de cuenca visual. Una cuenca visual permite identificar las celdas de un *raster* de entrada (para este estudio un MDE de 20m de resolución espacial), posibles de visualizar desde una o más ubicaciones de observación. El *raster* resultante almacena información con codificación binaria sobre qué puntos de observación puede ver cada celda, es decir, a las celdas que pueden visualizar determinados puntos se les asigna un valor de uno, en tanto a las que no pueden verlos un valor de cero.

4.2.3 Control del análisis de visibilidad

Para el estudio se considera el uso de la herramienta *Observer Points de ArcGIS 9.3*, que genera un *raster* de cuenca visual de salida, con el cual se identifica qué puntos de observador son visibles desde cada ubicación de superficie *raster* (ESRI (c), 2013).

Es posible limitar la zona a evaluar especificando ciertos atributos de la entidad tales como: altitud del punto de observación (SPOT), ángulos de escaneo horizontal y vertical (AZIMUTH1 y AZIMUTH2), desplazamientos verticales (OFFSETA y OFFSETB), distancias de escaneo (RADIUS1 y RADIUS2) y valores de elevación del punto de observación (AZIMUTH1 y AZIMUTH2) (ver Figura 4.4).

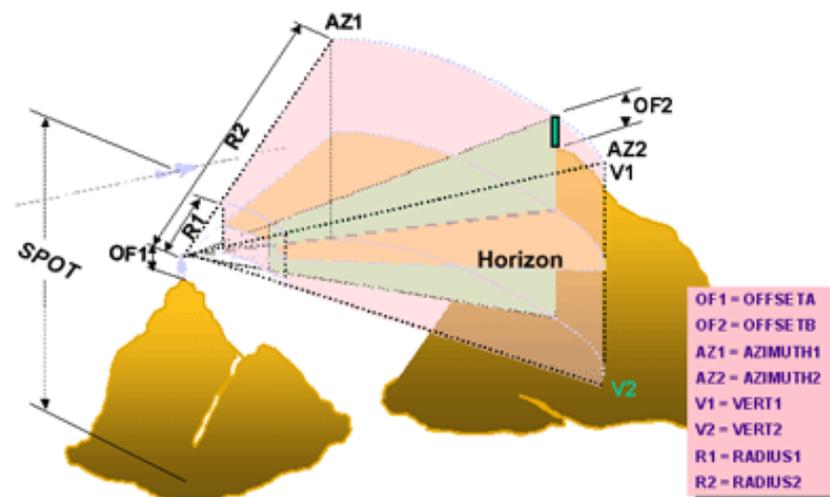


Figura 4.4: Parámetros para controlar los análisis de cuenca visual

Fuente: ESRI (2013)

En la tabla de atributos del *feature class* de puntos correspondiente a centroides, fueron especificadas ciertas restricciones de observación, las mismas que son numéricas. Si es que no se las diera se aplicarán valores predeterminados. Los detalles de las restricciones incorporadas de acuerdo a este estudio son las siguientes:

- a. **SPOT:** Define la elevación de la superficie donde se implantarán los puntos de observación. En el estudio mediante el MDE de 20m de resolución espacial.

- b. Desplazamiento:** Determina las distancias verticales en unidades de superficie que debe añadirse al valor de z de una ubicación en la superficie (*ver Figura 4.5*):
- **OFFSETA:** Distancia vertical que se agregará al valor de z del punto de observación. En este proyecto se asignó una altura de 25m para la torre de vigilancia.
 - **OFFSETB:** Distancia vertical que se agregará al valor de z de cada celda partícipe en el cálculo de visibilidad. Generalmente se lo utiliza para indicar la altura de la vegetación, razón por la que se estableció una altura media para el DMQ de cinco metros.

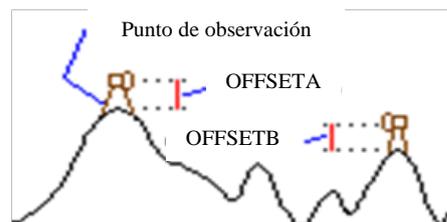


Figura 4.5: Desplazamiento de visibilidad

Fuente: ESRI (2013)

- c. Acimut:** Establece los límites de los ángulos horizontales de escaneo en grados entre 0 a 360 (*ver Figura 4.6*), que se realizan en el sentido de las agujas del reloj y son los siguientes:
- **AZIMUTH1:** Ángulo de inicio del rango de escaneo, el cual se lo definió para cero grados.
 - **AZIMUTH2:** Ángulo de finalización del rango de escaneo, mayor que el AZIMUTH1. Fue especificado el valor de 360°, esto de acuerdo a Martín (2002).

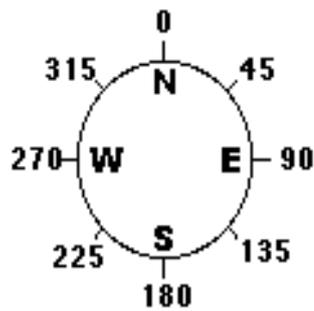


Figura 4.6: Direcciones de acimut de visibilidad

Fuente: ESRI (2013)

d. Ángulo vertical: Define los límites de los ángulos verticales de escaneo expresados en grados de 90 a -90. Los valores positivos representan ángulos sobre el plano horizontal, mientras que valores negativos los ángulos bajo este mismo plano (*ver Figura 4.7*). Lo conforman:

- **VERT1:** Ángulo que define el límite horizontal superior del escaneo. El valor establecido fue de 90°.
- **VERT2:** Ángulo que define el límite horizontal inferior del escaneo, su valor debe ser menor que VERT1. Se designó como valor -90°.

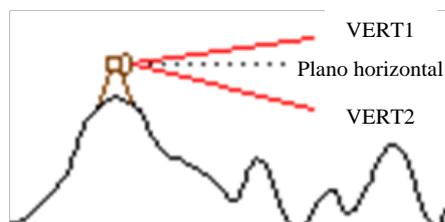


Figura 4.7: Límites del ángulo vertical de visibilidad

Fuente: ESRI (2013)

El plano horizontal (cero grados) es calculado mediante la suma del valor z del punto de observación al valor de OFFSETA.

- e. **Radio:** Limitan la distancia de búsqueda al identificar áreas visibles desde los puntos de observación (*ver Figura 4.8*).
- **RADIUS1:** Distancia inicial a partir de la cual se determina la visibilidad. El valor especificado es de cero metros.
 - **RADIUS2:** Las celdas que se encuentran más allá de la distancia establecida por RADIUS2 se excluyen del análisis, su valor debe ser mayor que el de RADIUS1. De acuerdo al modelo español señalado en Torres (2010), se fijó un valor de 10.000m como máxima capacidad visual para terreno accidentado.

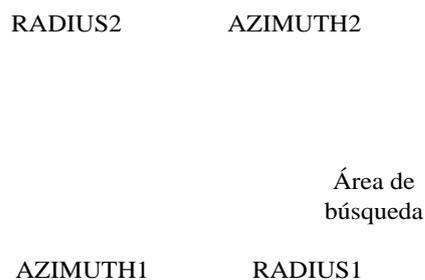


Figura 4.8: Radio de visibilidad

Fuente: ESRI (2013)

4.2.4 Procesamiento de puntos de observación

Fueron procesados los centroides del mallado anteriormente señalado que representan a los puntos de observación dentro del DMQ. A este *feature class* de puntos se especificaron restricciones de observación para el control del análisis de visibilidad, las cuales se señalan a continuación (*ver Tabla 4.2*):

Tabla 4.2: Restricciones de observación para el control del análisis de visibilidad

Parámetro de restricción	Configuración usada
SPOT	Herramienta <i>Extract Values to Points</i> del MDE de 5m de resolución a los centroides
OFFSETA	25m
OFFSETB	5m
AZIMUTH1	0°
AZIMUTH2	360°
VERT1	90°
VERT2	-90°
RADIUS1	0m
RADIUS2	10.000m

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

El *raster* de visibilidad generado incorpora información sobre cada punto de observación analizado dentro de su tabla de atributos. Esto en las columnas denominadas OBSn (donde “n” representa el número de puntos de observación), que almacenan los dos valores de visibilidad para cada punto, uno para las celdas que son visibles a los puntos de observación y cero para las que no.

Las celdas del *raster* pueden ser visualizadas por “n” puntos, con lo cual es posible establecer relaciones entre localidades y diferentes puntos de observación.

4.2.5 Selección de puntos de observación

Al área de estudio, por el número de puntos de observación, se realizó un nuevo mallado de 30 x 30km para el análisis de los *raster* de visibilidad por cuadrante y que cubran mayor superficie, razón por la cual a dichas coberturas se las transformó a formato vector para determinar su área e incorporar en su tabla de atributos un

código de acuerdo a su punto de observación generador y otro al cuadrante que los contiene.

4.2.6 Determinación de prioridades de observación

Se establecieron relaciones espaciales de unión y proximidad. La primera, para asociar el punto de observación con su polígono de visibilidad; y la segunda, los puntos de observación con la infraestructura vial y la concentración de focos de incendio, considerándose para ello la proximidad.

En la unión espacial o *Spatial Join* de *ArcGIS 9.3*, se consideraron los puntos de observación y sus polígonos de visibilidad para asociar las tablas de atributos de estas dos capas, en base de la localización de la primera con respecto a la otra; esto para conocer la distribución de los puntos de observación en cada cuadrante y el DMQ. De acuerdo a este análisis, se eliminaron puntos de observación con sus cuencas visuales que presentaron traslapes de visibilidad excesivos con el propósito de evitar zonas con sobrevigilancia. Además, se descartaron pero en menor medida, aquellas zonas catalogadas como áreas artificiales, esto específicamente a ciertas zonas del área consolidada de la ciudad de Quito.

El siguiente criterio tomado en cuenta dentro de las relaciones espaciales fue el de proximidad. Inicialmente, intervinieron la cobertura de visibilidad con la de concentración de focos de incendio. Esta última muestra la concentración de incendios principalmente alrededor de los asentamientos urbanos, debido a actividades negligentes en su mayoría en el uso del fuego. Se determinaron puntos

prioritarios de observación con sus respectivos polígonos de visibilidad que abarquen zonas de concentración de focos de incendio alta y media, por la recurrencia existente en ciertas áreas, las mismas que fueron generadas con los puntos de focos de incendio del INPE (2013). También fueron seleccionados puntos opcionales de observación distribuidos heterogéneamente, que cubran junto con los prioritarios la mayor parte del DMQ, muchos de ellos incluyen zonas de concentración de focos de incendio catalogadas como bajas.

La accesibilidad representa una restricción importante para la localización de infraestructura en la detección de incendios “por la necesidad de proveer de suministros al torrero y movilizarlo no solamente durante su jornada de trabajo, sino en la eventualidad de que se produzca alguna emergencia” (Tapia, 2008); y si fuera el caso por razones de mantenimiento al instalarse sensores térmicos en las torres. Es por ello que el segundo análisis de proximidad se llevó a cabo con los puntos de observación y la infraestructura vial, descartando en algunos casos a los primeros por su excesiva distancia a los ejes viales.

Los *feature class* de visibilidad con sus respectivos puntos de observación cubren en su mayoría la superficie de cada cuadrante y por ende de cada administración zonal, pero debido a la topografía y la presencia significativa de drenajes en el DMQ existen zonas en las que no se obtuvo cobertura. De acuerdo a la recurrencia de incendios forestales, así como la cercanía a áreas artificiales e infraestructura vial, las prioridades de observación y protección presentan cierto nivel de coherencia con las zonas determinadas como críticas en base a la concentración de focos de incendio.

Se determinaron 83 puntos de observación para la detección de incendios forestales distribuidos en el DMQ (ver Figura 4.9, Anexo A16), que su implantación fue tipificada según su área de cobertura basada en las zonas denominadas como críticas de acuerdo a la concentración de focos de incendio.

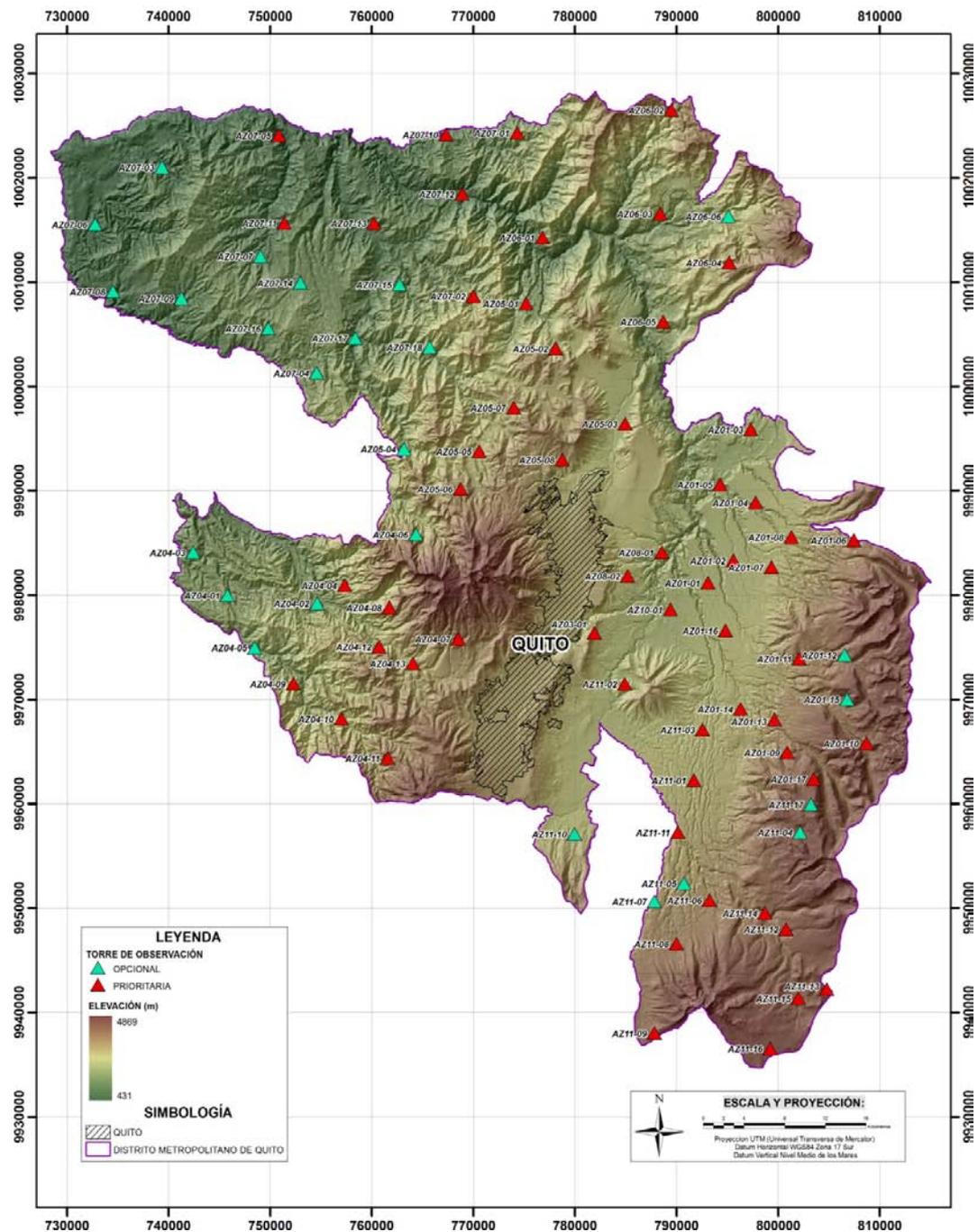


Figura 4.9: Distribución de los puntos de observación para incendios forestales en el DMQ

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

4.3 Evaluación Multicriterio para la identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales

La Evaluación Multicriterio se define como un conjunto de técnicas que orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones (Gómez & Barredo, 2005).

De acuerdo a Sánchez (2001), los métodos y modelos para la toma de decisiones con múltiples criterios constituyen herramientas útiles en el análisis de problemas complejos. Los procesos de toma de decisiones han sido analizados y modelados matemáticamente como herramientas que permiten contar con una mejor visualización de los factores que intervienen en los procesos, así como las preferencias existentes.

En la Evaluación Multicriterio, un objetivo constituye una función a desarrollar ya que indica la estructuración de la regla de decisión o el tipo de regla de decisión a utilizar (Eastman, Kyem, Toledano, & Jin, 1995). En base al objetivo se estructura la regla de decisión adecuada al problema planteado que integre los criterios establecidos a partir de dicho objetivo.

Para el desarrollo de un proyecto de Evaluación Multicriterio, los objetivos son fundamentales puesto que pueden ser múltiples en determinados problemas de planificación, decisión o localización de actividades, con lo cual se plantea una evaluación multiobjetivo. Los objetivos y decisiones son planteados en base a un elemento determinado, es decir, una serie de alternativas. Cada alternativa se caracteriza o define por los distintos criterios o factores que intervienen en la evaluación. La mayoría de los métodos de Evaluación Multicriterio se han desarrollado para evaluar un número pequeño de alternativas sobre la base de un

número limitado de criterios, en el orden de ocho alternativas y ocho criterios (Voogd, 1983), convirtiéndose en un aspecto fundamental el decidir por alguno de estos métodos.

En la Figura 4.10 mostrada a continuación, se observa la secuencia de los procesos ejecutados sobre los datos, los mismos que están desarrollados sobre un modelo especial y la Evaluación Multicriterio.

4.3.1 Decisión multicriterio

La Evaluación Multicriterio puede basarse en uno o varios objetivos, los cuales pueden ser simples o múltiples, y dentro éstos últimos complementarios o conflictivos. Razón por la que en una evaluación pueden originarse combinaciones lógicas entre objetivos – criterios (*ver Tabla 4.3*).

Tabla 4.3: Criterios y objetivos en la Evaluación Multicriterio

Objetivo/Criterio	Criterio		
	Simple	Múltiple	
Objetivo	Simple	A	B
	Múltiples	C	D

Fuente: Gómez y Barredo (2005)

Para nuestro estudio se ha tomado en cuenta la posibilidad relacionada con un objetivo simple, el cual requiere la evaluación de varios criterios o variables (B en la Tabla 4.4), que consiste en identificar lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales.

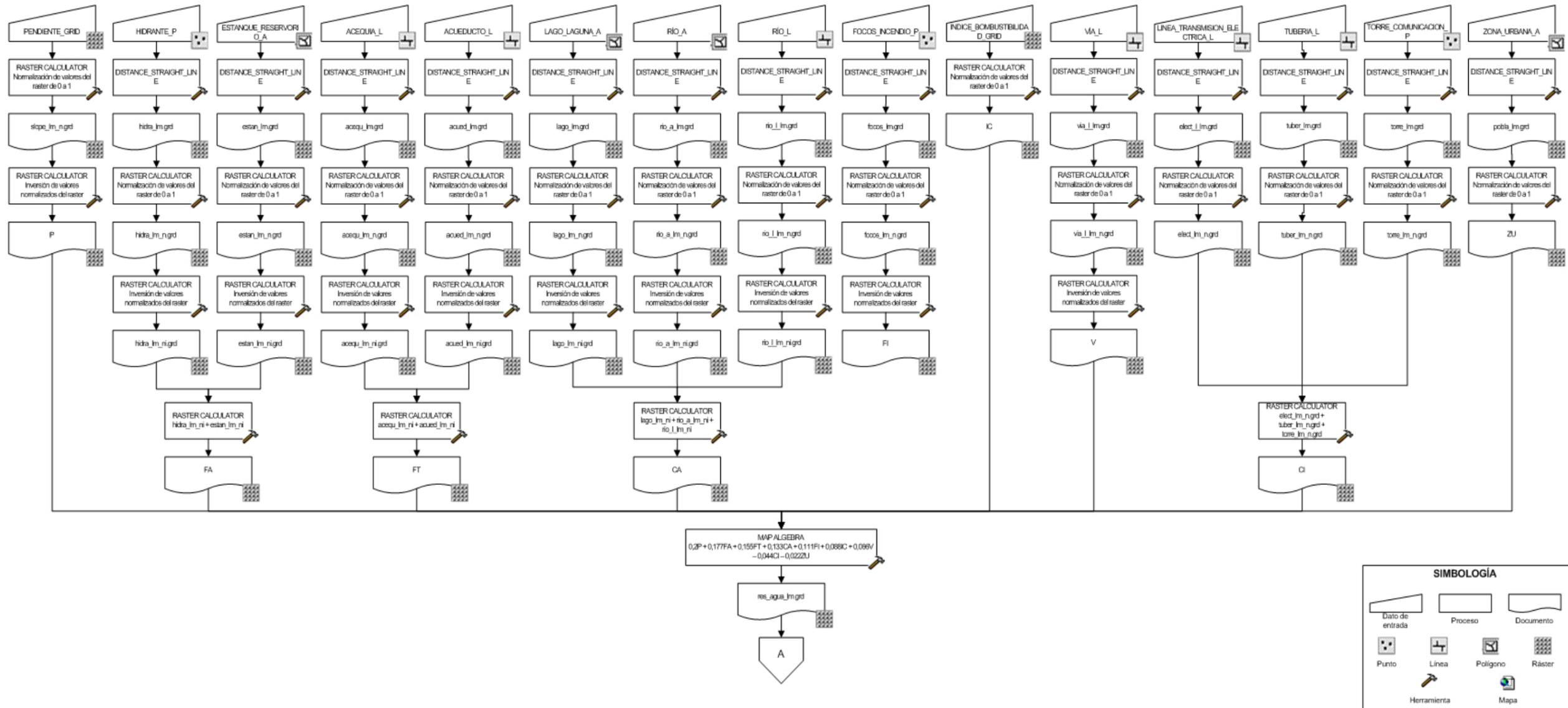


Figura 4.10: Modelo espacial para la identificación lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

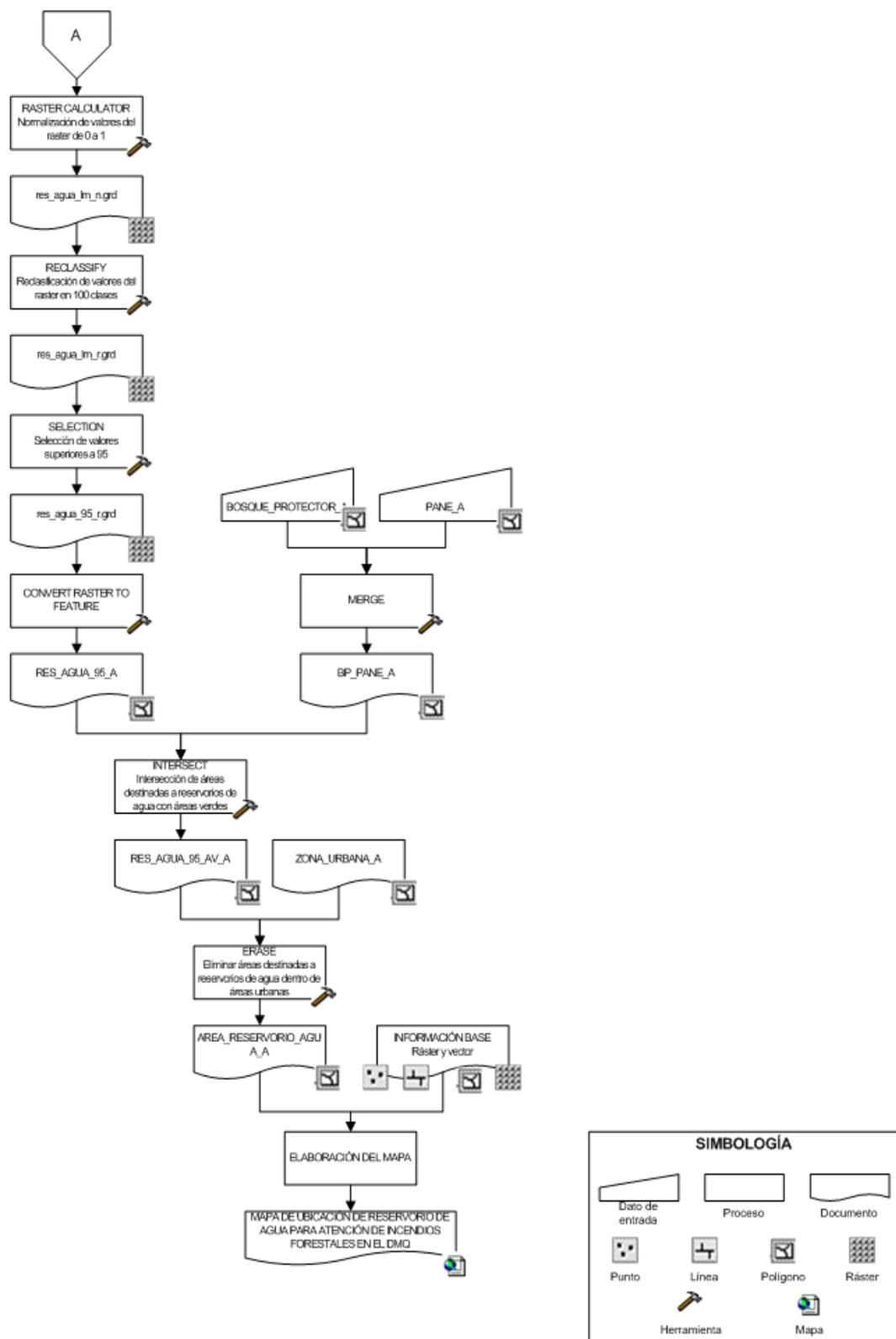


Figura 4.10: Modelo espacial para la identificación lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales (continuación)

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

4.3.2 Selección de criterios

Una vez planteado el objetivo y el espacio a evaluarse, es necesario definir los criterios (variables) que van a ser empleados. Estos criterios se encuentran asociados a entidades geográficas (factores) posibles de representar en capas temáticas; de acuerdo a nuestro objetivo se emplearán los siguientes (*ver Tabla 4.4*):

Tabla 4.4: Criterios y sus factores para la evaluación

Criterio	Entidad geográfica	Formato del factor
Cobertura vegetal	Índice de combustibilidad	Raster
	Aeropuertos	Vector
Distancia a áreas artificiales	Edificaciones	Vector
	Invernaderos	Vector
	Rellenos sanitarios	Vector
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	Estanques	Vector
	Hidrantes	Vector
	Reservorios	Vector
Distancia a cuerpos de agua	Ríos	Vector
	Lagos	Vector
	Lagunas	Vector
Distancia a concentración de focos de incendio	Focos de incendio	Raster
Distancia a redes de distribución de agua	Acequias	Vector
	Acueductos	Vector
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	Líneas de transmisión eléctrica	Vector
	Poliductos	Vector
	Torres de comunicación	Vector
Distancia a vías	Vías	Vector
Pendiente	Morfología del terreno	Raster

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Es por ello, que a partir de un objetivo único es posible establecer un conjunto de criterios que inciden en la actividad evaluada. Luego, mediante la integración de los criterios en forma de capas temáticas en la regla de decisión, se obtiene un modelo de acuerdo al objetivo; en dicho modelo cada dato espacial recibe un valor, proveniente

de un índice que indica de mayor a menor la capacidad de cada alternativa frente a la actividad evaluada.

4.3.3 Tratamiento de criterios

Según Moreno (2008), la distancia entre lugares constituye una variable fundamental para muchos procesos ambientales, físico – naturales o humanos; la separación, mayor o menor, es un condicionante esencial para el desempeño de ellos, por lo cual, su cálculo es necesario para introducir tal dato en análisis y tratamientos. Basado en esto, a los criterios en formato vector que intervienen en la evaluación, se les aplicó la herramienta *Straight Line* de *ArcGIS 9.3*, fundamentada en la distancia euclidiana que constituye una distancia medida en línea recta, la misma que a partir de las entidades de entrada genera un *raster* en el que se calcula para cada celda la distancia mínima hasta una entidad. Los valores del *raster* de salida son más altos conforme se encuentran más cerca de la entidad de entrada, en nuestro caso, los criterios. Es por esto, que se tomaron en cuenta ciertas consideraciones (*ver Tabla 4.5*):

- Los criterios que favorezcan para la localización de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua, tendrán en las celdas de su *raster* de salida valores altos conforme se encuentran más cerca de la entidad de entrada. Para ello es necesario que los valores del *raster* resultante sean invertidos mediante el *Raster Calculator* de *ArcGIS 9.3*.
- Mientras que los criterios que se constituyen como limitantes o restrictivos para la localización de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de

almacenamiento de agua, presentarán en las celdas de su *raster* de salida valores bajos conforme se encuentran más cerca de la entidad de entrada.

Tabla 4.5: Consideración de los criterios y sus factores para la evaluación

Criterio	Entidad geográfica	Consideración
Cobertura vegetal	Índice de combustibilidad	contribuyente
	Aeropuertos	Limitante
Distancia a áreas artificiales	Edificaciones	Limitante
	Invernaderos	Limitante
	Rellenos sanitarios	Limitante
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	Estanques	contribuyente
	Hidrantes	contribuyente
	Reservorios	contribuyente
	Ríos	contribuyente
Distancia a cuerpos de agua	Lagos	contribuyente
	Lagunas	contribuyente
	Focos de incendio	contribuyente
Distancia a concentración de focos de incendio	Acequias	contribuyente
	Acueductos	contribuyente
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	Líneas de transmisión eléctrica	Limitante
	Poliductos	Limitante
	Torres de comunicación	Limitante
Distancia a vías	Vías	contribuyente
Pendiente del terreno	Morfología del terreno	contribuyente

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

4.3.4 Normalización de criterios

Para la integración de distintos criterios, factores o variables, independientemente del modelo de evaluación a utilizar, es necesario que dicha evaluación “se realice sobre escalas comparables en tipo, dispersión eventual posición del cero, rango de extensión, unidad de medida, etc.” (Barba-Romero & Pomerol, 1997). Según Romero (1993), los valores absolutos de los criterios pueden ser diferentes, razón por la cual es necesaria la normalización para evitar soluciones sesgadas hacia las variables que alcancen los valores más altos.

Se realizó un ajuste mediante el cual se reescalaron los valores de los *raster* de entrada que presentaban valores máximos y mínimos entre cero y uno mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{x}{x_{max}} \quad [\text{Ec. 4.1}]$$

Donde:

- N:** Normalización.
- x:** Valor de la celda del *raster* de entrada.
- x_{max}:** Valor máximo de la celda del *raster* de entrada.

Para los valores del *raster* de entrada con valores máximos y mínimos que no comprendían entre cero y uno, se utilizó la ecuación:

$$N = \frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \quad [\text{Ec. 4.2}]$$

Donde:

- N:** Normalización.
- x:** Valor de la celda del *raster* de entrada.
- x_{max}:** Valor máximo de la celda del *raster* de entrada.
- x_{min}:** Valor mínimo de la celda del *raster* de entrada.

4.3.5 Método de comparación por pares de Saaty

El Proceso Analítico Jerárquico (APH en sus siglas por *Analytic Hierarchy Process*) es un método matemático que evalúa alternativas cuando son considerados varios criterios (Sánchez, 2001). La aplicación del modelo se divide en dos etapas:

- Diseño de la jerarquía.
- Proceso de evaluación.

4.3.6 Diseño de la jerarquía

Esta fase consiste en un proceso en el que son identificados los elementos a intervenir en el proceso de la toma de decisión, para posteriormente ordenarlos en niveles que esquematicen y describan la problemática. Inicialmente se identifican los elementos que intervienen en el proceso de toma de decisión e indica los niveles en que estos elementos pueden ser agrupados.

4.3.7 Proceso de evaluación

En esta fase de tipo matemática, que corresponde a la evaluación de la importancia de las alternativas respecto a los elementos que intervienen en el problema.

El proceso APH utiliza comparaciones biunívocas, es decir, comparaciones entre pares de elementos (comparaciones uno a uno). En base a estas comparaciones y el uso de la teoría de matrices, el modelo establece prioridades entre los elementos de un nivel respecto a un nivel del inmediato superior.

El procedimiento de comparaciones biunívocas compara los criterios con respecto al objetivo principal. Razón por la cual se debe considerar las siguientes preguntas:

- Con respecto al objetivo principal. ¿Qué criterio es más importante?
- Si la respuesta es uno u otro. ¿Cuán más importante es él?

Para esto, el modelo provee una tabla con la cual es posible hacer la comparación subjetiva biunívoca de acuerdo a una escala de medida establecida para la asignación de los juicios de valor (*ver Tabla 4.6*):

Tabla 4.6: Escala de Saaty

Escala numérica	Definición	Interpretación
1	Igual importancia de ambos elementos.	Los dos elementos contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia de un elemento sobre el otro.	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un elemento sobre el otro.
5	Fuerte importancia de un elemento sobre el otro.	Uno de los elementos es fuertemente favorecido.
7	Muy fuerte importancia de un elemento sobre el otro.	Uno de los elementos es fuertemente dominante.
9	Extrema importancia de un elemento sobre el otro.	La evidencia que favorece a uno de los elementos es del mayor orden de afirmación.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Usados para juicios intermedios.

Fuente: Saaty (1997)

En 2001, Sánchez sostiene que existe un límite psicológico de 7 ± 2 ítems al realizar comparaciones simultáneas, lo que sugiere tener hasta nueve puntos de referencia diferentes para describir preferencias cualitativas. Es en base a esto y al objetivo de la evaluación, que los factores fueron asociados en nueve criterios que serán comparados mediante la matriz de comparación biunívoca.

En la Tabla 4.7, se observa la matriz de comparación biunívoca (matriz cuadrada), en la cual el número de filas y columnas se definió de acuerdo al número

de criterios, para comparar su importancia entre cada uno de ellos asignando los valores entre uno y nueve considerando la escala Saaty. Con esto se busca “llegar a expresar, en términos cuantitativos, la importancia de los distintos elementos para acoger o ser afectados por una determinada actuación” (Aguiló, 1991).

Tabla 4.7: Matriz de comparación biunívoca

Criterio	Distancia a redes de distribución de agua	Cobertura vegetal	Distancia a concentración de focos de incendio	Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	Pendiente del terreno	Distancia a cuerpos de agua	Distancia a áreas artificiales	Distancia a vías
Distancia a redes de distribución de agua	1	7 4	7 5	7 8	7 2	7 9	7 6	7 1	7 3
Cobertura vegetal	0,571	1	4 5	4 8	4 2	4 9	4 6	4 1	4 3
Distancia a concentración de focos de incendio	0,714	1,25	1	5 8	5 2	5 9	5 6	5 1	5 3
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	1,143	2	1,6	1	8 2	8 9	8 6	8 1	8 3
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	0,286	0,5	0,4	0,25	1	2 9	2 6	2 1	2 3
Pendiente del terreno	1,286	2,25	1,8	1,125	4,5	1	9 6	9 1	9 3
Distancia a cuerpos de agua	0,857	1,5	1,2	0,75	3	0,667	1	6 1	6 3
Distancia a áreas artificiales	0,143	0,25	0,2	0,125	0,5	0,111	0,1667	1	1 3
Distancia a vías	0,429	0,75	0,6	0,375	1,5	0,333	0,5	3	1

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Una vez estructurada la matriz de comparación con los criterios establecidos, se realiza el cálculo de los autovectores (W_i), mediante la raíz enésima de la multiplicación de cada uno de los criterios de comparación (C_n), los cuales se indican en la Tabla 4.8:

Tabla 4.8: Cálculo de los autovectores (W_i)

Criterio	Distancia a redes de distribución de agua	Cobertura vegetal	Distancia a concentración de focos de incendio	Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	Pendiente del terreno	Distancia a cuerpos de agua	Distancia a áreas artificiales	Distancia a vías	Autovectores (W_i)
Distancia a redes de distribución de agua	1	$\frac{7}{4}$	$\frac{7}{5}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{7}{9}$	$\frac{7}{6}$	$\frac{7}{1}$	$\frac{7}{3}$	1,688
Cobertura vegetal	0,571	1	$\frac{4}{5}$	$\frac{4}{8}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{4}{9}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{4}{1}$	$\frac{4}{3}$	0,965
Distancia a concentración de focos de incendio	0,714	1,25	1	$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{9}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{5}{3}$	1,206
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	1,143	2	1,6	1	$\frac{8}{2}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{8}{6}$	$\frac{8}{1}$	$\frac{8}{3}$	1,929
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	0,286	0,5	0,4	0,25	1	$\frac{2}{9}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{2}{3}$	0,482
Pendiente del terreno	1,286	2,25	1,8	1,125	4,5	1	$\frac{9}{6}$	$\frac{9}{1}$	$\frac{9}{3}$	2,170
Distancia a cuerpos de agua	0,857	1,5	1,2	0,75	3	0,667	1	$\frac{6}{1}$	$\frac{6}{3}$	1,447
Distancia a áreas artificiales	0,143	0,25	0,2	0,125	0,5	0,111	0,1667	1	$\frac{1}{3}$	0,241
Distancia a vías	0,429	0,75	0,6	0,375	1,5	0,333	0,5	3	1	0,723

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Se realiza el cálculo de los pesos parciales (P_i), a través de la sumatoria vectorial de los criterios de comparación (C_n) (ver Tabla 4.9):

$$P_i = \sum C_n \quad [\text{Ec. 4.3}]$$

Tabla 4.9: Cálculo de los pesos parciales (P_i)

Criterio	Distancia a redes de distribución de agua	Cobertura vegetal	Distancia a concentración de focos de incendio	Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	Pendiente del terreno	Distancia a cuerpos de agua	Distancia a áreas artificiales	Distancia a vías
Distancia a redes de distribución de agua	1	$\frac{7}{4}$	$\frac{7}{5}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{7}{2}$	$\frac{7}{9}$	$\frac{7}{6}$	$\frac{7}{1}$	$\frac{7}{3}$
Cobertura vegetal	0,571	1	$\frac{4}{5}$	$\frac{4}{8}$	$\frac{4}{2}$	$\frac{4}{9}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{4}{1}$	$\frac{4}{3}$
Distancia a concentración de focos de incendio	0,714	1,25	1	$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{9}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{5}{1}$	$\frac{5}{3}$
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	1,143	2	1,6	1	$\frac{8}{2}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{8}{6}$	$\frac{8}{1}$	$\frac{8}{3}$
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	0,286	0,5	0,4	0,25	1	$\frac{2}{9}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{2}{1}$	$\frac{2}{3}$
Pendiente del terreno	1,286	2,25	1,8	1,125	4,5	1	$\frac{9}{6}$	$\frac{9}{1}$	$\frac{9}{3}$
Distancia a cuerpos de agua	0,857	1,5	1,2	0,75	3	0,667	1	$\frac{6}{1}$	$\frac{6}{3}$
Distancia a áreas artificiales	0,143	0,25	0,2	0,125	0,5	0,111	0,1667	1	$\frac{1}{3}$
Distancia a vías	0,429	0,75	0,6	0,375	1,5	0,333	0,5	3	1
Pesos parciales (P_i)	6,429	11,25	9	5,625	22,5	5	7,5	45	15

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

En la Tabla 4.10, se encuentra los autovectores normalizados (T_i), obtenidos mediante la división de cada autovector (W_i) con su sumatoria total (W):

$$T_i = \frac{W_i}{W} \quad [\text{Ec. 4.4}]$$

Tabla 4.10: Cálculo de los autovectores normalizados (T_i)

Criterio	Autovectores (Wi)	Autovectores normalizados (Ti)
Distancia a redes de distribución de agua	1,688	0,156
Cobertura vegetal	0,965	0,089
Distancia a concentración de focos de incendio	1,206	0,111
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	1,929	0,178
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	0,482	0,044
Pendiente del terreno	2,17	0,200
Distancia a cuerpos de agua	1,447	0,133
Distancia a áreas artificiales	0,241	0,022
Distancia a vías	0,723	0,067
	$\Sigma =$ 10,851	1

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

La sumatoria total de los autovectores normalizados (W) debe ser igual a uno para que exista consistencia en el procedimiento.

Se calcula el valor del factor lamda (λ_i), para verificar la coherencia del modelo a evaluar. En la Tabla 4.11, se señalan los valores calculados a partir de la multiplicación entre cada autovector normalizado (T_i) por los pesos parciales (P_i); para posteriormente saber el valor del lamda máximo (λ_{max}) mediante la sumatoria total de sus valores.

Tabla 4.11: Cálculo del factor lamda (λ_i)

Criterio	Autovectores (Wi)	Autovectores normalizados (Ti)	λ_i
Distancia a redes de distribución de agua	1,688	0,156	1
Cobertura vegetal	0,965	0,089	1
Distancia a concentración de focos de incendio	1,206	0,111	1
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	1,929	0,178	1
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	0,482	0,044	1
Pendiente del terreno	2,17	0,200	1
Distancia a cuerpos de agua	1,447	0,133	1
Distancia a áreas artificiales	0,241	0,022	1
Distancia a vías	0,723	0,067	1
	$\Sigma =$ 10,851	1	9

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Ligeros cambios en la valoración de los criterios afectan de manera similar la magnitud del lamda máximo; la desviación del mismo con respecto al número de criterios evaluados es una desviación de consistencia conocida como índice de consistencia (CI). Este último se lo obtiene a partir del lamda máximo (λ_{max}) y el número de criterios de la matriz de comparación (n):

$$CI = \frac{(\lambda_{max}-n)}{n-1} \quad [\text{Ec. 4.5}]$$

$$CI = \frac{(9-9)}{9-1}$$

$$CI = 0$$

De existir consistencia en la matriz, el valor del lamda máximo (λ_{max}) debe ser lo más próximo al número de criterios (n) que intervienen en la evaluación; éste se utiliza en la estimación de la consistencia como indicador de la proporcionalidad de las preferencias en los juicios de valor:

$$\lambda_{max} = n \quad [\text{Ec. 4.6}]$$

El índice de consistencia aleatorio (RCI) representa el índice de consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente a partir de una escala de uno a nueve, con juicios de valor recíproco y diagonal igual a uno; el 1,45 es seleccionado a partir de valores previamente determinados, de acuerdo con el orden de cada matriz (*ver Tabla 4.12*):

Tabla 4.12: Valores del índice de consistencia aleatoria (RCI)

Orden de la matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RCI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fuente: Sánchez (2001)

$$RCI = \frac{1,45(n-2)}{n} \quad [\text{Ec. 4.7}]$$

$$RCI = \frac{1,45(9-2)}{9}$$

$$RCI = 1,127$$

El valor que entrega este procedimiento para el cálculo de la consistencia es la relación de consistencia (CR), este valor se establece a partir del índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatoria (RCI):

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad [\text{Ec. 4.8}]$$

$$CR = \frac{0}{1,127}$$

$$CR = 0$$

Si el índice de consistencia es inferior a 0,10 se considera adecuados los juicios de valor asignados.

Mediante la aplicación de este modelo se ha determinado las ponderaciones de importancia, todas ellas calculadas mediante el autovector normalizado (W) de la matriz de comparación biunívoca.

4.3.8 Sumatoria Lineal Ponderada

Se optó por la Sumatoria Lineal Ponderada por ser uno de los métodos más empleados en este tipo de evaluaciones por su sencillez y fácil implementación.

Este procedimiento multiplica el valor de cada criterio por su peso (autovector normalizado) y posteriormente sumar los resultados. La ecuación empleada para el modelo se estructuró tomando las siguientes consideraciones en base a los criterios empleados (*ver Tabla 4.13*):

- Los valores de los criterios que favorezcan para la localización de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua serán aditivos.
- Los valores de los criterios que limiten o restrinjan para la localización de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua serán negativos.

Tabla 4.13: Criterios y pesos obtenidos con el modelo APH

Criterio	Peso (autovector normalizado)	Consideración del criterio
Distancia a redes de distribución de agua	1,688	Aditivo
Cobertura vegetal	0,965	Aditivo
Distancia a concentración de focos de incendio	1,206	Aditivo
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	1,929	Aditivo
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	0,482	Negativo
Pendiente del terreno	2,17	Aditivo
Distancia a cuerpos de agua	1,447	Aditivo
Distancia a áreas artificiales	0,241	Negativo
Distancia a vías	0,723	Aditivo

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Mediante la sumatoria de la ecuación, se obtuvo una cobertura *raster* preliminar con un valor máximo de 1,489 y un valor mínimo de 1,206; los cuales se normalizaron al valor máximo de 1 y mínimo de 0.

A continuación, de los valores normalizados fueron seleccionados los mayores a 0,95 puesto que se generan áreas más ajustadas de acuerdo a los criterios tomados en cuenta para la evaluación (*ver Figura 4.11, Anexo A17*).

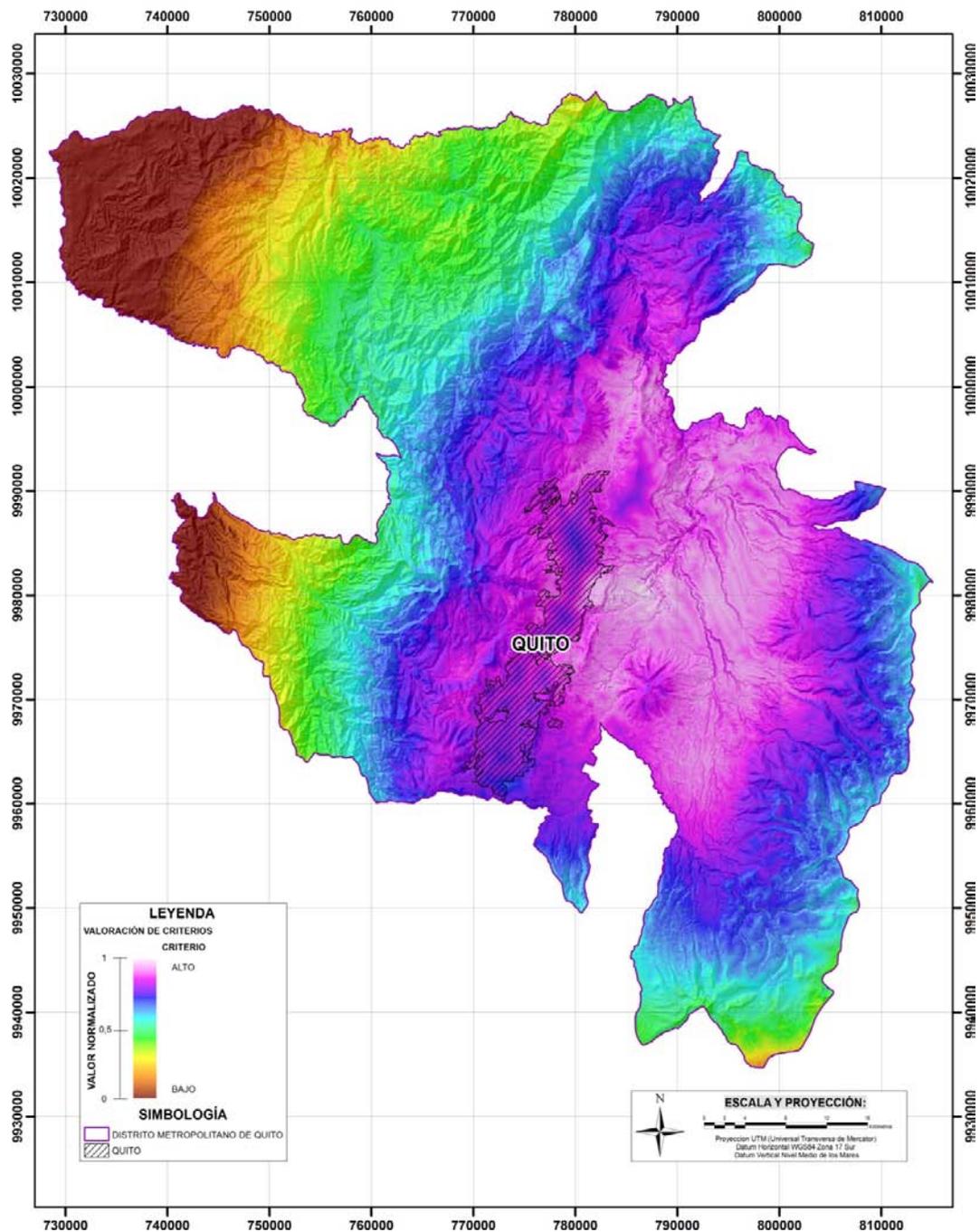


Figura 4.11: Valoración de áreas óptimas para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

4.4 Generación del modelo de predicción y probabilidad de incendios forestales con la metodología de Autómatas Celulares

4.4.1 Descripción del software para el modelamiento

DINAMICA EGO² constituye una herramienta de modelación para el diseño de modelos espaciales estáticos y modelos dinámicos, que involucran: aproximaciones multi – regionales, complejos algoritmos para el análisis y simulación de fenómenos espacio – temporales, iteraciones anidadas, manipulación y combinación algebraica de datos en distintos formatos (constantes, mapas, matrices y tablas), procesos de decisión para bifurcar y juntar flujos de ejecución y retroalimentaciones dinámicas. Todo esto almacenado en un lenguaje *script* en formato XML o en el lenguaje de programación de EGO (Soares, Rodrigues, & Costa, 2009).

El entorno del software está escrito en C++ y Java. Contiene algoritmos llamados *functors* que ejecutan una operación específica y se encuentran secuenciados para establecer un flujo de datos en forma gráfica. Es posible agrupar a los *functors* dentro de otros, los cuales son utilizados para ejecutar iteraciones o procesar datos de una región específica de un mapa.

4.4.2 Interfaz gráfica

Los modelos pueden ser diseñados como diagramas y su ejecución sigue una cadena de flujo de datos. Son expresados como una secuencia de *functors* conectados a través de insumos y productos compatibles, permitiendo el flujo de datos a través

² DINAMICA EGO: Software de modelación para el diseño de modelos espaciales estáticos y modelos dinámicos. El término EGO hace referencia al concepto de *Environment for Geoprocessing Objects* (es español entorno para objetos de geoprocésamiento).

de ellos para producir el resultado que representa la solución de un tema ambiental.

La interfaz gráfica se divide en:

- **Library (biblioteca):** Repositorio de *functors* disponibles organizados en grupos de acuerdo a su función y naturaleza.
- **Sketch (bosquejo):** Repositorio de herramientas para conectar, editar, seleccionar, mover *functors* y editar sus puertos, escribir comentarios sobre un *functor*, organizar la disposición del modelo y mostrar esta disposición en distintos acercamientos.
- **Message Log (registro de mensajes):** Espacio para el reporte de mensajes de texto que muestran advertencias, errores, información y resultados.
- **Bird View (vista de ave):** Visualizador de un esquema general del modelo.
- **Functor Properties (propiedades del functor):** Atributos de los *functors*.
- **Explorer Tabs (explorador de pestañas):** Explorador de pestañas.

4.4.3 Estructura y formato de datos

Los datos que se manejan en distintos formatos incluyen: archivos de los coeficientes de pesos de evidencia, matrices, *raster* y tablas. Referente a datos espaciales, deben estar en formato *raster*, georreferenciados y al mismo punto de registro, tengan el mismo número de columnas y filas (*ver Figura 4.12*).



Figura 4.12: Cubo de datos *raster*

Fuente: Dinámica EGO (2009)

4.4.4 Desarrollo del modelo

a. Desarrollo de la primera etapa

- **Primer paso:** Cálculo de la matriz de transición (ver Figura 4.13).

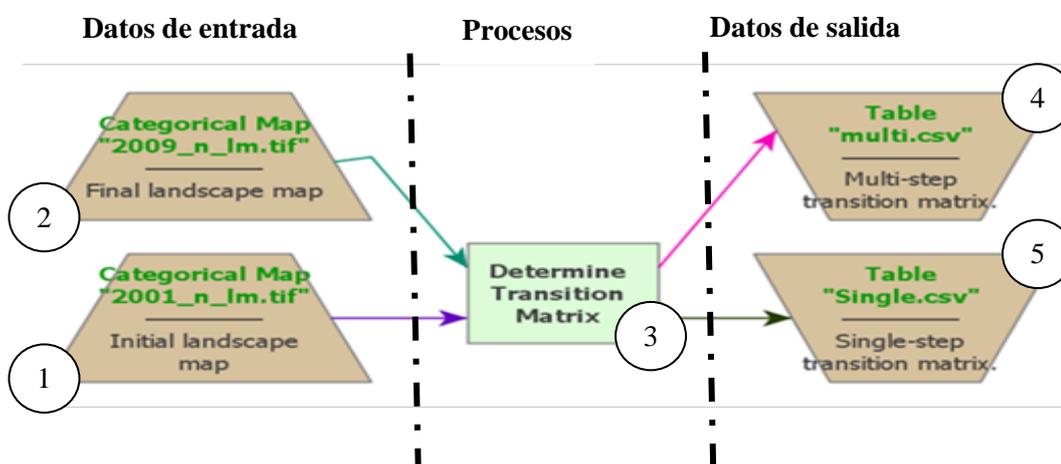


Figura 4.13: Estructura de la matriz de transición

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de entrada:**

- 1 *Functor Load Categorical Map*, almacena el *raster* de los focos de incendio del 2001 y va conectado con el *functor Determine Transition Matrix* (ver *Figura 4.14*).

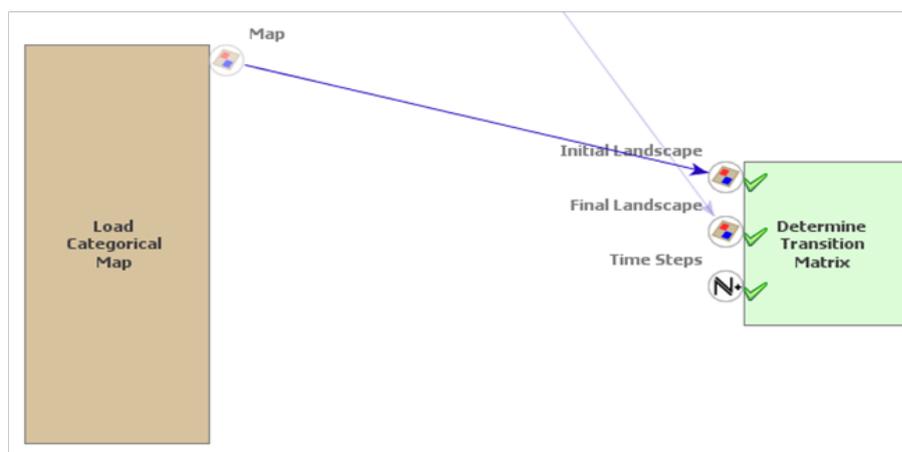


Figura 4.14: Conexión interna entre *Load Categorical Map* (focos de incendio 2001) y *Determine Transition Matrix*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 2 *Functor Load Categorical Map*, carga el *raster* de los focos de incendio del 2009 y va conectado con el *functor Determine Transition Matrix* (ver *Figura 4.15*).

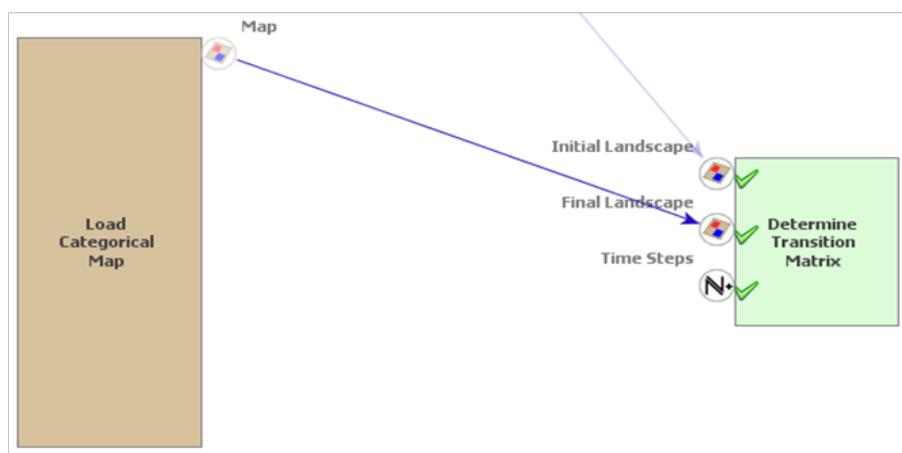


Figura 4.15: Conexión interna entre *Load Categorical Map* (focos de incendio 2009) y *Determine Transition Matrix*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Procesos:**

- 3 *Functor Determine Transition Matrix*, ubicado en los *functors* de calibración de la biblioteca, realiza una operación algebraica por medio del intervalo de tiempo existente entre los *raster* de focos de incendio inicial y final, en este caso serán ocho años (ver *Figura 4.16*).

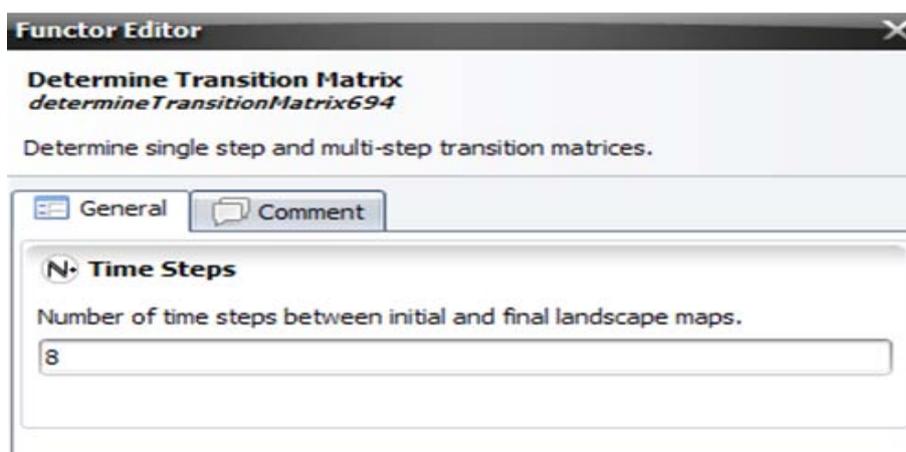


Figura 4.16: Intervalo de tiempo entre los *raster* de focos de incendio inicial y final

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de salida:**

- 4 *Functor Save Lookup Table*, guarda la matriz de transición llamada *Multi Step Matrix* generada por la operación algebraica, la cual da como resultados tasas que indican el porcentaje de cambio existente por año entre los *raster* de inicio y fin colocados en los datos de entrada. En este caso la tabla *Multi Step Matrix*, dará el porcentaje de incremento de los focos de incendio producido por año, dentro del DMQ.
- 5 *Functor Save Lookup Table*, almacena la matriz de transición llamada *Single Step Matrix* generada por la operación algebraica, la cual da como resultados tasas que indican el porcentaje de cambio existente en los ocho años entre los *raster* de inicio y fin colocados en los datos de entrada. Es así que la tabla *Single Step Matrix*, dará el porcentaje de incremento de los focos de incendio producido en los ocho años, dentro del DMQ (ver Figura 4.17).

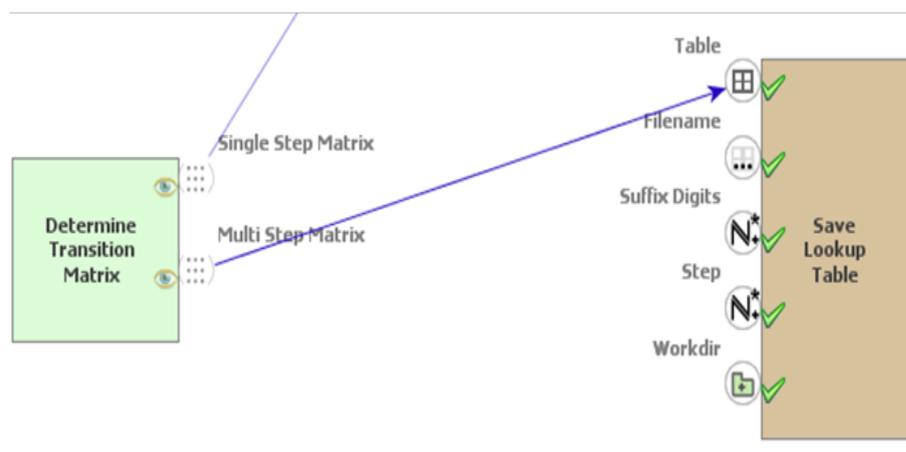


Figura 4.17: Conexión interna entre el *Determine Transition Matrix* y *Save Lookup Table*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Segundo paso:** Creación del *Cubo Raster* (ver *Figura 4.18*).

El *Cubo Raster* reúne las coberturas con atributos que no cambiaran a lo largo de las iteraciones dentro del modelo, como son: áreas pobladas, combustibilidad, humedad relativa, orientación y pendiente del terreno, precipitación, ríos y temperatura.

En este caso se tienen dos *Cubo Raster* ya que las variables meteorológicas se han dividido para el tercer semestre (julio, agosto y septiembre) y cuarto semestre (octubre, noviembre y diciembre) de cada año.

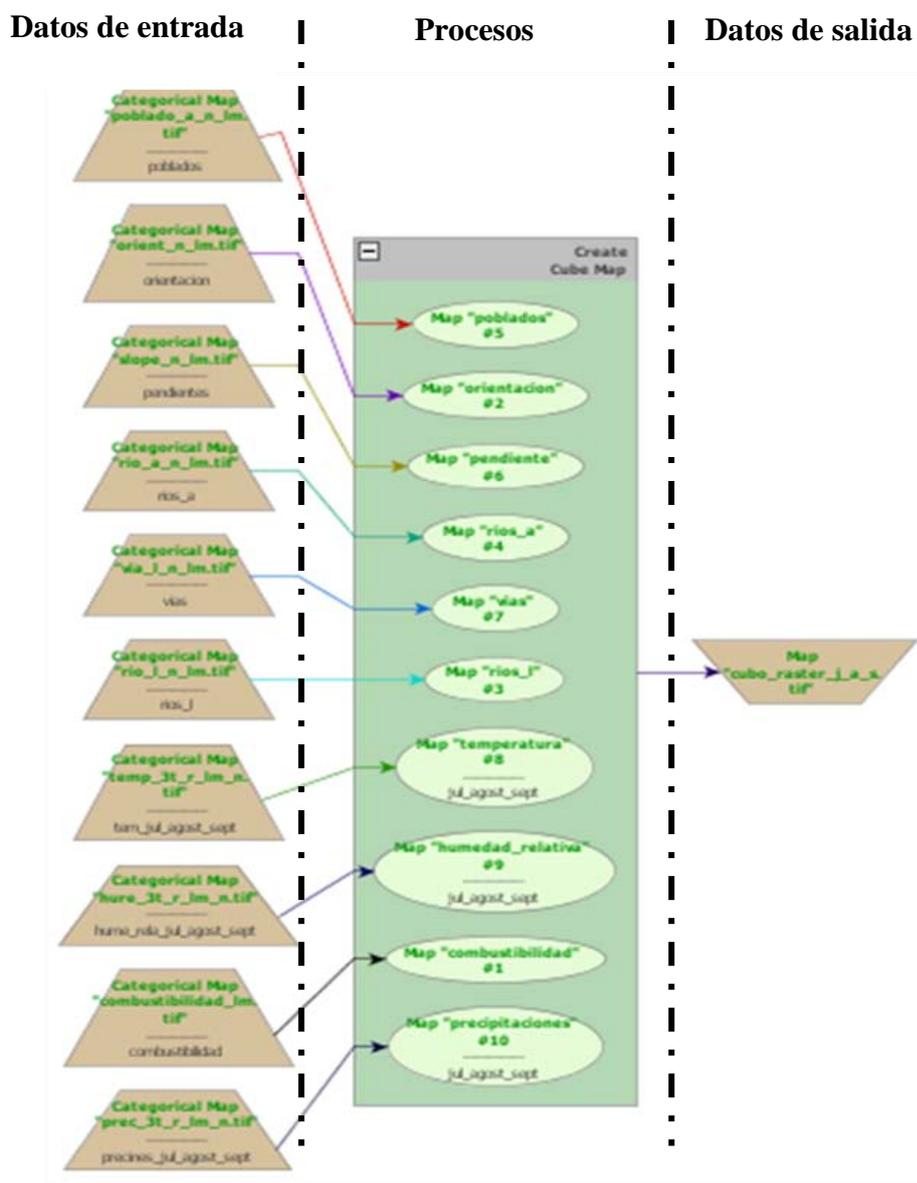


Figura 4.18: Estructura del *Cubo Raster*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de entrada:**

Todos los *raster* de entrada mencionados anteriormente, están cargados en el *functor Load Categorical Map* (ver Figura 4.19).

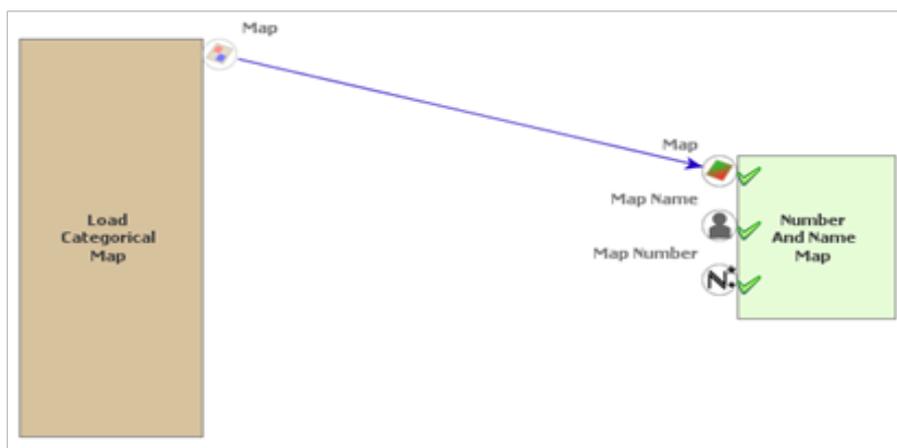


Figura 4.19: Conexión interna entre *Load Categorical Map* y *Create Cube Map (Number and Name Map)*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Procesos:**

Se utiliza el *functor Create Cube Map*, ubicado en *Map Algebra* dentro de la biblioteca, el cual tiene como función reunir los mapas o datos para crear el *Cubo Raster*, y para ello se precisa colocar dentro de este, un *functor Number and Name Map* por mapa o dato que se ingrese al *Cubo Raster*. Este *functor* se ubica en *Map Algebra Sub*, cumple con la función de dar un nombre y un número identificador a cada mapa dentro del *Cubo Raster* (ver Figura 4.20).

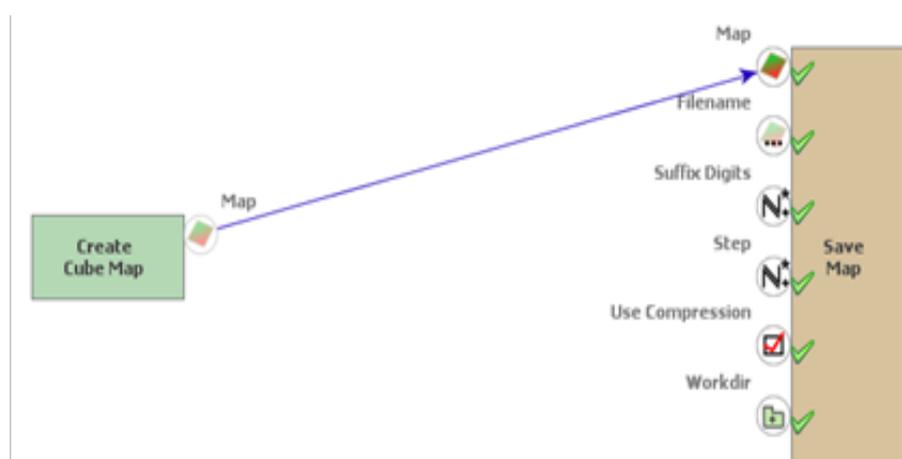


Figura 4.20: Conexión interna entre *Create Cube Map* y *Save Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de salida:**

Se guarda el *Cubo Raster* mediante un *functor Save Map*; se revisa la integridad del modelo y se lo corre.

- **Tercer paso:** Cálculo de rangos para categorizar variables continuas (ver Figura 4.21).

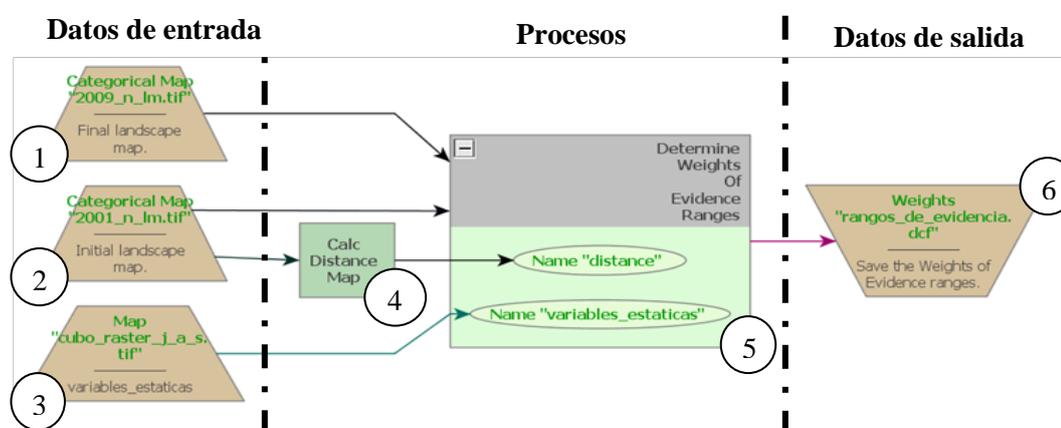


Figura 4.21: Estructura para la determinación de pesos de evidencia

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de entrada:**

1y2) *Functor Load Categorical Map*, en donde se almacenan los *raster* de los focos de incendios del 2001 y 2009, respectivamente.

3) *Functor Load Map*, carga el *Cubo Raster*.

- **Procesos:**

4) *Functor Calc Distance Map*, ubicado en *Map Algebra* dentro de la biblioteca, que se lo incluye en los modelos que tienen coberturas dinámicas representando las distancias a las áreas que probablemente cambien de estado,

calculando la distancia más cercana a la lista de clases que compone este mapa (ver Figura 4.22)

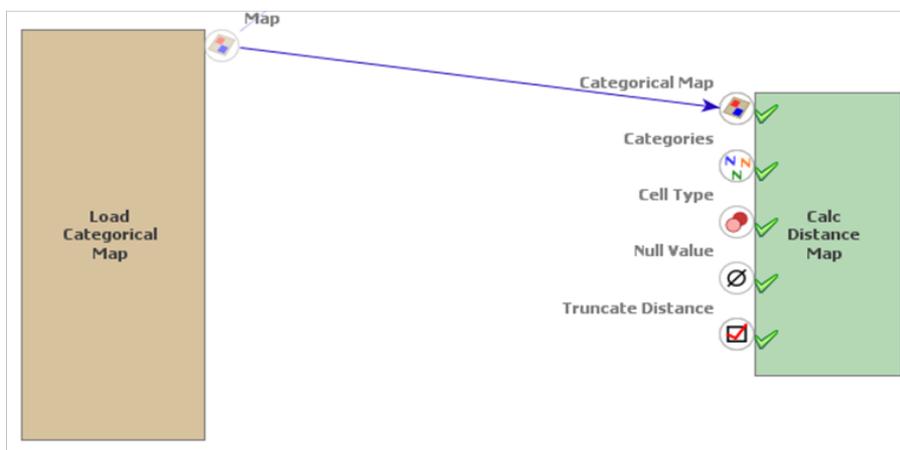


Figura 4.22: Conexión interna entre *Load Categorical Map* y *Calc Distance Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

5

Functor Determine Weights of Evidence Ranges, ubicado en *Calibration* dentro de la biblioteca, al cual se le agrega dos *functors Name Map*, en donde uno será identificado como *Distance* y tendrá conexión con el *functor Calc Distance Map* (ver Figura 4.23).

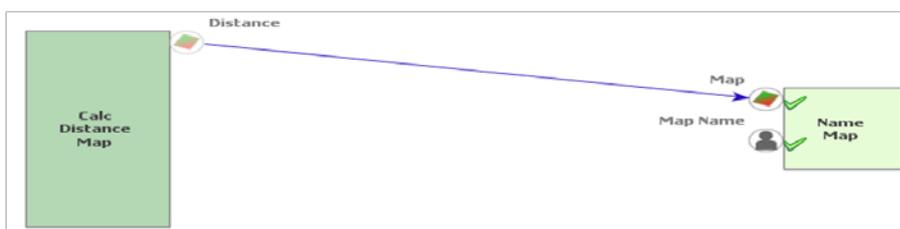


Figura 4.23: Conexión interna entre *Calc Distance Map* y *Name Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Del mismo modo, el otro *Name Map* recibirá el nombre de *var_static*, ya que su conexión será con el *Cubo Raster* (ver *Figura 4.24*).

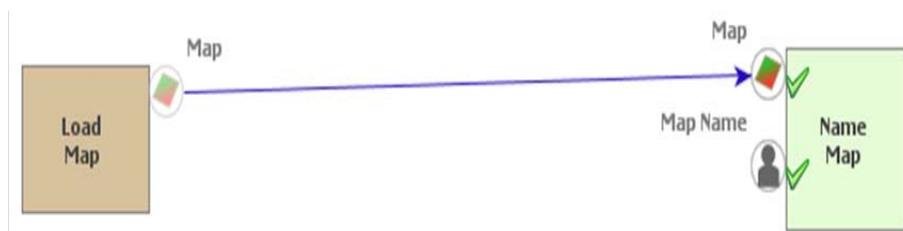


Figura 4.24: Conexión interna entre *Load Map* y *Name Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Los *raster* de los focos de incendio del 2001 y 2009 van conectados al *funcion* *Determine Weights of Evidence Ranges*, respectivamente (ver *Figura 4.25* y *Figura 4.26*).

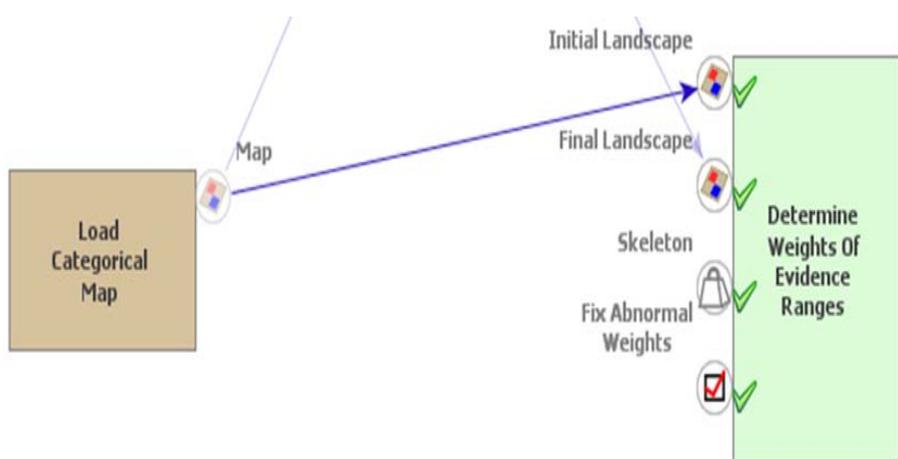


Figura 4.25: Conexión interna entre *Load Categorical Map* (focos de incendio 2001) y *Determine Weights of Evidence Ranges*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

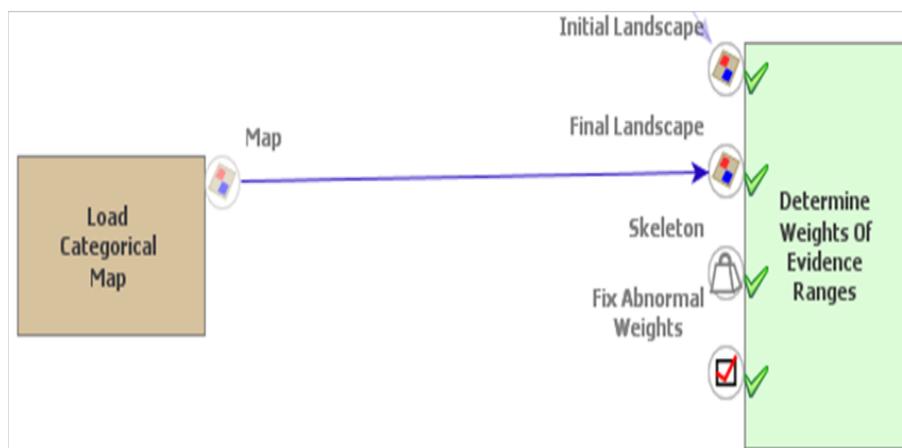


Figura 4.26: Conexión interna entre *Load Categorical Map* (focos de incendio 2009) y *Determine Weights of Evidence Ranges*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Dentro del *functor Weights of Evidence Ranges* se ingresan las transiciones generadas en el primer paso, luego en cada una de las transiciones se ingresan las variables del *Cubo Raster*, en donde a las variables no categóricas, es decir, aquellas variables que contienen datos continuos se les definirán cuatro parámetros requeridos por el programa como son valor mínimo y máximo; el incremento que es la unidad mínima del mapa con las que se generaran los *buffers*; el ángulo de tolerancia, el cual mide el ángulo de desviación de una línea recta (ver *Figura 4.27*).

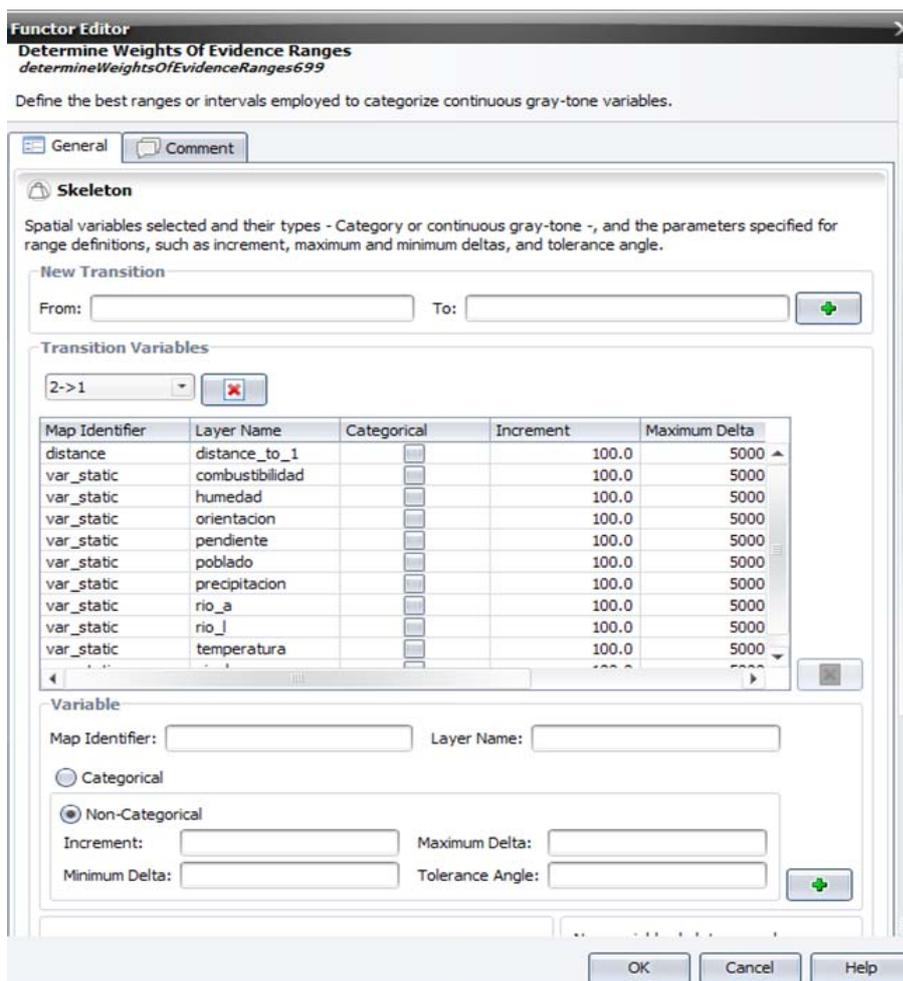


Figura 57: Categorización de las variables dentro del functor *Determine Weights of Evidence Ranges*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de salida:**

- 6 *Functor Save Weights*, guarda los cálculos de rangos de los pesos evidencia (ver Figura 4.28).



Figura 4.28: Conexión interna entre *Determine Weights of Evidence Ranges* y *Save Weights*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Cuarto paso:** Cálculo de los coeficientes de los pesos de evidencia (ver Figura 4.29).

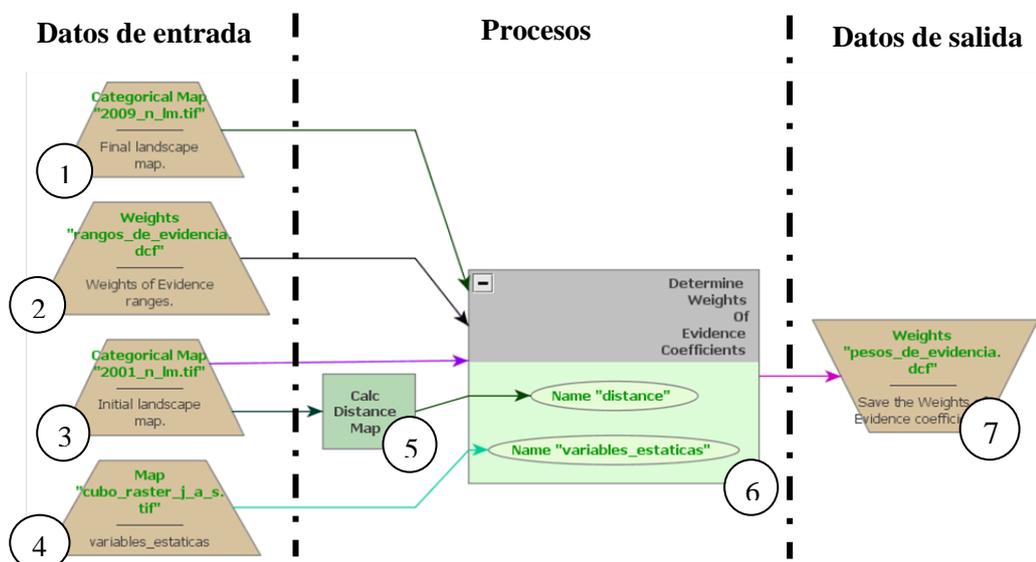


Figura 4.29: Estructura del cálculo de coeficientes de los pesos de evidencia

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de entrada:**

1y3 *Functor Load Categorical Map*, almacena los *raster* de los focos de incendio del 2001 y 2009, respectivamente.

2 *Functor Load Weights*, carga el resultado del paso anterior, es decir, los rangos de los pesos de evidencia.

4 *Functor Load Map*, en donde se carga el *Cubo Raster*.

- **Procesos:**

5 *Functor Calc Distance Map*, la conexión y su función es la misma explicada en el paso tres.

6 *Functor Determine Weights of Evidence Coefficients*, ubicado en *Calibration* dentro de la biblioteca; tiene como función calcular los coeficientes de los pesos de evidencia, y para ello se agrega dos *functors* llamados *Name Map*, en donde uno será identificado como *Distance* y tendrá conexión con el *functor Calc Distance Map* (ver Figura 4.30).

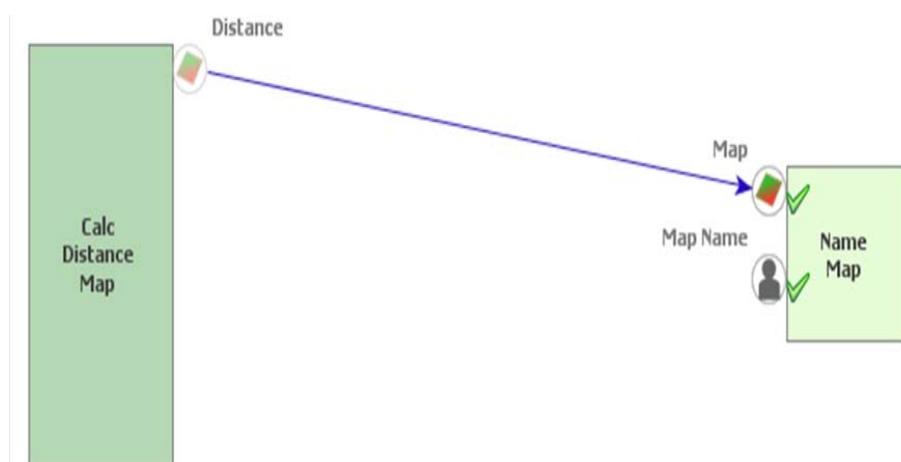


Figura 4.30: Conexión interna entre *Calc Distance Map* y *Name Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Del mismo modo el otro *Name Map* recibirá el nombre de variables estáticas, ya que su conexión será con el *Cubo Raster* (ver Figura 4.31).

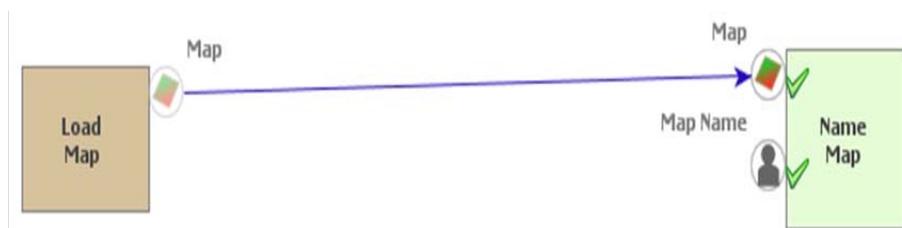


Figura 4.31: Conexión interna entre *Load Map* y *Name Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Los *raster* de los focos de incendio del 2001 y 2009 van conectados al *funcion* *Determine Weights of Evidence Coefficients*, respectivamente (ver Figura 4.32 y Figura 4.33).

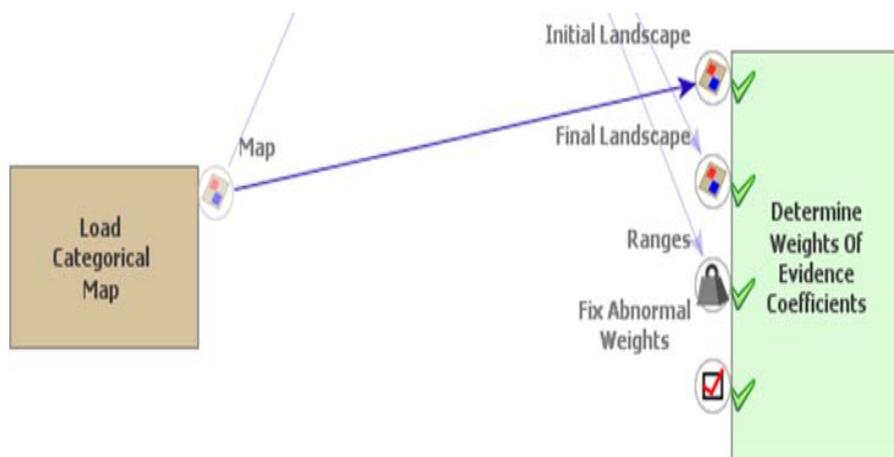


Figura 4.32: Conexión interna entre *Load Categorical Map* (focos de incendio 2009) y *Determine Weights of Evidence Coefficients*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

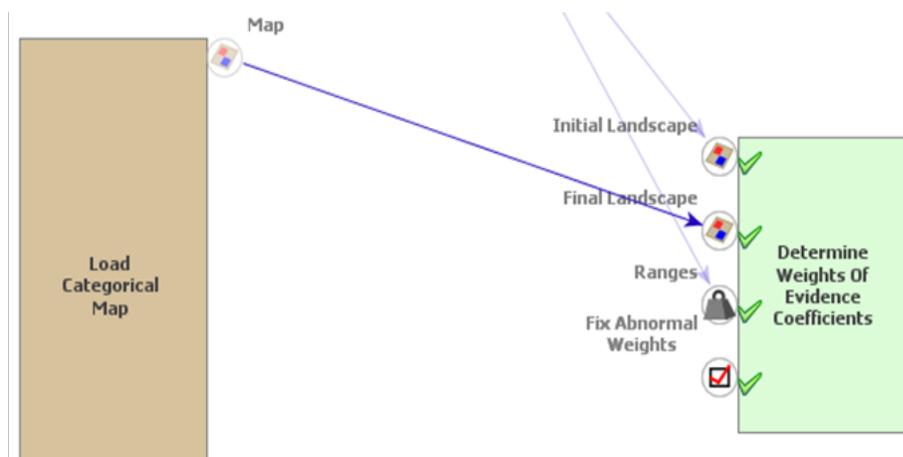


Figura 4.33: Conexión interna entre *Load Categorical Map* (focos de incendio 2009) y *Determine Weights of Evidence Coefficients*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Y finalmente, el *functor Load Weights*, donde se encuentran los rangos de los pesos de evidencia, será conectado de forma directa al *functor Determine Weights of Evidence Coefficient* (ver Figura 3.34).

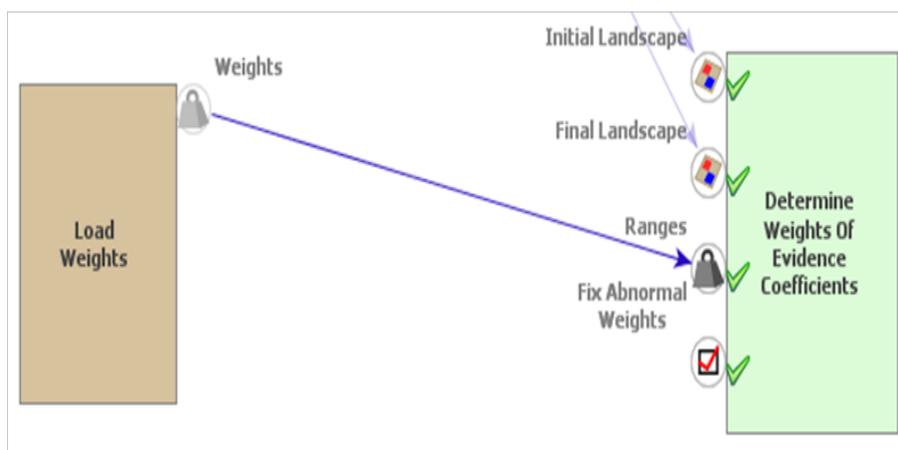


Figura 4.34: Conexión interna entre *Load Weights* y *Determine Weights of Evidence Coefficients*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de salida:**

- 6 *Functor Save Weights*, guarda los coeficientes de los pesos de evidencia (ver Figura 4.35).



Figura 4.35: Conexión interna entre *Determine Weights of Evidence Coefficients* y *Save Weights*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Quinto paso:** Análisis de correlación de mapas (ver Figura 4.36).

Se realizan pruebas pareadas con la finalidad de conocer si las variables utilizadas en el modelo presentan independencia entre sí. Además, de dar una mayor validez a las conclusiones obtenidas al momento de agregar o eliminar variables.

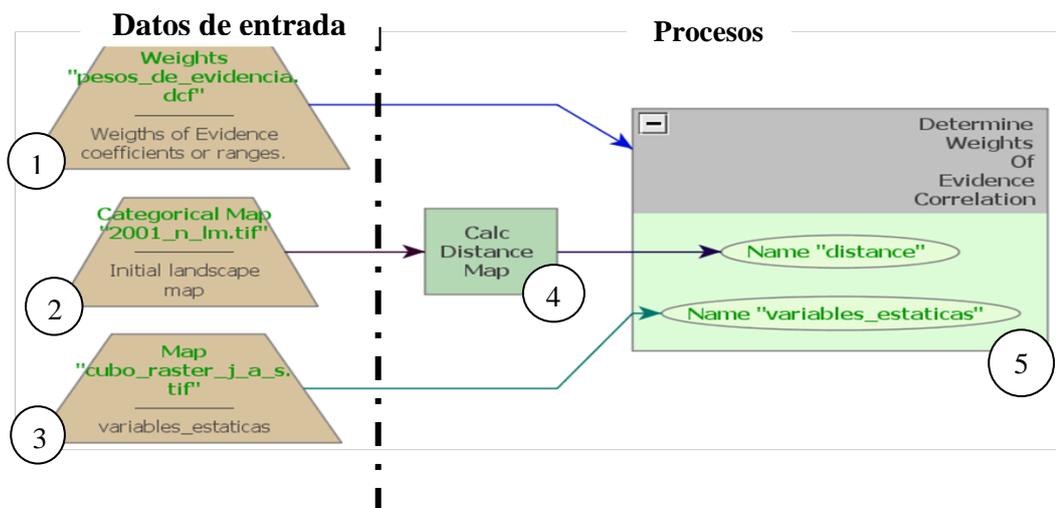


Figura 4.36: Estructura del cálculo de coeficientes de correlación

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de entrada:**

- 1 *Functor Load Weights*, carga el resultado del paso anterior, es decir, los coeficientes de los pesos de evidencia.
- 2 *Functor Load Categorical Map*, almacena el *raster* de los focos de incendio del 2001.
- 3 *Functor Load Map*, que carga el *Cubo Raster*.

- **Procesos:**

- 4 *Functor Calc Distance Map*, la conexión y su función es la misma explicada en los pasos anteriores.
- 5 *Functor Determine Weights of Evidence Correlation*, ubicado en *Calibration* dentro de la biblioteca, tiene como función determinar la correlación entre las variables categóricas, generando valores en tablas que muestran las posibles

combinaciones entre las variables, tomando en cuenta todas las transiciones y teniendo como referencia diferentes pruebas estadísticas. Con esto se busca eliminar variables que tengan una alta correlación, conservando únicamente las variables que presentan independencia (ver *Figura 4.37*).

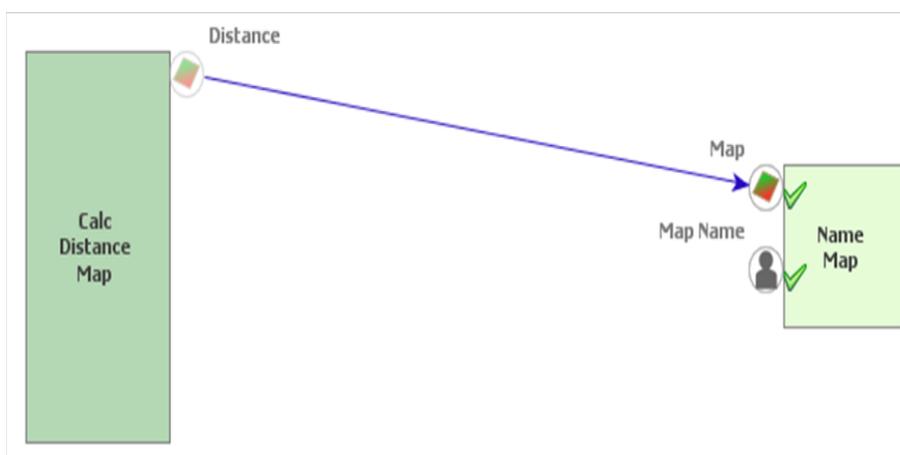


Figura 4.37: Conexión interna entre *Calc Distance Map* y *Name Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Del mismo modo el otro *Name Map* recibirá el nombre de variables estáticas, ya que su conexión será con el *Cubo Raster* (ver *Figura 4.38*).



Figura 4.38: Conexión interna entre *Load Map* y *Name Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Los *raster* de los focos de incendios del 2001 y 2009 van conectados al *functor Determine Weights of Evidence Coefficients* (ver Figura 4.39 y Figura 4.40).

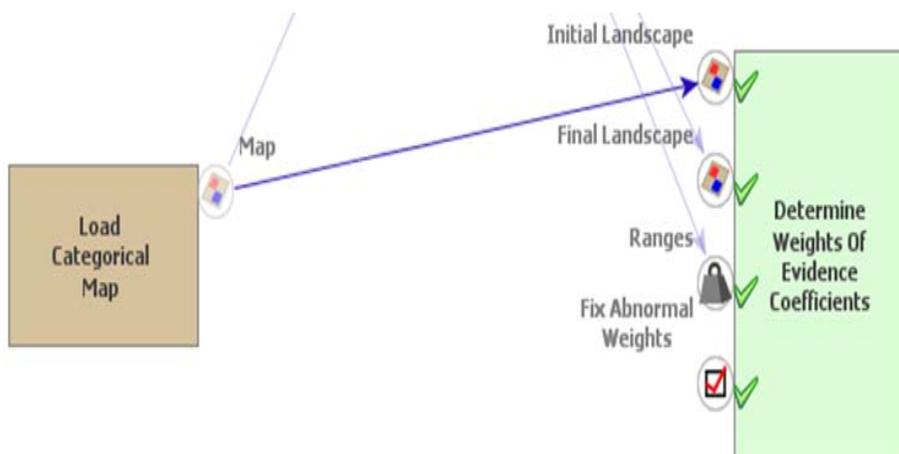


Figura 4.39: Conexión interna entre *Load Categorical Map* (focos de incendio 2001) y *Determine Weights of Evidence Coefficients*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

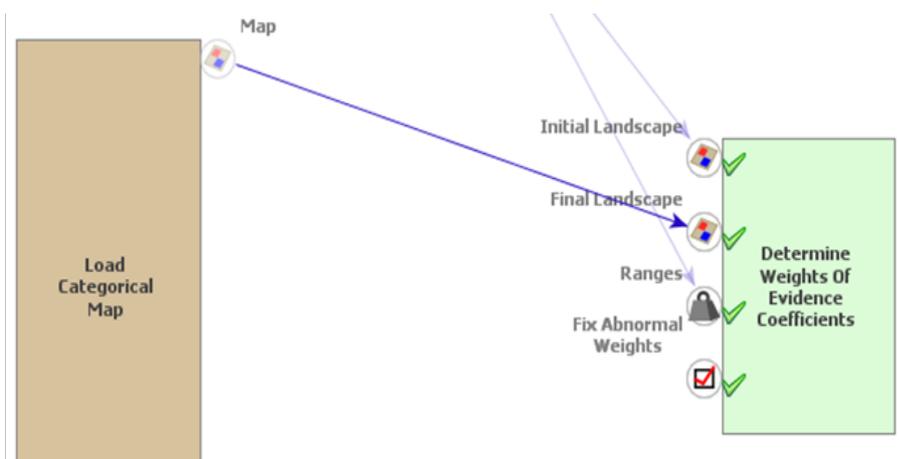


Figura 4.40: Conexión interna entre *Load Categorical Map* (focos de incendio 2009) y *Determine Weights of Evidence Coefficients*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Functor Load Weights, donde se encuentran los rangos de los pesos de evidencia, será conectado de forma directa al *functor Determine Weights of Evidence Coefficients* (ver Figura 4.41).

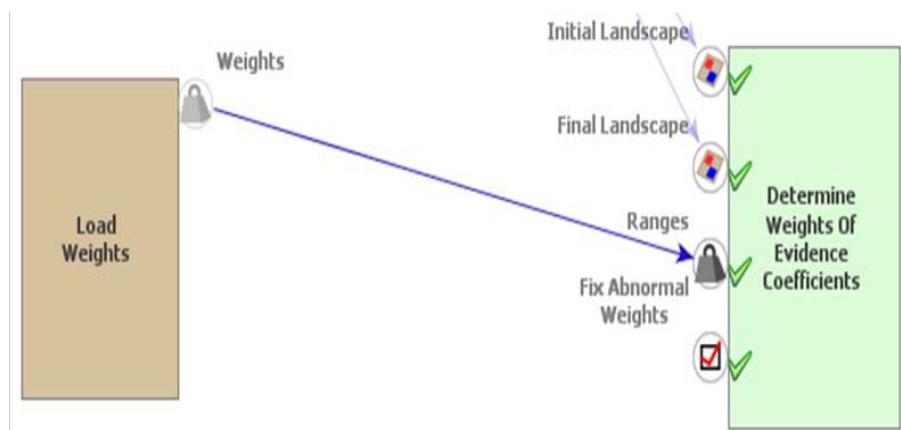


Figura 4.41: Conexión interna entre *Load Weights* y *Determine Weights of Evidence Coefficients*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de salida:**

Functor Save Weights, guarda los coeficientes de los pesos de evidencia (ver Figura 4.42).

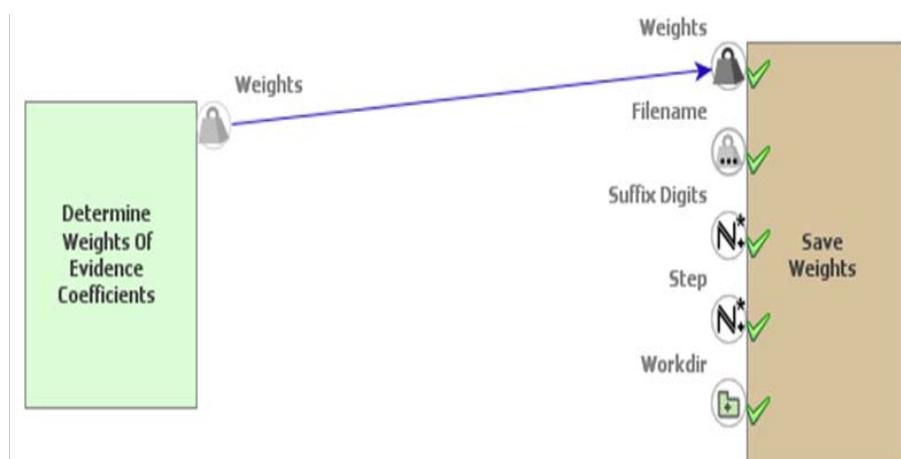


Figura 4.42: Conexión interna entre *Determine Weights of Evidence Coefficients* y *Save Weights*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

b. Desarrollo de la segunda etapa

- **Primer paso:** Construcción y ejecución del modelo de simulación (ver *Figura 4.43*).

En esta etapa del modelamiento de datos el programa generara por cada iteración dos mapas como resultados, los cuales serán uno de probabilidad y el otro será un mapa de simulación.

- **Datos de entrada:**

- 1 *Functor Load Map*, almacena el *Cubo Raster*.
- 2 *Functor Load Weights*, carga el resultado del paso anterior, es decir, los coeficientes de los pesos de evidencia.
- 3 *Functor Load Categorical Map*, en el se carga el *raster* de los focos de incendio del 2001.
- 4 *Functor Load Lookup Table*, carga la matriz de transición *Multiple Step*.

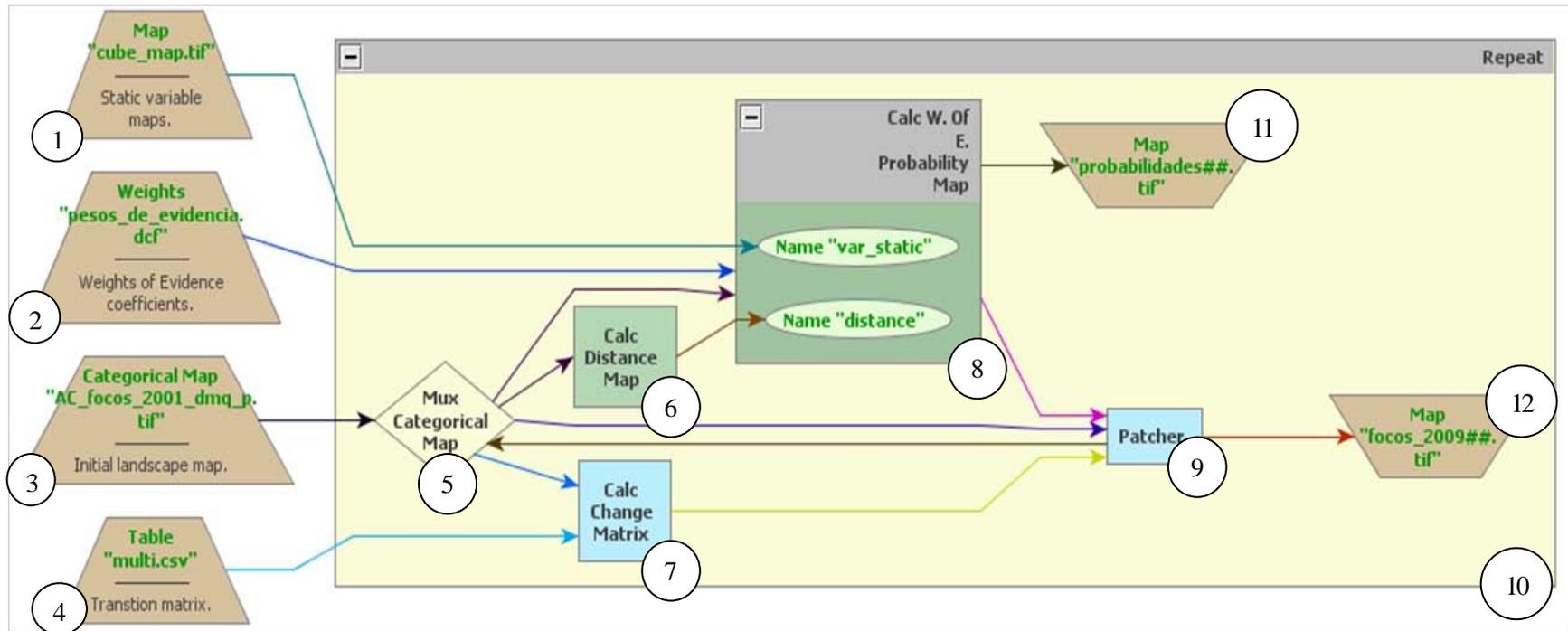


Figura 4.43: Estructura del modelo de simulación

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Procesos:**

- 5 *Functor Mux Categorical Map*, ubicado en la categoría *Control* dentro de la biblioteca, tiene como finalidad actualizar de manera dinámica retroalimentando al modelo y de esta forma generar los mapas de probabilidad y de simulación (ver *Figura 4.44*).

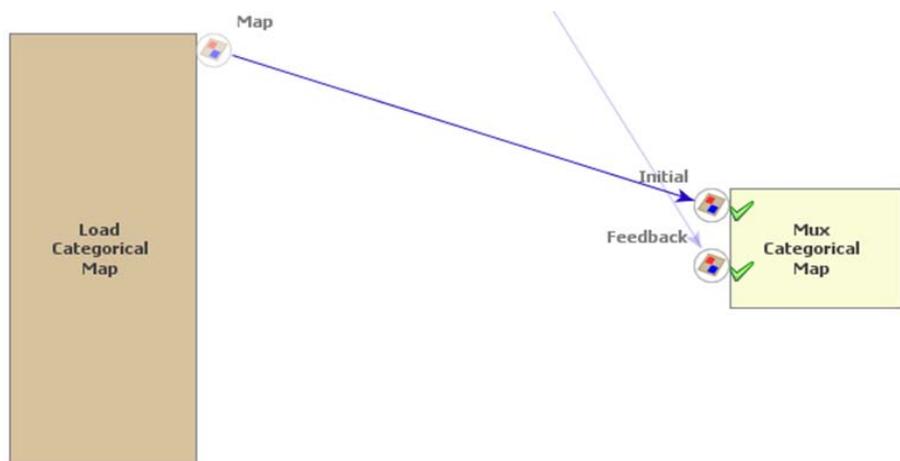


Figura 4.44: Conexión interna entre *Load Categorical Map* y *Mux Categorical Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Teniendo en cuenta las iteraciones programadas y los cálculos de transición, en la segunda iteración tomará al mapa de probabilidad de salida formado en la primera iteración, como mapa de entrada, a fin de partir desde este mapa hacia la siguiente iteración, el proceso se hará de forma sucesiva hasta cumplir con todas las iteraciones requeridas (ver *Figura 4.45*).

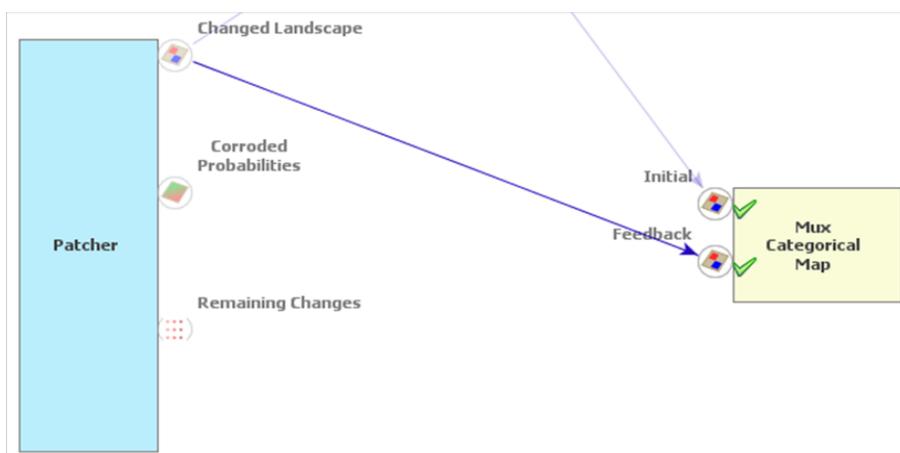


Figura 4.45: Conexión interna entre *Patcher* y *Mux Categorical Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 6) *Functor Calc Distance Map*, su función es la misma explicada en los pasos anteriores, su única diferencia es su conexión (ver Figura 4.46).

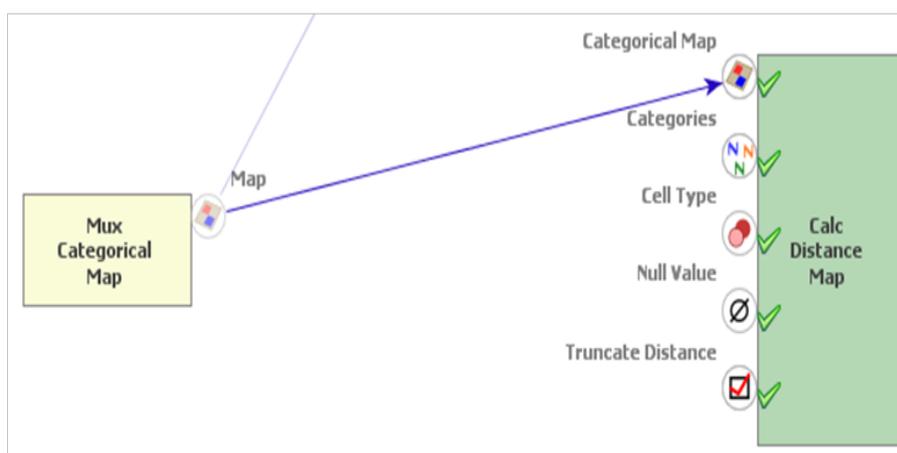


Figura 4.46: Conexión interna entre *Mux Categorical Map* y *Calc Distance Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 7) *Functor Cal Change Matrix*, ubicado en la categoría *Simulation* dentro de la biblioteca, recibe los datos de la matriz de transición de *Multi Step* que posee

las tasas anuales para cada iteración y también recibe los datos del *functor Mux Categorical Map*; en este *functor* se realiza una multiplicación entre las tasa de transición y el número de celdas disponibles, para un cambio específico y los resultados se envían al *Patcher* (ver *Figura 4.47* y *Figura 4.48*).

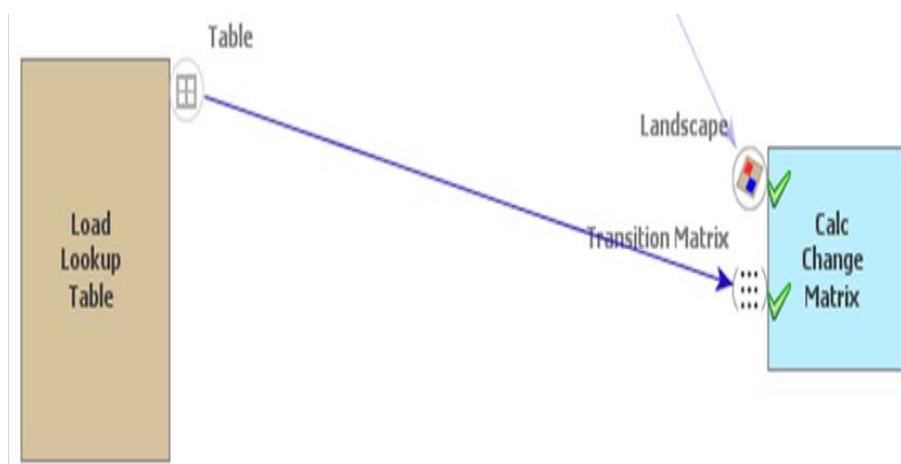


Figura 4.47: Conexión interna entre *Load Lookup Table* y *Calc Change Matrix*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

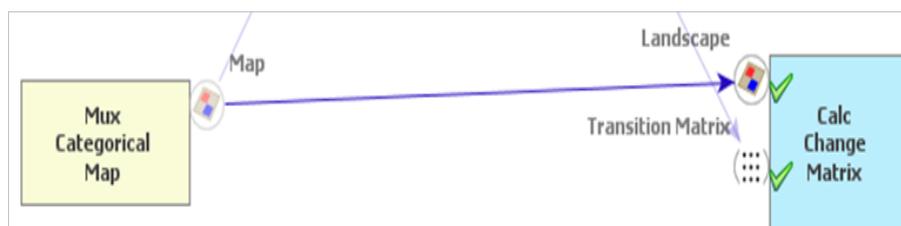


Figura 4.48: Conexión interna entre *Mux Categorical Map* y *Calc Change Matrix*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

8

Functor Calc W. of E. Probability Map, ubicado en la categoría *Map Algebra* dentro de la biblioteca, tiene la función de generar mapas de probabilidades para cada una de las iteraciones. Dentro de este *functor* se agregan dos

functors llamados *Name Map*, el uno tendrá el identificador de *var_static* e ira conectado con el *Cubo Map* (ver Figura 4.49).



Figura 4.49: Conexión interna entre *Load Map* y *Name Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

El otro *Name Map* tendrá el identificador de *Distance* e irá conectado con el *Calc Distance Map* (ver Figura 4.50).



Figura 4.50: Conexión interna entre *Calc Distance Map* y *Name Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Directamente, el *functor Calc W. of E. Probability Map* tendrá conexiones con los *functors Load Weights* y *Mux Categorical Map* (ver Figura 4.51 y Figura 4.52).



Figura 4.51: Conexión interna entre *Load Weights* y *Calc W. of E. Probability Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

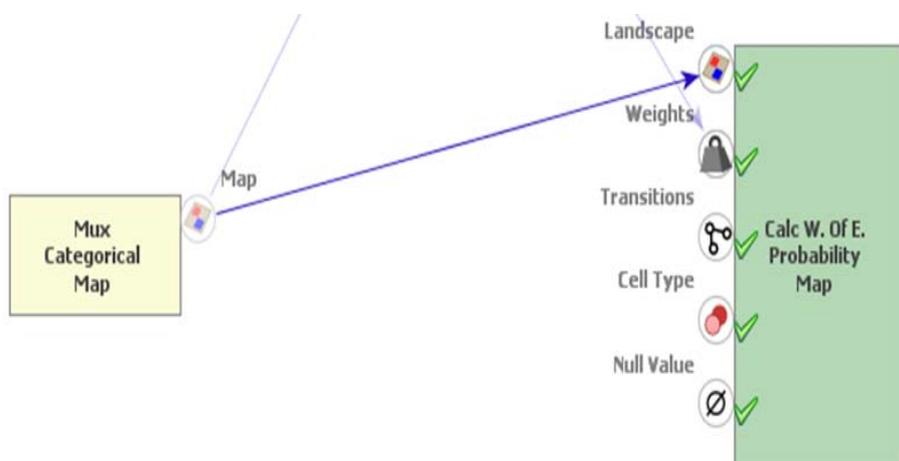


Figura 4.52: Conexión interna entre *Mux Categorical Map* y *Calc W. of E. Probability Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

9

Functor Patcher, ubicado en la categoría *Simulation* dentro de la biblioteca, tiene la función de generar y reproducir patrones espaciales de cambio, formando nuevos parches de una determinada clase o categoría mediante un

mecanismo llamado siembra, el cual trata de buscar celdas alrededor de una ubicación elegida para ejecutar un cambio a la misma clase (ver Figura 4.53).

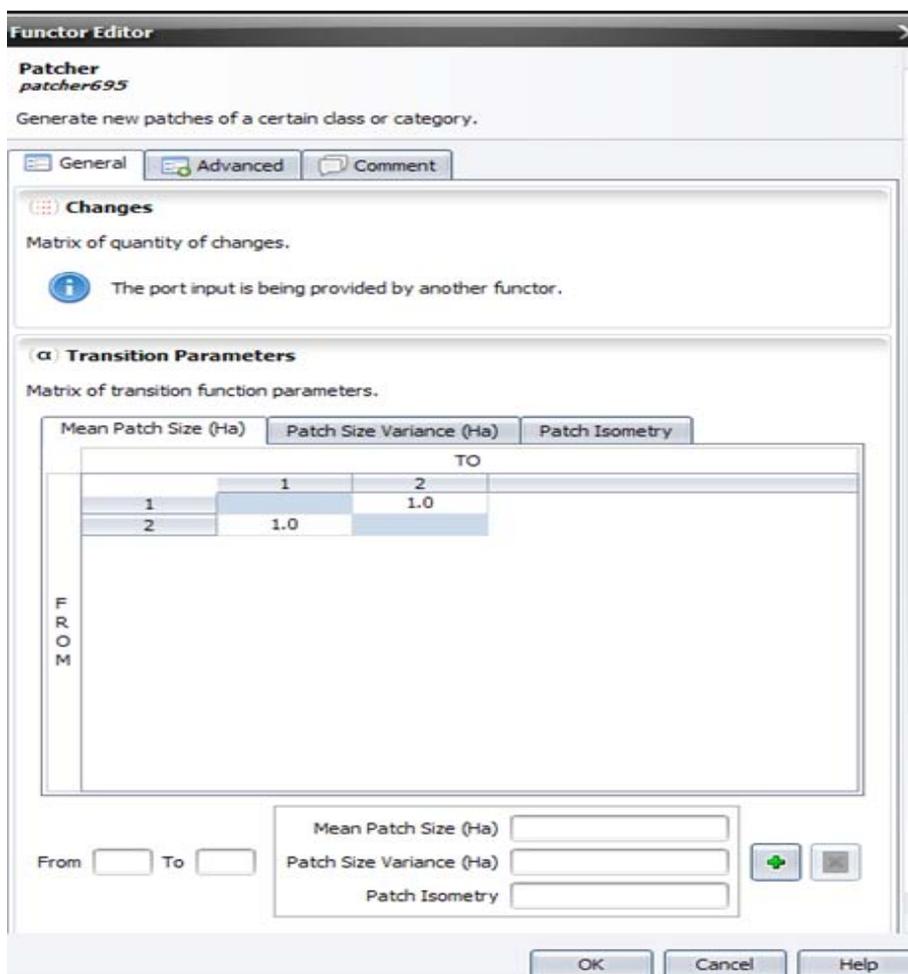


Figura 4.53: Valor de los parámetros en la función *Patcher*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Para ello, el *Patcher* posee algunos parámetros a determinar como son: *Mean Patch* (media), *Patch Size Variance* (varianza) y *Path Isometry* (isomería), que en este caso llevan el valor de uno, ya que no se quiere la formación de nuevos parches y así los mapas de simulación y probabilidad no sufran ninguna alteración (ver Figura 4.54, Figura 4.55 y Figura 4.56).

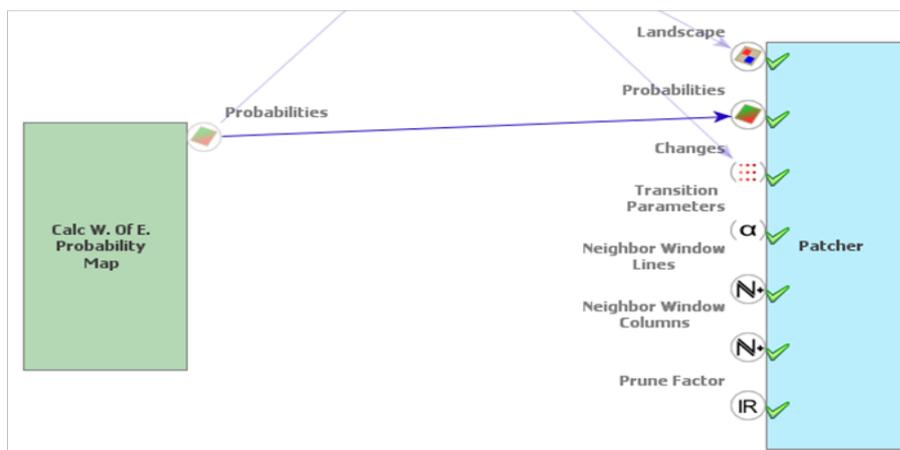


Figura 4.54: Conexión interna entre *Calc W. of E. Probability Map* y *Patcher*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)



Figura 4.55: Conexión interna entre *Mux Categorical Map* y *Patcher*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)



Figura 4.56: Conexión interna entre *Calc Change Matrix* y *Patcher*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

10

Functor Repeat, ubicado en la categoría *Control* dentro de la biblioteca. Está encargado de iterar a todo grupo de *functors* enlazados o conectados que se encuentren dentro de este, las iteraciones programadas son ocho representando el número de años en las que se van a analizar los focos de incendios (ver Figura 4.57).

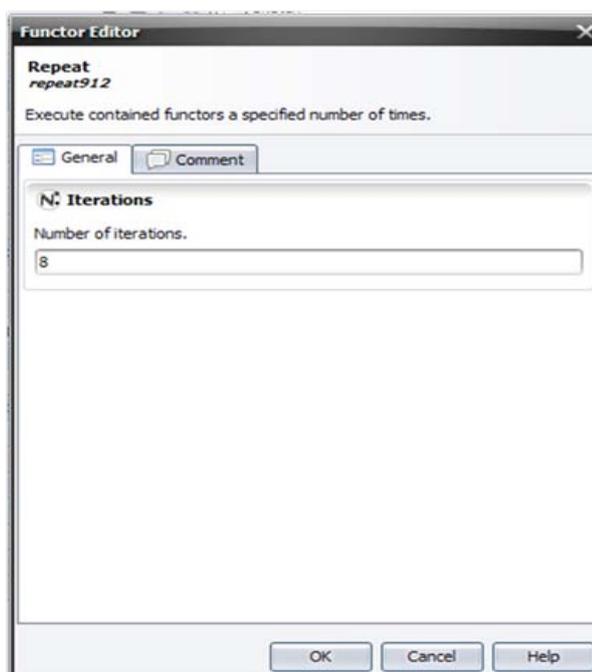


Figura 4.57: Número de iteraciones programadas dentro del *functor Repeat*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de entrada:**

11y12 *Functor Save Map*, almacena los mapas de probabilidad y de simulación generados en cada iteración (ver *Figura 4.58* y *Figura 4.59*).

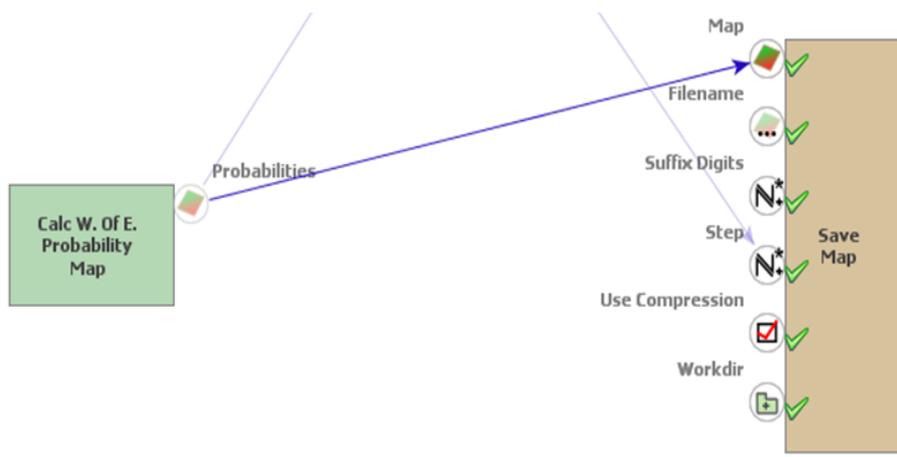


Figura 4.58: Conexión interna entre *Calc W. of E. Probability Map* y *Save Map* (mapas de probabilidades)

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

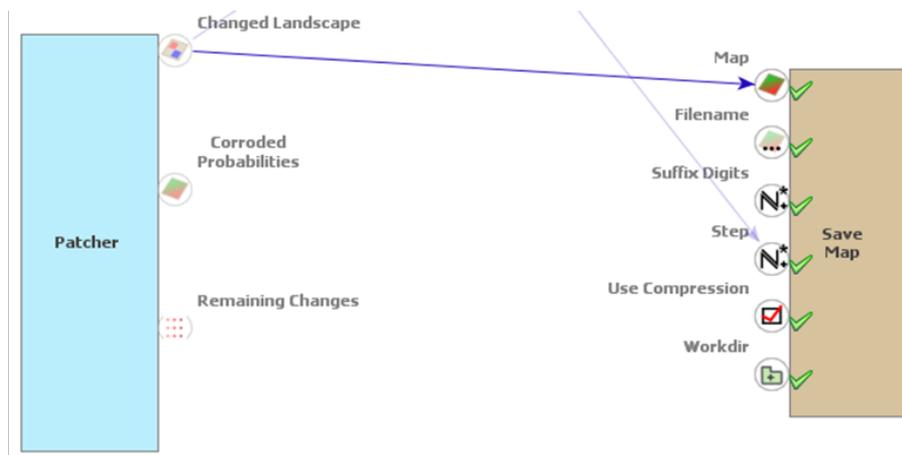


Figura 4.59: Conexión interna entre *Patcher* y *Save Map* (mapas de simulación)

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Los resultados son un conjunto de matrices generadas, mostrando las transiciones esperadas para el cambio y las transiciones restantes (ver *Figura 4.60*).

Expected Transitions:			Remaining Transitions:		
From \ To	1	2	From \ To	1	2

1	XXXX	59414	1	XXXX	0
2	45091	XXXX	2	0	XXXX

Figura 4.60: Matrices obtenidas de la construcción y ejecución del modelo de simulación

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Segundo paso:** Ejecución de la simulación con formación de parches (ver *Figura 4.61*).

Los procesos a realizar de este segundo paso, son similares a los del primero de la validación del modelo, sin embargo la diferencia está en la manipulación de los parámetros del *functor Patcher*, con el objetivo de que los mapas de probabilidad de focos de incendio y el mapa de simulación de incendio para el 2009 se asemejen con los datos verdaderos. En este caso los parámetros del *functor Patcher* permanecen iguales, ya que después de un análisis minucioso se han determinado que son la mejor opción.

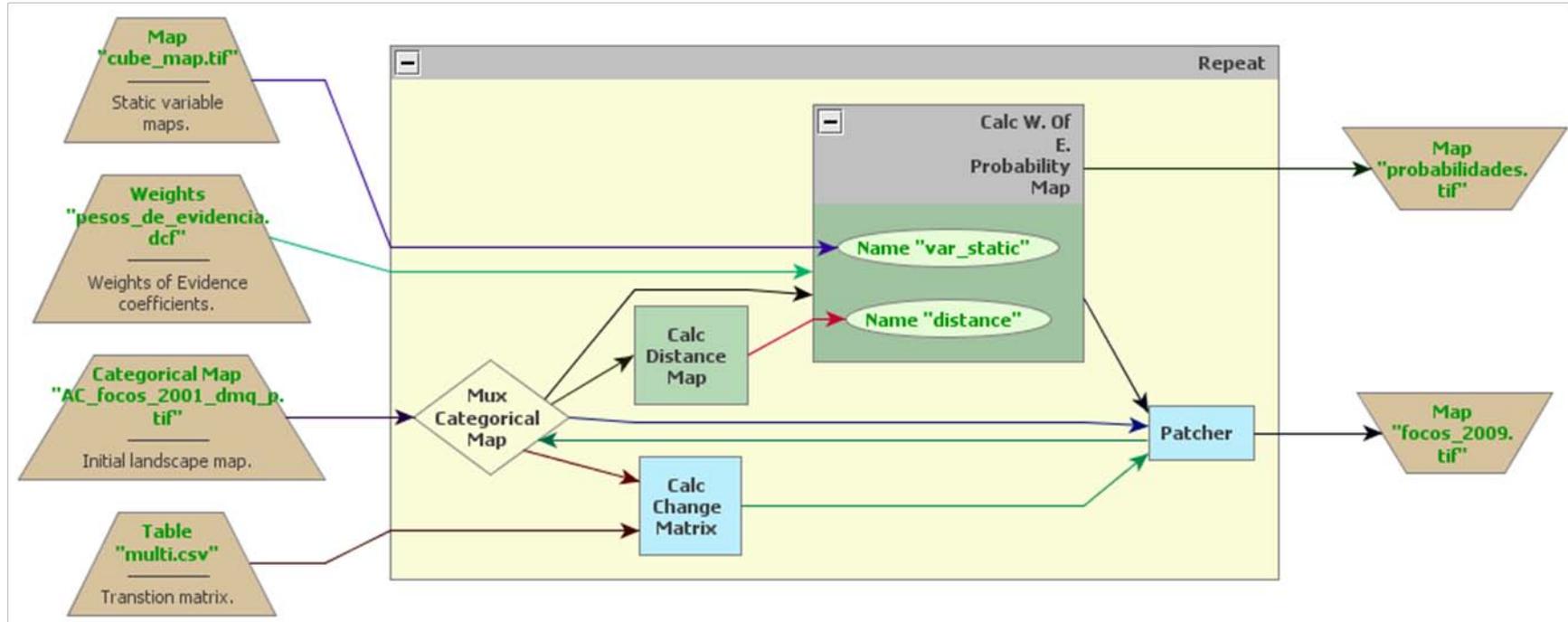


Figura 4.61: Estructura del modelo de simulación con formación de parches

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Tercer paso:** Validación de la simulación mediante una función exponencial de decaimiento (ver Figura 4.62).

El método aplicado en este paso, emplea una función exponencial de decaimiento, en la que se determina la similitud entre el mapa de focos de incendio del 2009 simulado en el paso dos de la validación y el mapa de focos de incendio del 2009, obteniendo como resultado un mapa de áreas de ajuste categorizado en: alto, mediano y bajo.

- **Datos de entrada:**

- 1 *Functor Load Categorical Map*, en él se carga el *raster* de los focos de incendio del 2009.
- 2 *Functor Load Categorical Map*, almacena el *raster* de los focos de incendio del 2001.
- 3 *Functor Load Categorical Map*, carga el *raster* de los focos de incendio del 2009 simulado en el segundo paso de la validación.

- **Procesos:**

- 4 *Functor Calculate Categorical Map*, ubicado en la categoría *Map Algebra* dentro de la biblioteca, recibe los mapas inicial y final de los focos de incendio con la finalidad de eliminar los patrones espaciales heredados del mapa inicial, este proceso es necesario antes de ser analizado por el siguiente *functor*. En él se colocan dos *functors* auxiliares *Number Map*, ubicados en la categoría *Map Algebra Sup*, los cuales darán un número identificador a los mapas de entrada, dentro de la expresión algebraica.

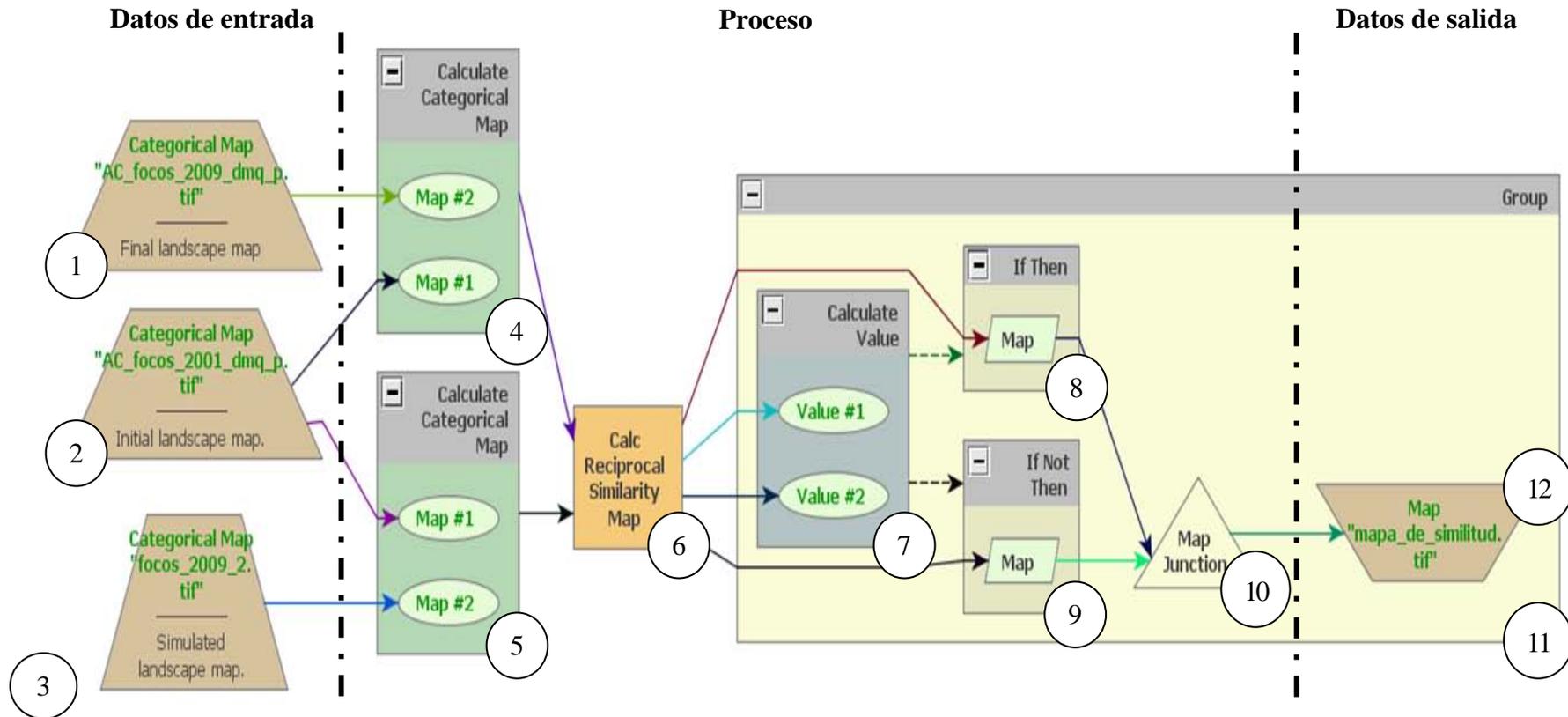


Figura 4.62: Estructura de la validación de la simulación mediante una función exponencial de decaimiento

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 5) *Functor Calculate Categorical Map*, la única diferencia con el anterior *functor*, es el remplazo del mapa de ingreso final por el mapa simulado, producto del segundo paso (ver Figura 4.63).

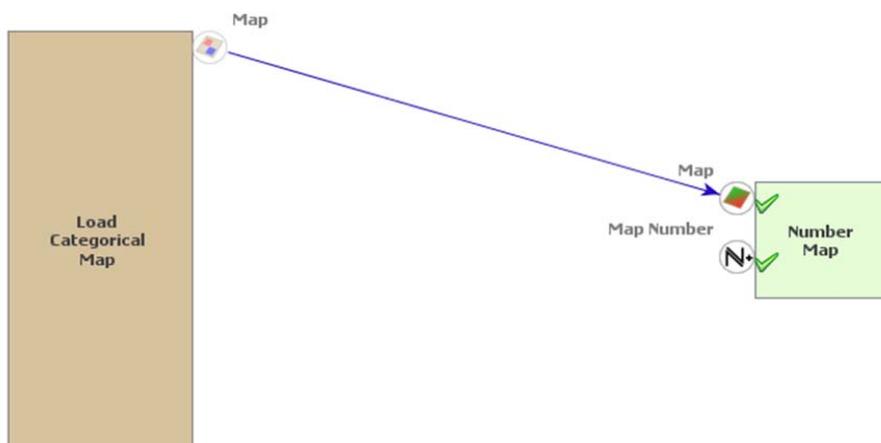


Figura 4.63: Conexión interna entre *Load Categorical Map* y *Number Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 6) *Functor Calculate Reciprocal Similarity Map*, ubicado en la categoría *Validation* dentro de la biblioteca, calcula una similitud en dos direcciones, del primer mapa al segundo y del segundo al primero (ver Figura 4.64 y Figura 4.65).

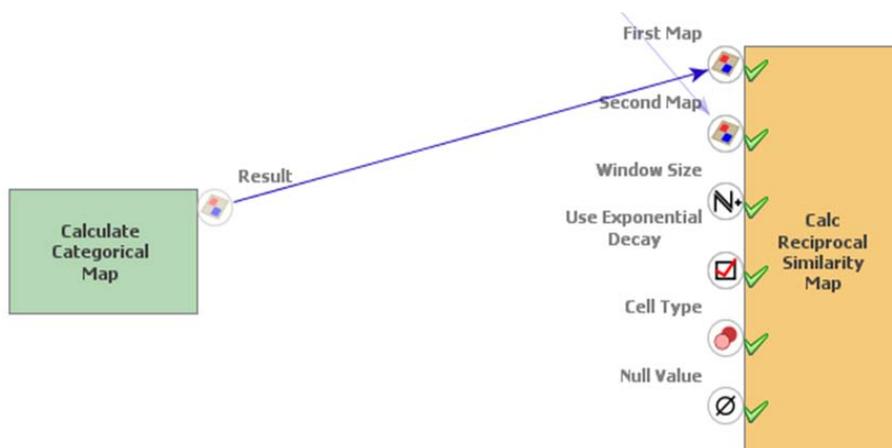


Figura 4.64: Conexión interna entre *Load Categorical Map (Calculate Map of Final Landscape Map)* y *Calculate Reciprocal Similarity Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

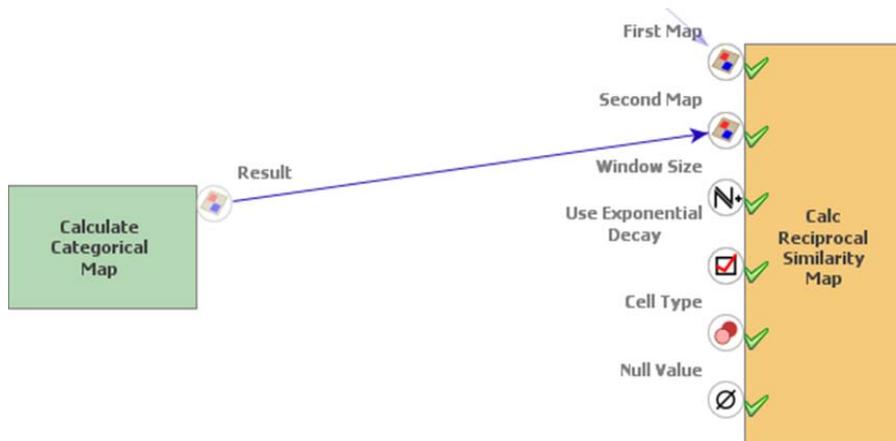


Figura 4.65: Conexión interna entre *Load Categorical Map (Calculate Map of Simulated Changes)* y *Calculate Reciprocal Similarity Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

7) *Functor Calculate Value*, ubicado en la categoría *Table* dentro de la biblioteca, calcula un valor mediante una expresión algebraica, generando tablas. Se colocan dos *functors* auxiliares llamados *Number Value*, ubicados en la categoría *Map Algebra Sup*, los cuales darán un número identificador a los valores evaluados (ver *Figura 4.66* y *Figura 4.67*).

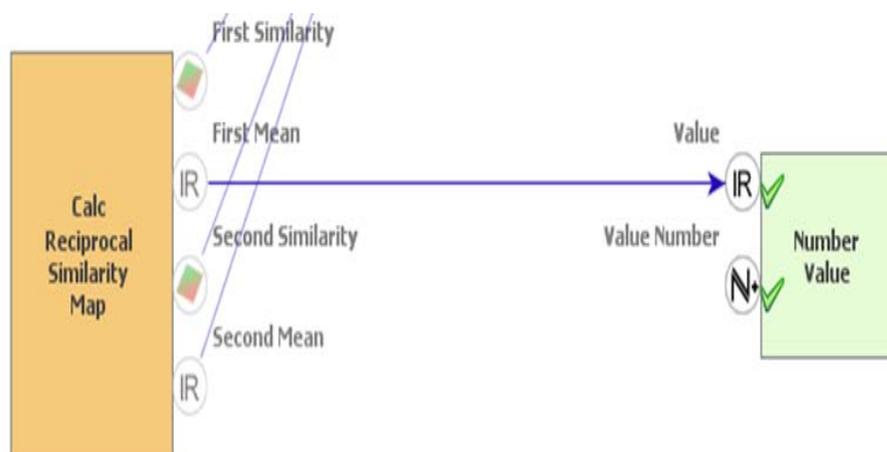


Figura 4.66: Conexión interna entre *Calculate Reciprocal Similarity Map* y *Number Value (value #1)*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

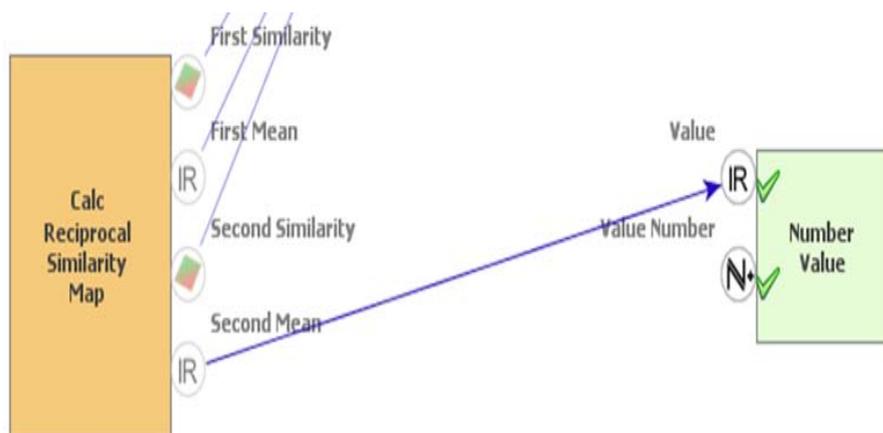


Figura 4.67: Conexión interna entre *Calculate Reciprocal Similarity Map* y *Number Value (value #2)*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

8y9 *Functors If Then* e *If Not Then* respectivamente, ubicados en la categoría *Control* dentro de la biblioteca, se ejecutan como condicionales. Dentro de estos *functors* se colocan auxiliares llamados *Map*, ubicados en la categoría *Map Algebra Sup*, siendo un enlace para otros *functors* (ver *Figura 4.68*, *Figura 4.69*, *Figura 4.70* y *Figura 4.71*).

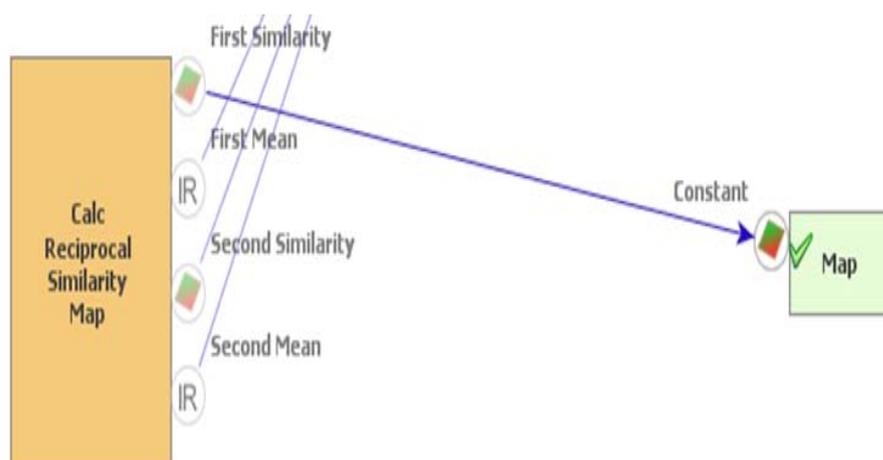


Figura 4.68: Conexión interna entre *Calculate Reciprocal Similarity Map* y *Map (If then)*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)



Figura 4.69: Conexión interna entre *Calculate Value* e *If then*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

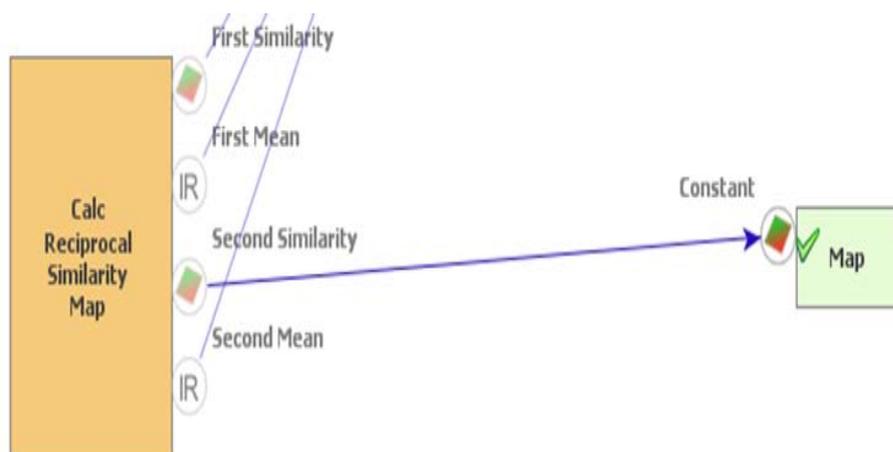


Figura 4.70: Conexión interna entre *Calculate Reciprocal Similarity Map* y *Map (If not then)*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)



Figura 4.71: Conexión interna entre *Calculate Value* e *If Not Then*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 10 *Functor Map Junction*, ubicados en la categoría *Control* dentro de la biblioteca, tiene la función de escoger uno de los dos mapas producido por los *functors If Then* e *If Not Then* (ver Figura 4.72 y Figura 4.73).

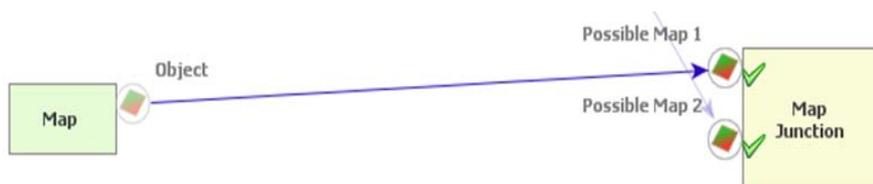


Figura 4.72: Conexión interna entre *Map (If Then)* y *Map Junction*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

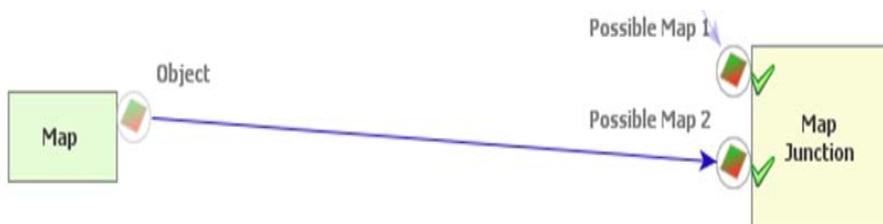


Figura 4.73: Conexión interna entre *Map (If Not Then)* y *Map Junction*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Procesos:**

- 11 *Functor Group*, ubicado en la categoría *Control* dentro de la biblioteca, tiene como función agrupar a un conjunto de *functors*.

- **Datos de salida:**

12

Functor Save Map, guarda los resultados de este proceso. Las áreas rojas y amarillas muestran un ajuste espacial de alta a moderada, mientras que los azules muestran un ajuste bajo.

- **Cuarto paso:** Validación de la simulación usando ventanas múltiples y una función de decaimiento constante (ver *Figura 4.74*).

El método aplicado en este paso, emplea una función exponencial de decaimiento en la que se determina la similitud entre el mapa de focos de incendio del 2009 simulado en el paso dos de la validación y el mapa de focos de incendios del 2009, obteniendo como resultado una tabla en la que se proyectan porcentajes de similitud entre los dos y de este modo conocer cuán ajustado está el modelo de predicción a la realidad.

- **Datos de entrada:**

Muchos de los *functors* presentados en este proceso ya han sido explicados anteriormente, es por ello que solo se expondrán las funciones y conexiones de los nuevos.

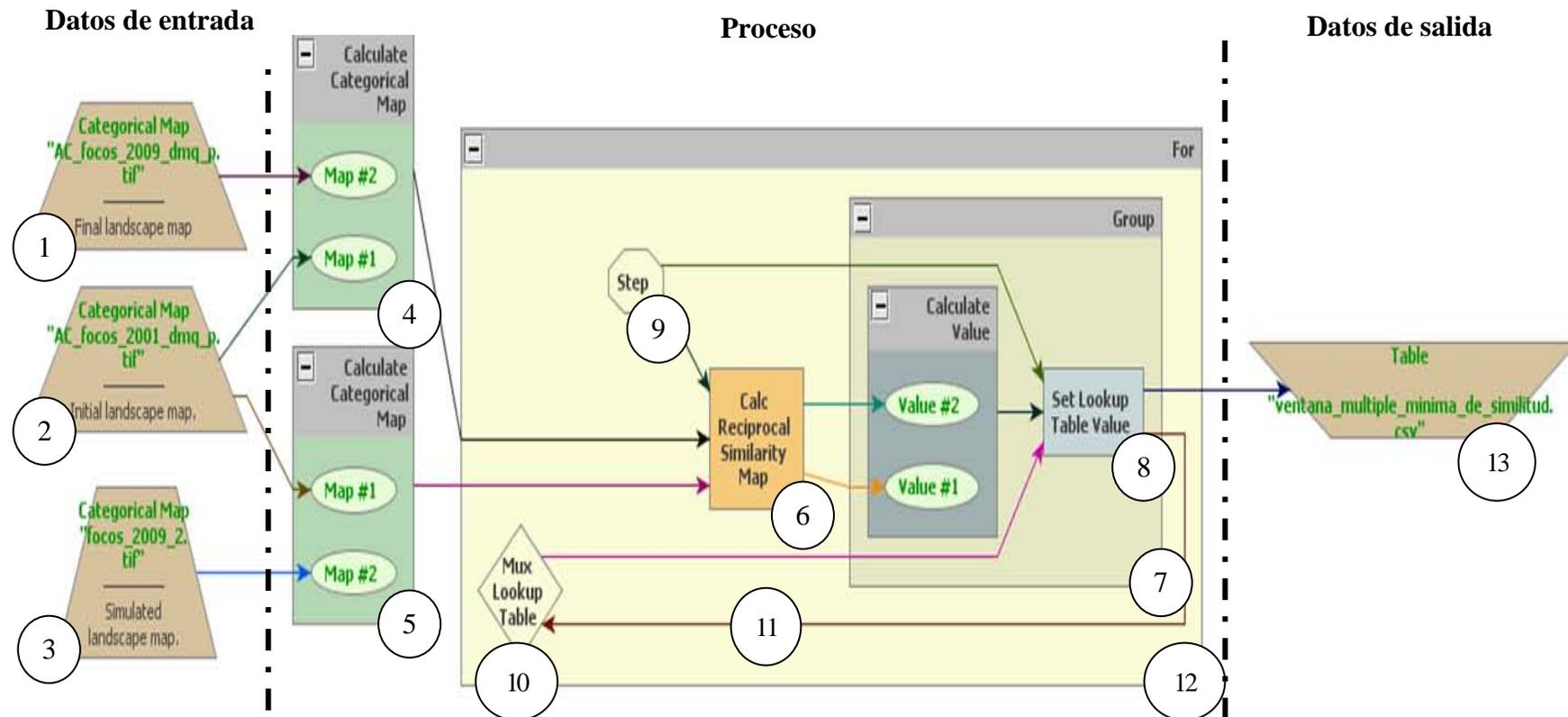


Figura 4.74: Estructura de la validación de la simulación usando ventanas múltiples y una función de decaimiento constante

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Procesos:**

- 8 *Functor Set Lookup Table Value*, ubicado en la categoría *Table* dentro de la biblioteca, busca y recopila la tabla de valores final (ver *Figura 4.75*, *Figura 4.76* y *Figura 4.77*).



Figura 4.75: Conexión interna entre *Step* y *Set Lookup Table Value*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

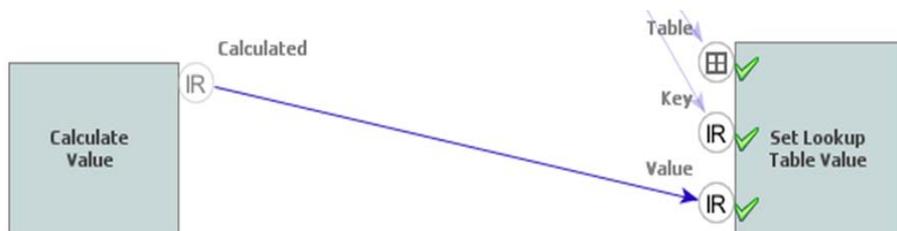


Figura 4.76: Conexión interna entre *Calculate Value* y *Set Lookup Table Value*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

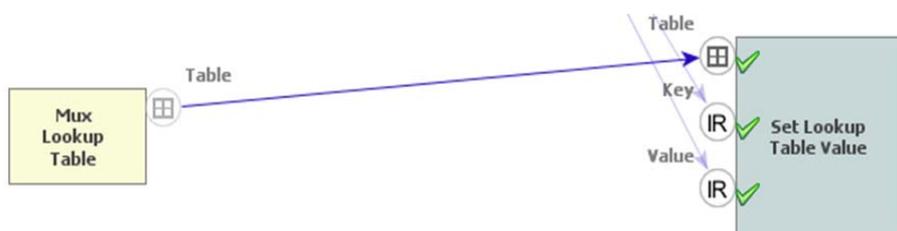


Figura 4.77: Conexión interna entre *Mux Lookup Table* y *Set Lookup Table Value*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 9) *Functor Step*, ubicado en la categoría *Control* de la biblioteca, transmite las iteraciones al modelo actual (ver Figura 4.78).

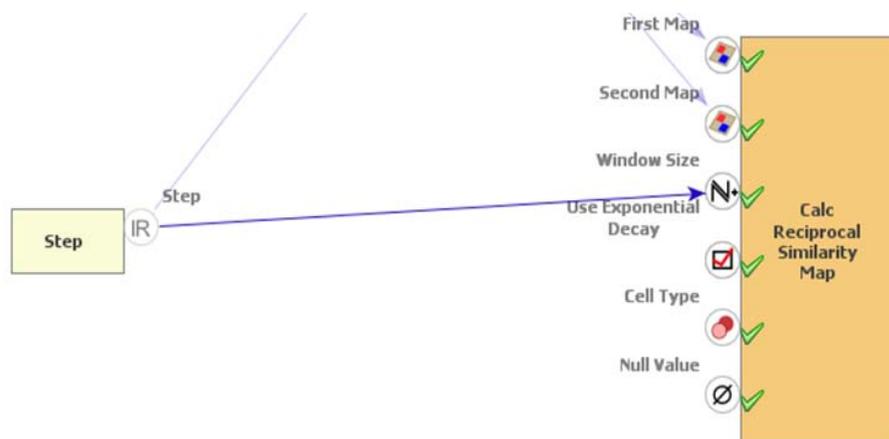


Figura 4.78: Conexión interna entre *Step* y *Calculate Reciprocal Similarity Map*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 10) *Functor Mux Lookup Table*, de la categoría *Control* en la biblioteca, tiene como función hacer una tabla dinámica, alimentando de acuerdo al número de iteraciones determinadas en el proceso a la tabla de salida en la primera iteración. Los valores tomados serán de los datos de entrada, pero a partir de la segunda iteración tomará los datos de salida como datos de entrada, partiendo desde ese punto para calcular los siguientes valores de salida (ver Figura 4.79).

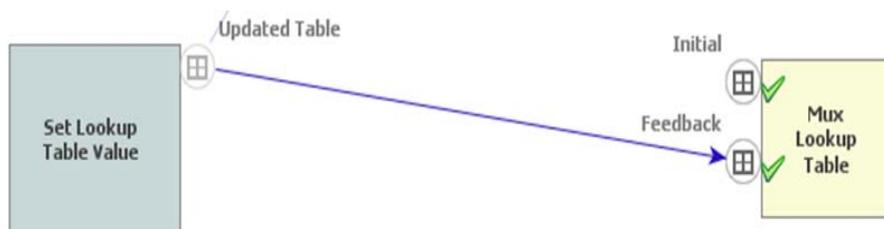


Figura 4.79: Conexión interna entre *Set Lookup Table Value* y *Mux Lookup Table*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

12

Functor For, ubicados en la categoría *Control* dentro de la biblioteca, itera un número determinado de veces, a los *functors* que se encuentren dentro de él.

- **Datos de salida:**

La tabla que contiene los valores finales será guardada en el *functor Save Lookup Table*, en donde se tendrán valores que determinen el ajuste del modelo.

- **Quinto paso:** Ejecución de la simulación con formación de parches y expansiones (*ver Figura 4.80*).

Es similar al segundo paso, con la diferencia de que se añaden tres nuevos *functors* en la parte del proceso.

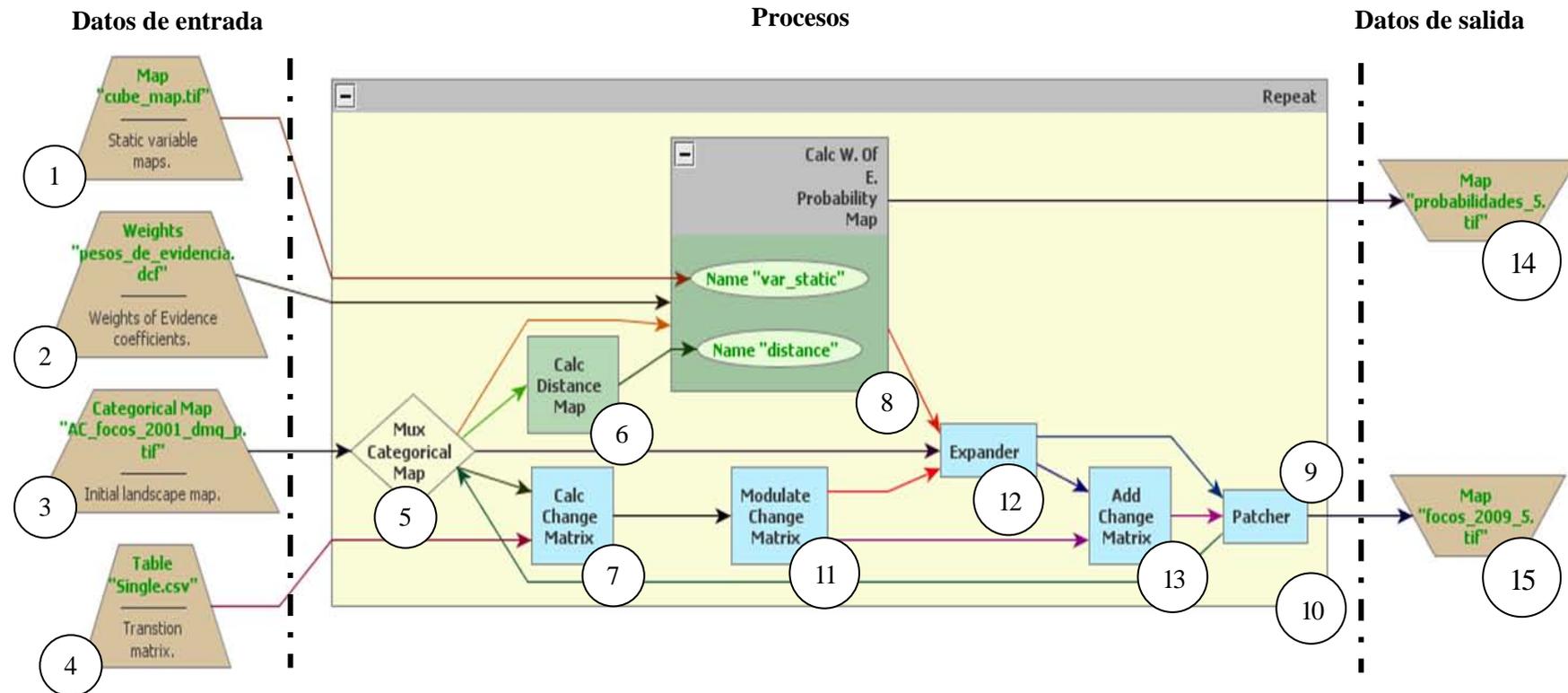


Figura 4.80: Estructura de la ejecución de la simulación con formación de parches y expansiones

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Procesos:**

- 11 *Functor Modulate Change Matrix*, ubicado en la categoría *Simulation* de la biblioteca, tiene la cualidad de dividir la cantidad de cambios entre diferentes tipos de funciones de cambios (ver *Figura 4.81*).

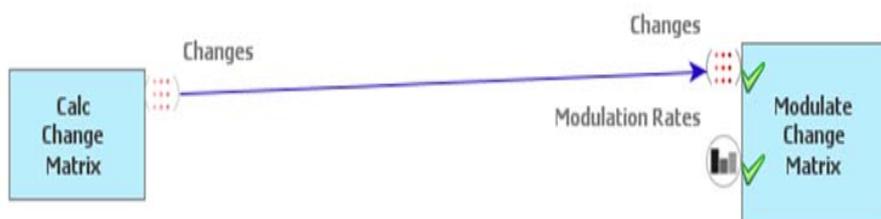


Figura 4.81: Conexión interna entre *Calc Change Matrix* y *Modulate Change Matrix*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- 12 *Functor Expander*, de la categoría *Simulation* dentro de la biblioteca, tiene como función expandir o contraer los parches anteriores de una determinada clase o categoría (ver *Figura 4.82*, *Figura 4.83* y *Figura 4.84*).

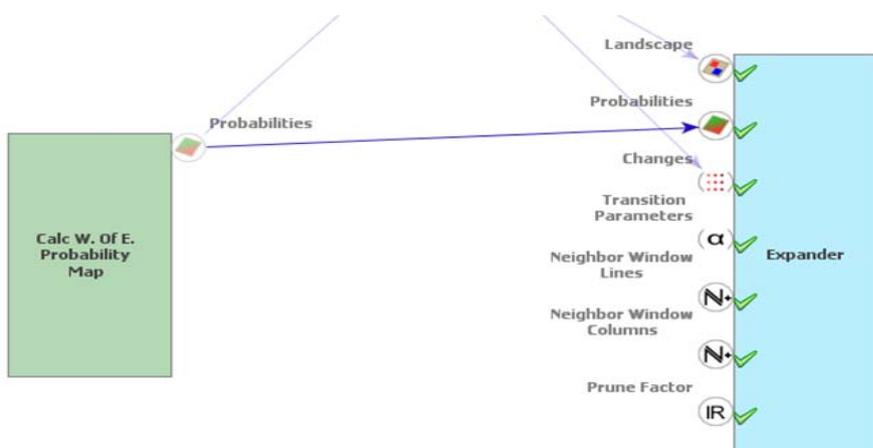


Figura 4.82: Conexión interna interna entre *Calc W. of E. Probability Map* y *Expander*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

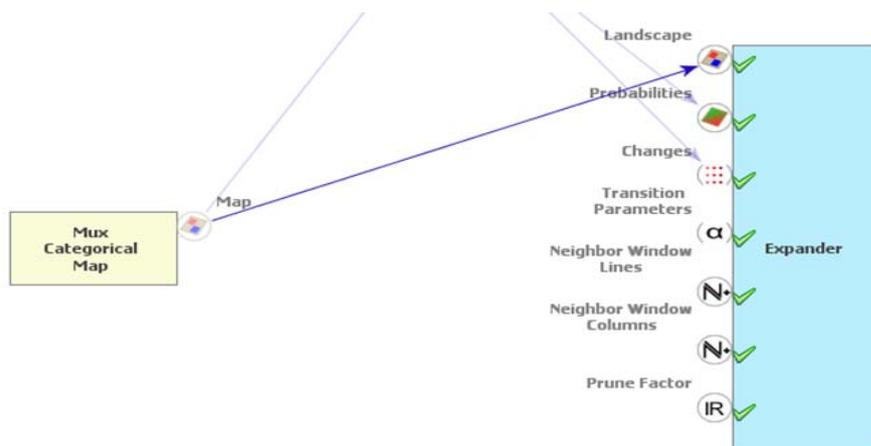


Figura 4.83: Conexión interna entre *Mux Categorical Map* y *Expander*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

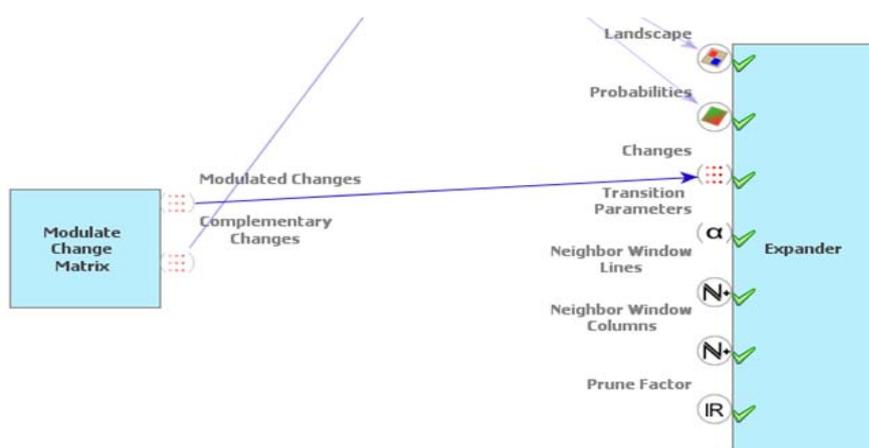


Figura 4.84: Conexión interna entre *Modulate Change Matrix* y *Expander*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

13

Functor Add Change Matrix, en la categoría *Simulation* de la biblioteca, tiene como función el resumir dos matrices de las cantidades de los cambios producidos en los anteriores *functors* (ver *Figura 4.85* y *Figura 4.86*).

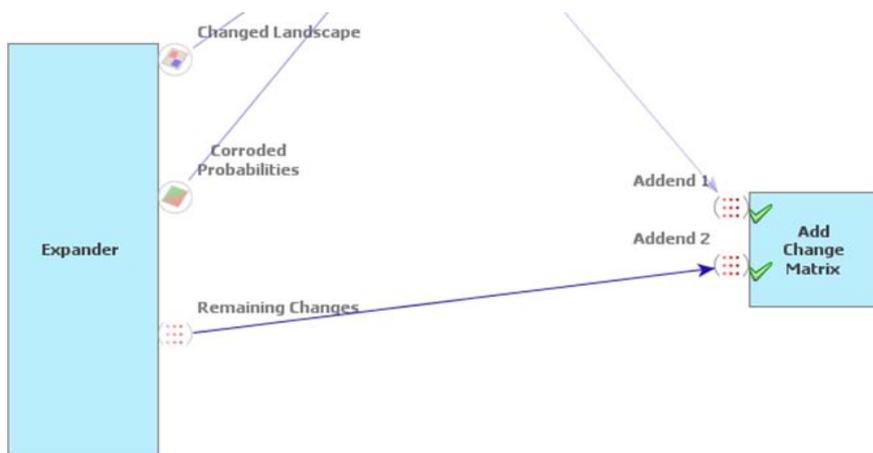


Figura 4.85: Conexión interna entre *Expander* y *Add Change Matrix*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

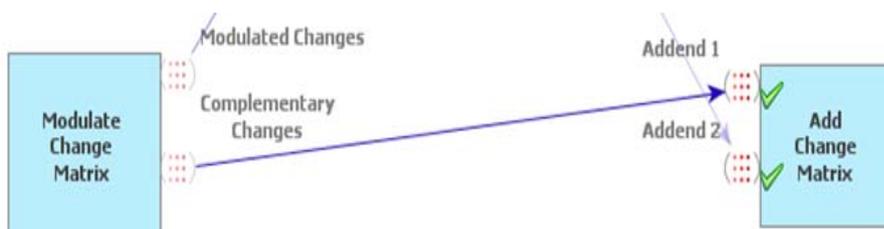


Figura 4.86: Conexión interna entre *Modulate Change Matrix* y *Add Change Matrix*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Al aumentar estos tres *functors*, las conexiones internas del *functor Patcher* también cambian (ver Figura 4.87 y Figura 4.88).

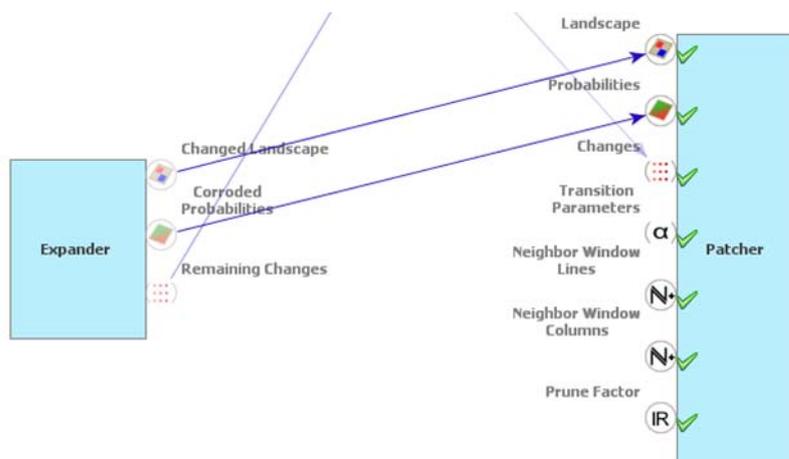


Figura 4.87: Conexión interna entre *Expander* y *Patcher*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

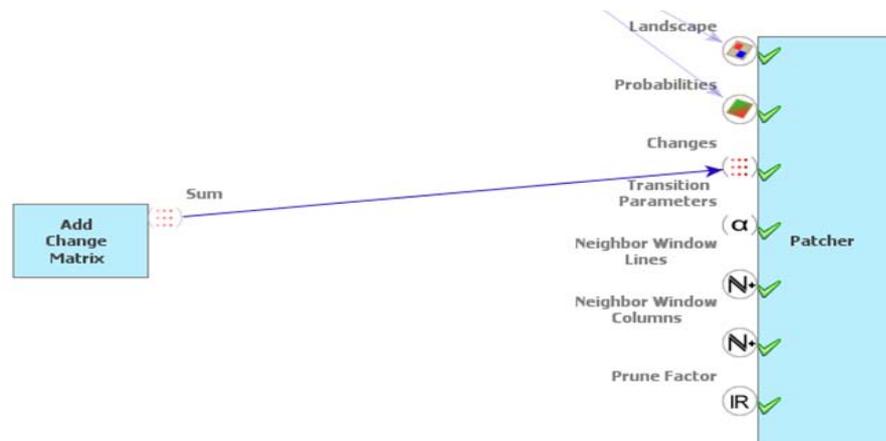


Figura 4.88: Conexión interna entre *Add Change Matrix* y *Patcher*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Datos de salida:**

Los mapas de probabilidad y de simulación de los focos de incendios serán guardados en dos *functors* denominados *Save Map*.

c. Desarrollo de la tercera etapa

El proceso que se presenta a continuación, muestra una proyección de los lugares que pueden ser propensos a presentar focos de incendios, de acuerdo a parámetros y condiciones trabajadas en el modelamiento (ver *Figura 4.89*). El proceso es similar al anterior, las únicas variantes que presenta son:

- En los datos de entrada el *Initial Landscape Map* es el mapa de focos de incendio del 2009.
- Se han aumentado dos *functors* denominados *Step* y *Calcule Value*, los mismos que sus funciones ya han sido explicadas en pasos anteriores.
- El número de iteraciones son cuatro porque el objetivo es proyectar focos de incendio en el DMQ para el 2013.

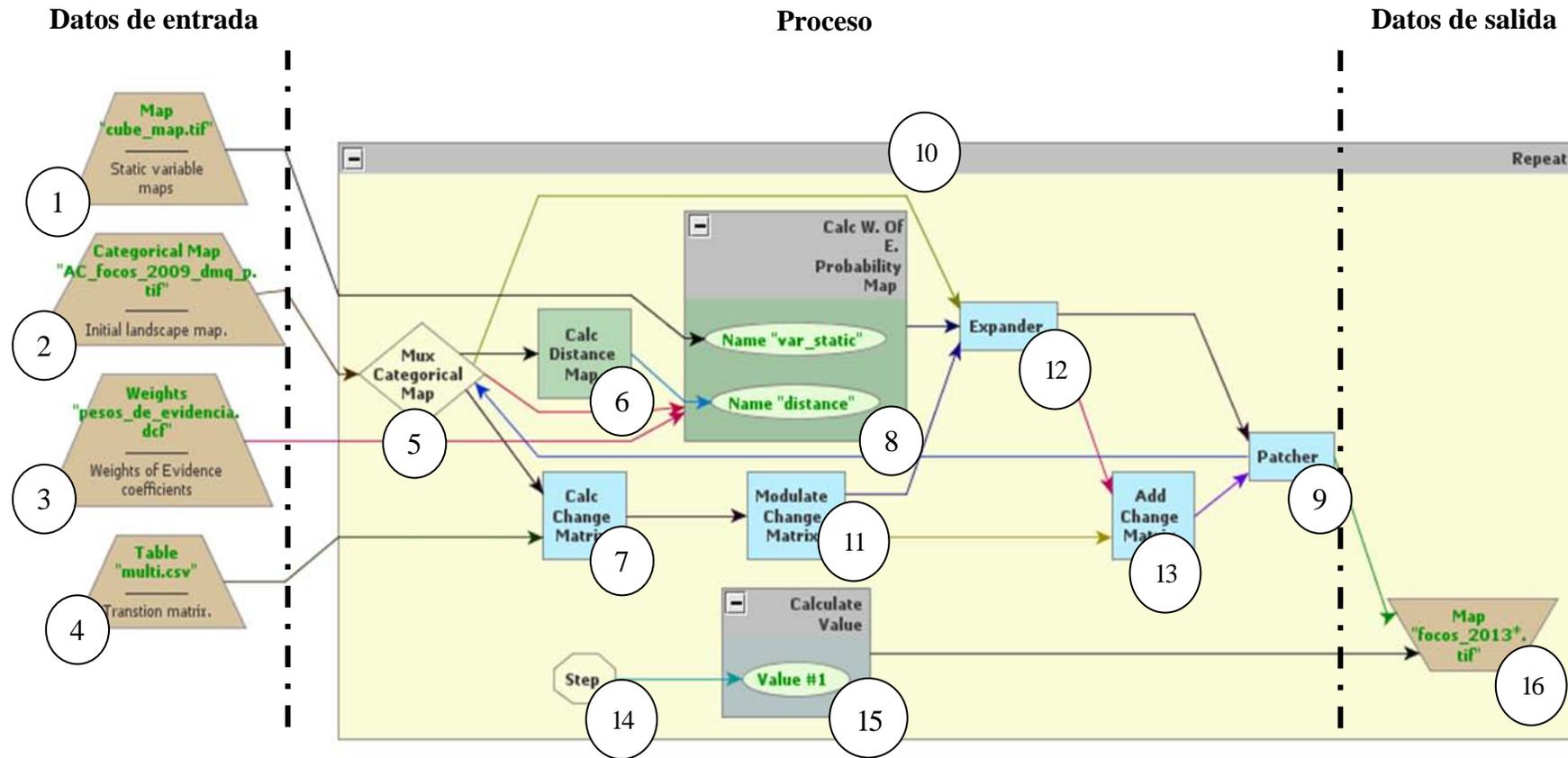


Figura 4.89: Estructura de modelo de proyección

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

5.1 Concentración de focos de incendio

Los focos de incendio utilizados son producto del análisis de la distribución espacial y temporal de cada uno de ellos en el DMQ y su área de influencia. Los 501 seleccionados desde el año 2000 al 2012 durante los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre (*ver Tabla 5.1*).

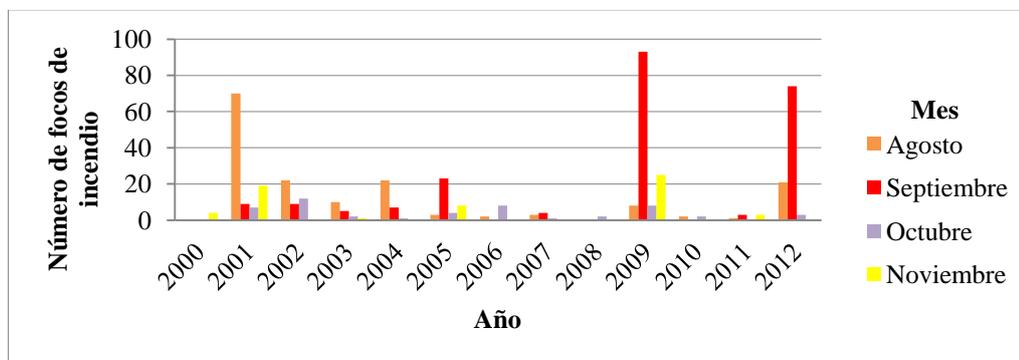
Tabla 5.1: Focos de incendio en el DMQ de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre desde el año 2000 al 2012

Año	Mes				TOTAL _{anual}
	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	
2000	0	0	0	4	4
2001	70	9	7	19	105
2002	22	9	12	0	43
2003	10	5	2	1	18
2004	22	7	1	0	30
2005	3	23	4	8	38
2006	2	0	8	0	10
2007	3	4	1	0	8
2008	0	0	2	0	2
2009	8	93	8	25	134
2010	2	0	2	0	4
2011	1	3	0	3	7
2012	21	74	3	0	98
TOTAL_{mensual}	164	227	50	60	501

Fuente: INPE (2013)

Agosto y septiembre con 164 y 227 focos respectivamente, son los meses que presentan mayor número de incendios desde el año 2000 al 2012. En referencia al 2001, 2009 y 2012 (con 105, 134 y 98 focos respectivamente), son los años que históricamente mayor número de incendios forestales se registraron (*ver Cuadro 5.1*).

Cuadro 5.1: Focos de incendio en el DMQ de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre desde el año 2000 al 2012



Fuente: INPE (2013)

De acuerdo a la distribución espacial de los focos de incendio en el DMQ, 264 de ellos se ubican en las parroquias rurales y 39 en las urbanas (*ver Tabla 5.2*).

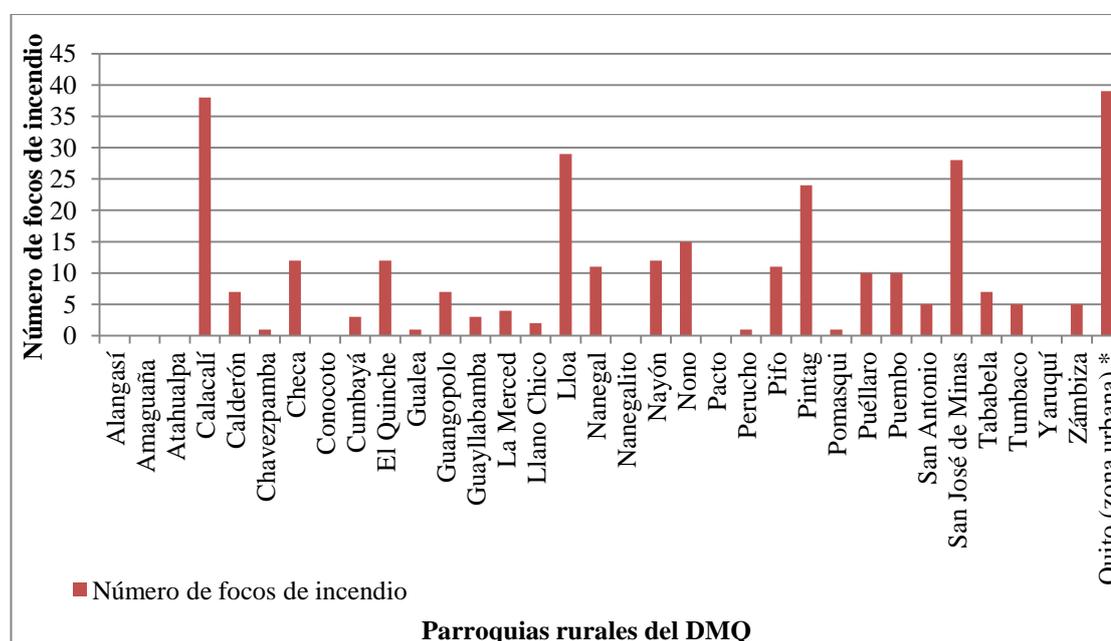
Tabla 5.2: Distribución de los focos de incendio por parroquia rural en el DMQ

Parroquia	Número de focos de incendio
Alangasí	0
Amaguaña	0
Atahualpa	0
Calacalí	38
Calderón	7
Chavezpamba	1
Checa	12
Conocoto	0
Cumbayá	3
El Quinche	12
Gualea	1
Guangopolo	7
Guayllabamba	3
La Merced	4
Llano Chico	2
Lloa	29
Nanegal	11
Nanegalito	0
Nayón	12
Nono	15
Pacto	0
Perucho	1
Pifo	11
Pintag	24
Pomasqui	1
Puéllaro	10
Puembo	10
San Antonio	5
San José de Minas	28
Tababela	7
Tumbaco	5
Yaruquí	0
Zámbiza	5
Quito (zona urbana)	39

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

En el Cuadro 5.2, se observa que las parroquias rurales con mayor concentración y presencia de focos de incendio son Calacalí, Lloa, San José de Minas y Pintag (38, 29, 28 y 24 respectivamente), pero también son las que mayor cobertura de vegetación natural y áreas seminaturales poseen (ver Figura 5.1, Anexo A18 y Mapa C01).

Cuadro 5.2: Distribución de los focos de incendio por parroquia rural en el DMQ



Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

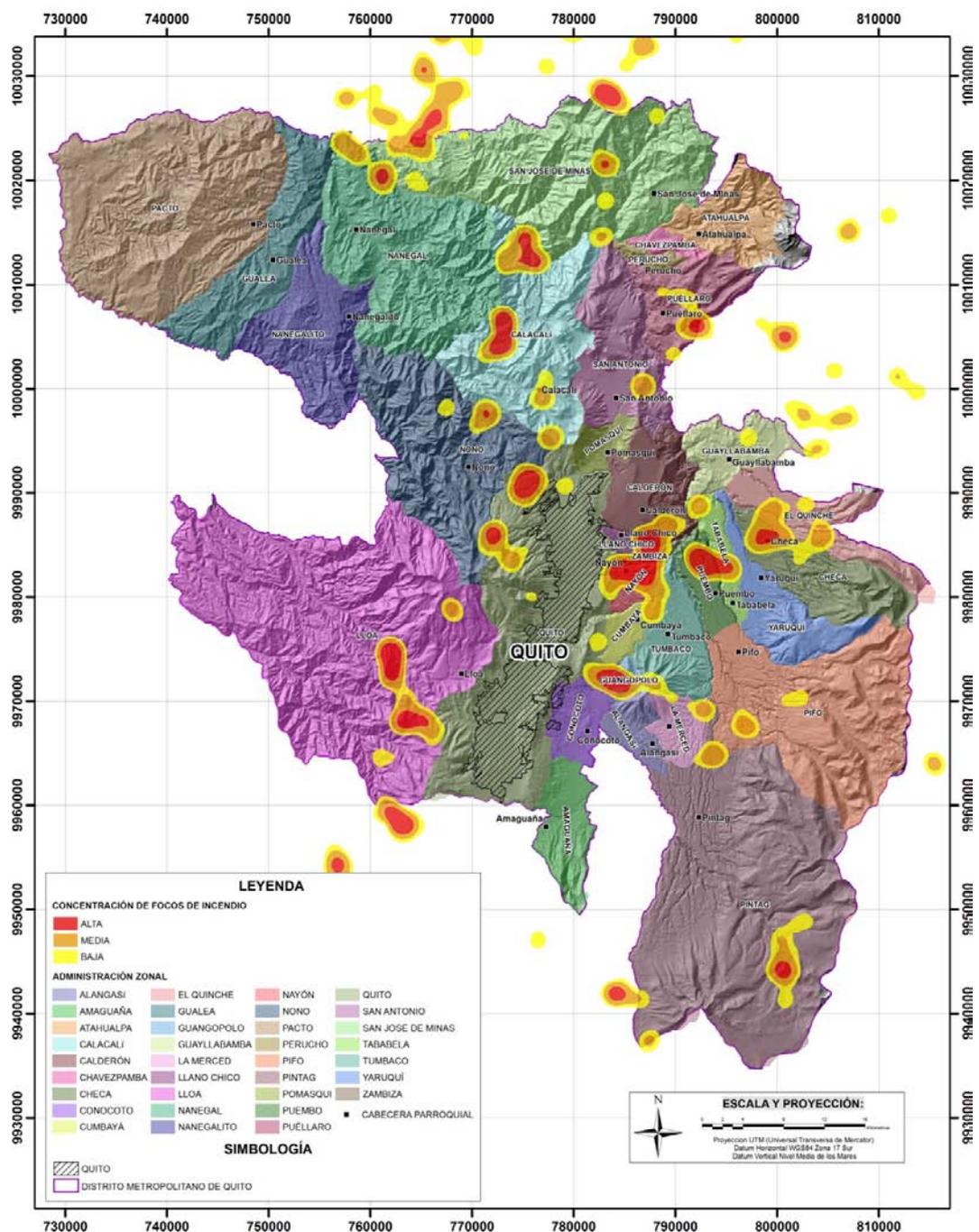


Figura 5.1: Distribución de la concentración de focos de incendio por parroquia en el DMQ

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

5.2 Puntos de observación y cuencas visuales para incendios forestales

Se determinaron 83 puntos de observación para la detección de incendios forestales distribuidos en 9 de las 11 administraciones zonales del DMQ, las cuales se detallan en la Tabla 5.3 (ver Figura 5.2, Anexo A19):

Tabla 5.3: Distribución de los puntos de observación para la detección de incendios forestales por administración zonal en el DMQ

Administración zonal	Número de puntos de observación
Aeropuerto	17
Centro	1
Eloy Alfaro	13
La Delicia	8
Norcentral	6
Noroccidente	18
Norte	2
Tumbaco	1
Valle de Los Chillos	17

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

La Tabla 5.4, señala que de los 83 puntos de observación para la detección de incendios forestales, 58 se determinaron como prioritarios, puesto que sus polígonos de visibilidad analizados conjuntamente con las áreas de concentración de focos de incendio catalogadas como alta y media, abarcan zonas críticas basadas en la recurrencia de estos eventos desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2012. Los 25 puntos de observación opcionales incluyen en su cuenca visual zonas de concentración de focos de incendio catalogadas como bajas; y conjuntamente con los prioritarios cubrir la mayor parte del DMQ.

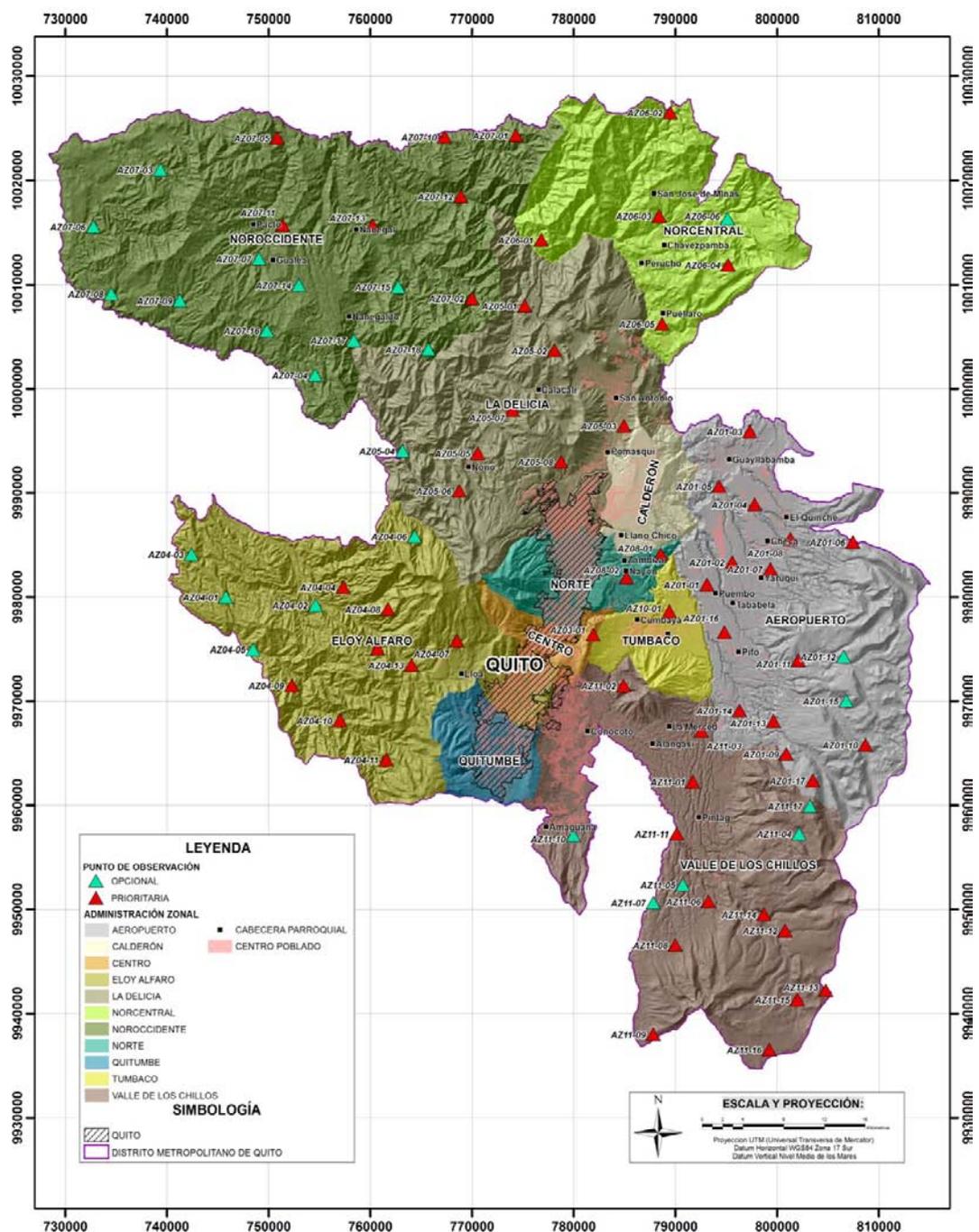


Figura 5.2: Distribución de los puntos de observación para incendios forestales en las administraciones zonales del DMQ

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Tabla 5.4: Distribución de los tipos de puntos de observación para la detección de incendios forestales por administración zonal en el DMQ

Administración zonal	Número de puntos de observación	Tipo de punto de observación	
		Prioritario	Opcional
Aeropuerto	17	15	2
Centro	1	1	0
Eloy Alfaro	13	8	5
La Delicia	8	7	1
Norcentral	6	5	1
Noroccidente	18	7	11
Norte	2	1	0
Tumbaco	1	1	0
Valle de Los Chillos	17	12	5

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Las cuencas visuales generadas a partir de los puntos de observación cubren un área de 225.557,202 Ha, constituyendo el 53,30% del área total del DMQ que es de 423.157,745 Ha (ver Tabla 5.5). Pero debido a la morfología del terreno con pendientes superiores al 27% que ocupan 248.378,018 Ha, constituyendo el 58,70% del área de estudio; y la presencia significativa de drenajes existen zonas en las que no se obtuvo cobertura (ver Figura 5.3, Anexo A20 y Mapa C02).

Tabla 5.5: Distribución de los puntos de observación para la detección de incendios forestales y su área de cobertura en el DMQ

Código	Este (m)	Norte (m)	Altura (m)	Área de cobertura (Ha)	Cobertura en el DMQ (%)	Administración zonal	Tipo de instalación
AZ01-01	793097	9981189	2405	12.455,051	2,943	Aeropuerto	Prioritaria
AZ01-02	795586	9983337	2445	9.398,630	2,221	Aeropuerto	Prioritaria
AZ01-03	797315	9995905	2250	2.863,414	0,677	Aeropuerto	Prioritaria
AZ01-04	797775	9988887	2458	5.951,928	1,407	Aeropuerto	Prioritaria
AZ01-05	794295	9990620	2187	6.375,765	1,507	Aeropuerto	Prioritaria
AZ01-06	807448	9985268	3160	3.653,421	0,863	Aeropuerto	Prioritaria

AZ01-07	799328	9982690	2617	5.892,613	1,393	Aeropuerto	prioritaria
AZ01-08	801297	9985563	2693	8.409,738	1,987	Aeropuerto	prioritaria
AZ01-09	800902	9964900	3495	2.268,045	0,536	Aeropuerto	prioritaria
AZ01-10	808697	9965810	3869	2.800,175	0,662	Aeropuerto	prioritaria
AZ01-11	802087	9973924	3162	3.092,084	0,731	Aeropuerto	prioritaria
AZ01-12	806539	9974275	3774	3.747,360	0,886	Aeropuerto	opcional
AZ01-13	799633	9968086	3106	3.432,383	0,811	Aeropuerto	prioritaria
AZ01-14	796302	9969091	2658	7.881,689	1,863	Aeropuerto	prioritaria
AZ01-15	806785	9970024	3775	4.152,829	0,981	Aeropuerto	opcional
AZ01-16	794825	9976614	2515	8.013,441	1,894	Aeropuerto	prioritaria
AZ01-17	803501	9962384	4120	1.884,087	0,445	Aeropuerto	prioritaria
AZ03-01	781913	9976389	2852	15.570,474	3,680	Centro	prioritaria
AZ04-01	745799	9979986	2043	1.396,789	0,330	Eloy Alfaro	opcional
AZ04-02	754606	9979220	2090	2.298,512	0,543	Eloy Alfaro	opcional
AZ04-03	742400	9984112	1615	1.141,574	0,270	Eloy Alfaro	opcional
AZ04-04	757326	9980943	2415	3.608,737	0,853	Eloy Alfaro	prioritaria
AZ04-05	748468	9974976	1906	1.136,184	0,269	Eloy Alfaro	opcional
AZ04-06	764350	9985820	2901	2.473,932	0,585	Eloy Alfaro	opcional
AZ04-07	768500	9975801	3427	3.214,784	0,760	Eloy Alfaro	prioritaria
AZ04-08	761726	9978823	3260	2.634,537	0,623	Eloy Alfaro	prioritaria
AZ04-09	752273	9971509	2319	4.524,716	1,069	Eloy Alfaro	prioritaria
AZ04-10	757007	9968149	2624	4.649,856	1,099	Eloy Alfaro	prioritaria
AZ04-11	761563	9964382	3259	2.812,092	0,665	Eloy Alfaro	prioritaria
AZ04-12	760724	9975058	2551	2.014,329	0,476	Eloy Alfaro	prioritaria
AZ04-13	764051	9973450	2814	5.210,045	1,231	Eloy Alfaro	prioritaria
AZ05-01	775190	10007963	2067	3.346,066	0,791	La Delicia	prioritaria
AZ05-02	778116	10003679	2493	1.664,541	0,393	La Delicia	prioritaria
AZ05-03	784934	9996426	2415	6.045,878	1,429	La Delicia	prioritaria
AZ05-04	763154	9994016	2374	2.546,767	0,602	La Delicia	opcional
AZ05-05	770577	9993801	2640	2.178,140	0,515	La Delicia	prioritaria
AZ05-06	768731	9990176	3006	4.763,614	1,126	La Delicia	prioritaria
AZ05-07	773965	9997990	2960	4.203,134	0,993	La Delicia	prioritaria
AZ05-08	778746	9993001	2984	7.294,641	1,724	La Delicia	prioritaria
AZ06-01	776805	10014287	1915	7.692,629	1,818	Norcentral	prioritaria
AZ06-02	789498	10026517	3041	2.652,546	0,627	Norcentral	prioritaria
AZ06-03	788388	10016593	2079	8.705,627	2,057	Norcentral	prioritaria
AZ06-04	795169	10011904	2882	4.311,590	1,019	Norcentral	prioritaria
AZ06-05	788694	10006235	2181	3.809,887	0,900	Norcentral	prioritaria
AZ06-06	795122	10016327	2445	5.012,762	1,185	Norcentral	opcional
AZ07-01	776830	10025380	2215	1.388,867	0,328	Noroccidente	prioritaria
AZ07-02	769990	10008666	2247	922,733	0,218	Noroccidente	prioritaria
AZ07-03	739337	10021049	909	1.780,362	0,421	Noroccidente	opcional
AZ07-04	754571	10001320	1870	1.156,346	0,273	Noroccidente	opcional

AZ07-05	750841	10024086	912	1.543,597	0,365	Noroccidente	prioritaria
AZ07-06	732755	10015548	821	4.998,181	1,181	Noroccidente	Opcional
AZ07-07	749040	10012499	1244	4.365,002	1,032	Noroccidente	Opcional
AZ07-08	734516	10009108	989	2.863,701	0,677	Noroccidente	Opcional
AZ07-09	741269	10008469	1169	1.834,629	0,434	Noroccidente	Opcional
AZ07-10	767133	10024826	1301	3.009,717	0,711	Noroccidente	Prioritaria
AZ07-11	751390	10015694	1297	4.315,600	1,020	Noroccidente	Prioritaria
AZ07-12	768891	10018479	1035	5.382,070	1,272	Noroccidente	Prioritaria
AZ07-13	760215	10015675	1406	1.903,732	0,450	Noroccidente	Prioritaria
AZ07-14	752959	10009956	1560	2.028,921	0,479	Noroccidente	Opcional
AZ07-15	762719	10009806	1695	4.147,024	0,980	Noroccidente	Opcional
AZ07-16	749817	10005597	1710	3.263,212	0,771	Noroccidente	Opcional
AZ07-17	758355	10004642	1462	4.172,735	0,986	Noroccidente	Opcional
AZ07-18	765704	10003779	2084	1.588,598	0,375	Noroccidente	Opcional
AZ08-01	788548	9984114	2332	5.171,963	1,222	Norte	Prioritaria
AZ08-02	785200	9981843	2557	11.775,454	2,783	Norte	Prioritaria
AZ10-01	789389	9978629	2345	7.460,859	1,763	Tumbaco	Prioritaria
AZ11-01	791698	9962261	2705	6.698,300	1,583	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-02	784902	9971496	2614	5.763,276	1,362	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-03	792553	9967096	2620	8.121,404	1,919	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-04	802146	9957278	3920	677,510	0,160	Valle de Los Chillos	Opcional
AZ11-05	790723	9952369	3045	6.243,369	1,475	Valle de Los Chillos	Opcional
AZ11-06	793241	9950757	3220	6.965,601	1,646	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-07	787814	9950655	3050	5.422,191	1,281	Valle de Los Chillos	Opcional
AZ11-08	789995	9946581	3397	4.616,740	1,091	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-09	785988	9936396	3887	1.702,620	0,402	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-10	779948	9957121	2668	1.773,200	0,419	Valle de Los Chillos	Opcional
AZ11-11	790130	9957282	2758	5.038,032	1,191	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-12	800782	9947978	3837	5.205,327	1,230	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-13	804776	9942234	4040	4.253,346	1,005	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-14	798709	9949519	3518	5.063,490	1,197	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-15	801988	9941354	3906	3.457,433	0,817	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-16	799217	9936536	4189	2.363,444	0,559	Valle de Los Chillos	Prioritaria
AZ11-17	803216	9959927	4142	1.605,890	0,380	Valle de Los Chillos	Opcional

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

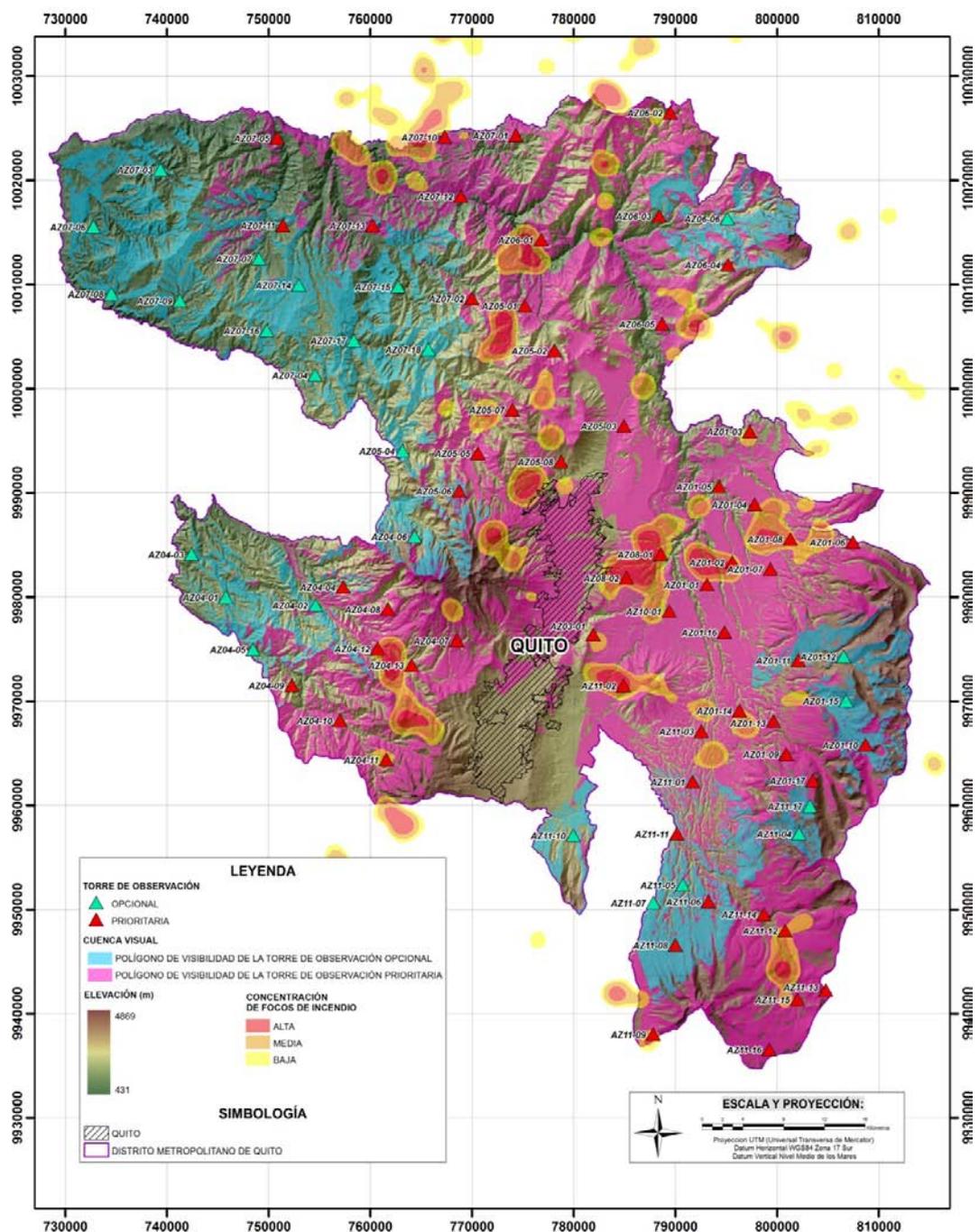


Figura 5.3: Distribución de los puntos de observación para incendios forestales con sus cuencas visuales

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

5.3 Lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales

Mediante la técnica de Evaluación Multicriterio en base al objetivo planteado de identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales, se definieron criterios (variables) que se encuentran asociados a entidades geográficas (factores), que inciden en la actividad a evaluar. A partir de la integración de los criterios en forma de capas temáticas en la regla de decisión, se obtuvo un modelo de acuerdo al objetivo; en dicho modelo cada criterio recibe un valor proveniente de un índice que establece de mayor a menor la ponderación respecto a su objetivo.

En la evaluación se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (APH), con el fin de realizar comparaciones biunívocas (comparaciones entre pares) de los criterios con respecto al objetivo principal. Para esto, el modelo emplea una tabla denominada escala Saaty, con la cual se realizó la comparación subjetiva biunívoca para la asignación de juicios de valor y con ello obtener sus pesos (*ver Tabla 5.6*).

Tabla 5.6: Criterios y pesos obtenidos con el modelo APH

Criterio	Peso
Distancia a redes de distribución de agua	1,688
Cobertura vegetal	0,965
Distancia a concentración de focos de incendio	1,206
Distancia a facilidades de almacenamiento y distribución de agua	1,929
Distancia a infraestructura industrial y de comunicación	0,482
Pendiente del terreno	2,17
Distancia a cuerpos de agua	1,447
Distancia a áreas artificiales	0,241
Distancia a vías	0,723

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Para conocer la coherencia del modelo, se determinó la relación de consistencia (CR), dando como resultado cero, con lo cual los juicios de valor se consideran adecuados; esto al señalar que el índice anteriormente mencionado debe ser inferior a 0,10.

Posteriormente, con la Sumatoria Lineal Ponderada se estructuró la regla de decisión tomando en consideración los criterios favorables y limitantes; el primero que suma y el otro resta dentro de la ecuación.

Sumada la ecuación, se obtuvo un valor máximo de 1,489 y un valor mínimo de 1,206; los mismo que fueron normalizados a valores entre 1 y 0.

Luego, se seleccionaron valores mayores a 0,95 puesto que se generan áreas más ajustadas de acuerdo a los criterios tomados en cuenta para la evaluación.

Por último, las áreas con valores superiores a lo indicado anteriormente se intersecaron con la cobertura de las denominadas áreas protegidas del DMQ. (*ver Figura 5.4, Anexo A21 y Mapa C03*).

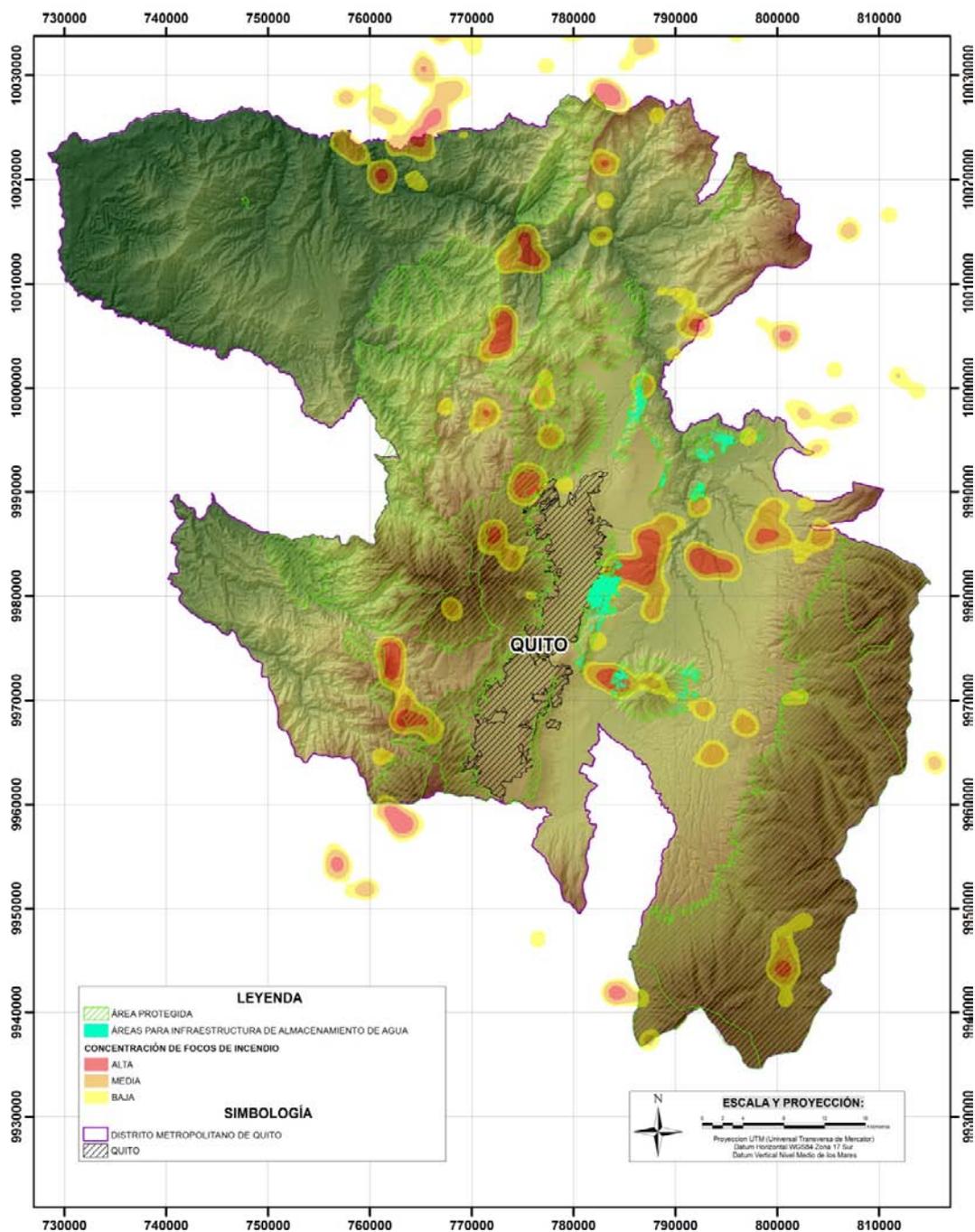


Figura 5.4: Áreas óptimas para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

5.4 Predicción y probabilidad de incendios forestales con la metodología de Autómatas Celulares

5.4.1 Calibración

- **Primer paso:** Cálculo de la matriz de transición

Las tablas generadas en este primer paso tienen los nombres de *Single Step* y *Multi Step*, las cuales representaran los porcentajes de cambio en el periodo de ocho años transcurridos entre 2001 y 2009 de la cobertura inicial y final.

La matriz de cambio *Single Step* (ver Tabla 5.7), dio como resultado un porcentaje de cambio por el periodo de ocho años. Mientras que la matriz de cambio *Multi Step* (ver Tabla 5.8), genera un porcentaje de cambio anual dentro del rango de los ocho años.

Tabla 5.7: Matriz de cambio Single Step

		1	2
		Presencia de foco de incendio	Sin presencia de foco de incendio
1	Presencia de foco de incendio	XXX	0,0175397
2	Sin presencia de foco de incendio	0,9296596	XXX

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Tabla 5.8: Matriz de cambio Multi Step

		1	2
		Presencia de foco de incendio	Sin presencia de foco de incendio
1	Presencia de foco de incendio	XXX	0,0056968
2	Sin presencia de foco de incendio	0,3019465	XXX

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

También las matrices de cambio permiten obtener las transiciones de las variables que en este caso serán dos (ver Tabla 5.9).

Tabla 5.9: Transiciones generadas

Transiciones	Descripción
1 → 2	Presencia de foco de incendio - Sin presencia de foco de incendio
2 → 1	Sin presencia de foco de incendio - Presencia de foco de incendio

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Segundo paso:** Creación del *Cubo Raster*

El *Cubo Raster* creado, contiene las variables de: áreas pobladas, combustibilidad, humedad relativa, orientación y pendiente del terreno, precipitación, poblados, ríos y temperatura (ver Figura 5.5 y Figura 5.6).

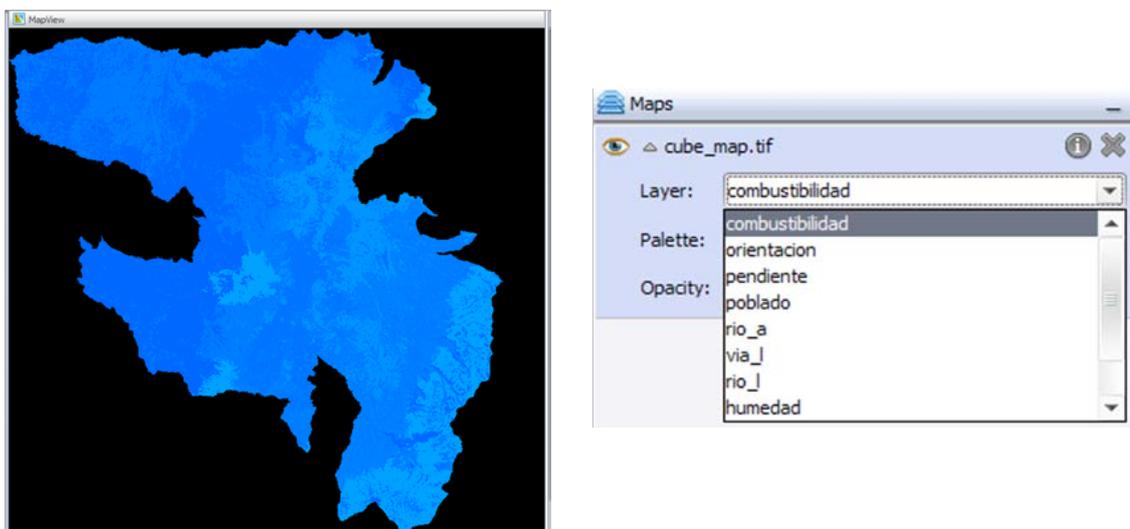


Figura 5.5: Cubo Raster visto desde Map View

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

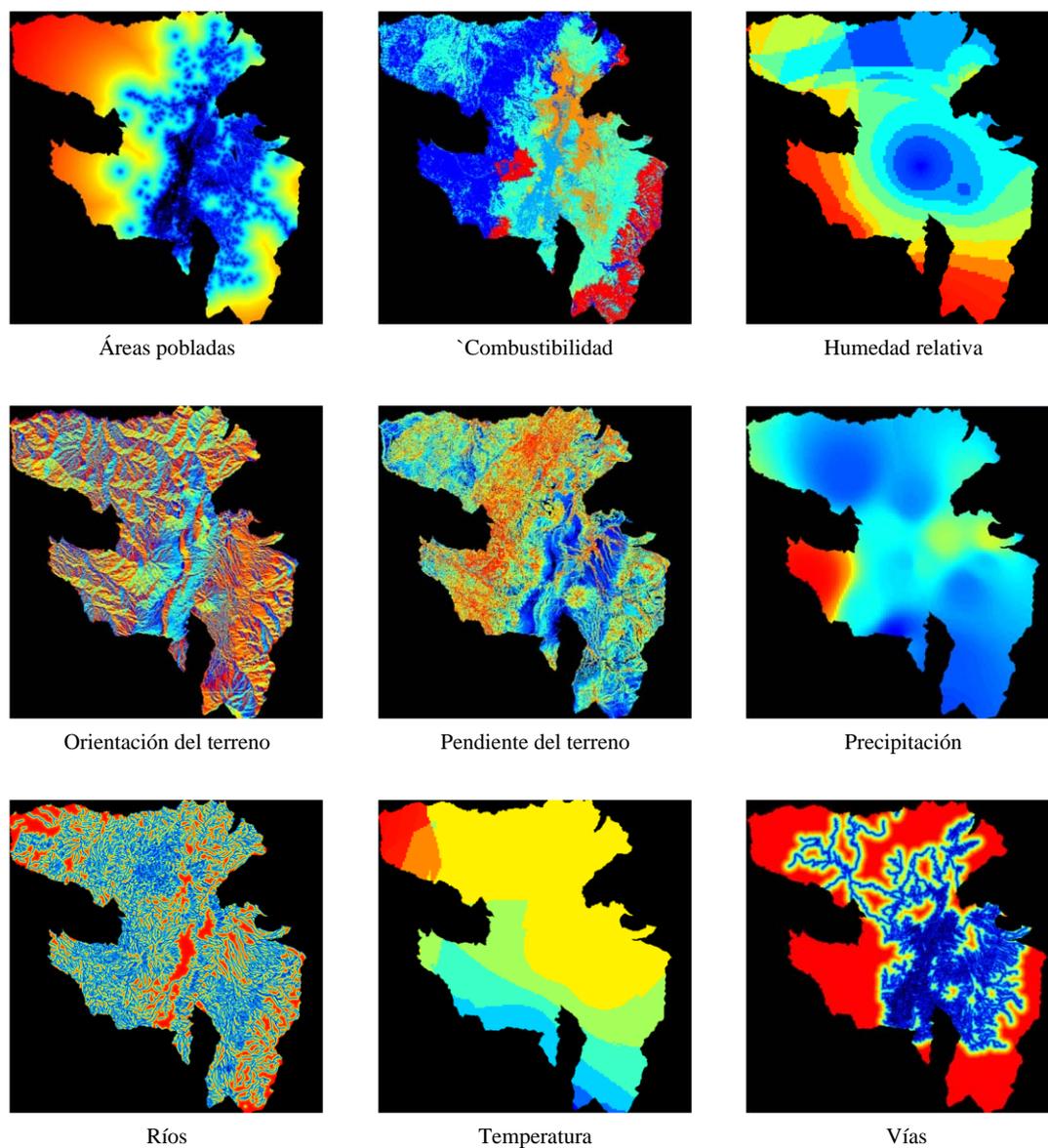


Figura 5.6: Variables estáticas dentro del Cubo *Raster* visto desde el *Map View*

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Tercer paso:** Cálculo de rangos para categorizar variables continuas

El resultado obtenido en este proceso es un archivo definido como el almacén de los pesos de evidencia, tomando en cuenta las transiciones que se generaran a lo largo del proceso.

En la Figura 5.7, se observa que la primera línea contiene el nombre de la variable y los rangos, mientras que la segunda línea presenta la transición y el coeficiente de pesos de evidencia.

```

:var_static/combustibilidad  0:100
1,2  0
:var_static/humedad  0:100
1,2  0
:var_static/orientacion  0:100  100:200  200:300  300:400
1,2  0  0  0  0
:var_static/pendiente  0:100  100:400
1,2  0  0
:var_static/precipitacion  0:100  100:200  200:300
1,2  0  0  0
:var_static/rio_1  0:100  100:200  200:500  500:700  700:800  800:1000
2,1  0  0  0  0  0  0

```

Figura 5.7: Ejemplo del almacén de los pesos de evidencia

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

El coeficiente de pesos de evidencia presenta un valor de cero, ya que como se explicó anteriormente, este proceso tiene la finalidad de crear la estructura; en el siguiente paso este valor será remplazado por los pesos de evidencia. Los resultados completos de este proceso están en el Anexo B07.

- **Cuarto paso:** Cálculo de los coeficientes de los pesos de evidencia

En el proceso realizado se obtuvo los coeficientes de pesos para cada rango, transición y variable (ver *Tabla 5.10* y *Tabla 5.11*).

Tabla 5.10: Transición: 1→2 Variable: var_static/orientación

Range	Possible Transitions	Executed Transitions	Weight Coefficient	Contrast Significant?	Significant?
0≤v<100	2725125	53853	0,1192895751	0,1656114631	yes
100≤v<200	2172318	46151	0,1931840273	0,2513247122	yes
200≤v<300	3175800	46941	-0,176190681	-0,2457246361	yes
300≤v<400	1920141	28534	-0,1707441473	-0,2060738270	yes
	10329640	181580			

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

Tabla 5.11: Transición: 1→2 Variable: var_static/río_1

Range	Possible Transitions	Executed Transitions	Weight Coefficient	Contrast Significant?	Significant?
0≤v<100	2835427	47496	-0,0486449433	-0,06732028868	yes
100≤v<200	2691136	44209	-0,06846165285	-0,09261894588	yes
200≤v<300	1668773	30502	0,04016014117	0,04840918070	yes
300≤v<400	1001935	20788	0,1694181840	0,1901476492	yes
400≤v<500	594604	13856	0,2881660063	0,3094053370	yes
500≤v<700	607021	13950	0,2739299685	0,2944150507	yes
700≤v<800	150388	2441	-0,08068172776	-0,08186790434	yes
800≤v<900	103621	1352	-0,3022570367	-0,3050012722	yes
900≤v<1000	75190	630	-0,7498750476	-0,7539073695	yes
1000≤v<1100	57413	228	-150,093,669,39	-150,548,266,54	yes
1100≤v<1200	46132	6	-492,360,800,97	-492,828,680,68	yes
1200≤v<2900	153884	0	~0	~0	no
	9985524	175458			

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

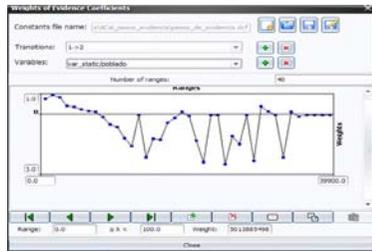
Los *Range* representan a los valores de los *buffer* preestablecidos en los parámetros de categorización de las variables; *Possible Transitions* representa el número de celdas que pueden cambiar de estado; *Executed Transitions* representa el número de celdas que cambiaron de estado; *Weight Coefficient*, es el coeficiente de los pesos calculado por el programa para los rangos establecidos de cada variable, los pesos pueden ser: positivos, negativos y nulos.

Los pesos positivos representa la importancia de las variables que contribuyen en las transiciones, los negativos demuestran la ausencia de la variable para el modelamiento y los pesos nulos son valores irrelevantes.

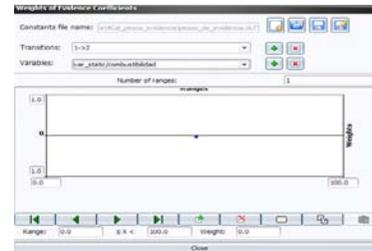
A continuación se presenta los coeficientes de evidencia desde una representación gráfica, hay que tomar en cuenta que los valores mayores a cero o positivos, representan el favorecimiento a la existencia de focos de incendio, los valores negativos representa una resistencia a la presencia de focos de incendio, mientras que los valores cercanos a cero no tiene ningún efecto sobre la formación de focos de incendio. Es decir, que en este paso aparte de obtener los pesos de evidencia de cada variable, se obtiene el análisis de asociación y repulsión de una variable estática, sobre la variable dinámica.

En la Figura 5.8 y Figura 5.9, se observan que las variables meteorológicas y de combustibilidad tienden a cero, es decir, no aportaran de manera considerable al modelamiento; pero el motivo por el cual no se las ha descartado, es que son esenciales para la determinación de los focos de incendio y su interacción conjuntamente con las variables que presentan mayor influencia al modelo, tales como: áreas pobladas, pendiente y orientación del terreno, ríos y vías.

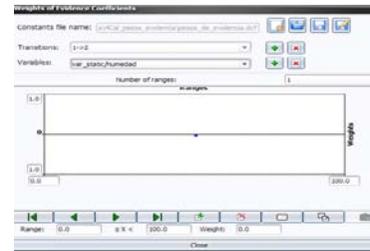
Los resultados completos de las tablas de pesos de evidencia de las variables se encuentran en los Anexo B08.



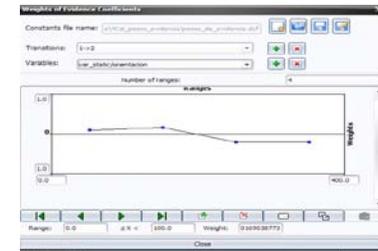
Áreas pobladas



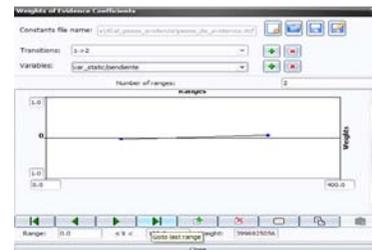
Combustibilidad



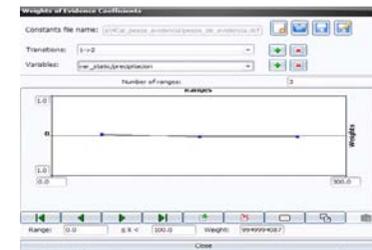
Humedad relativa



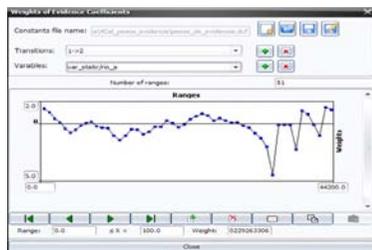
Orientación del terreno



Pendiente del terreno



Precipitación



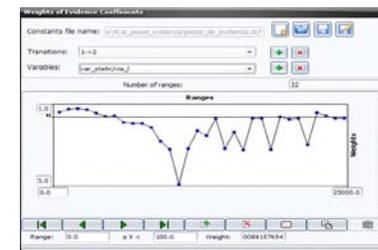
Río (río_a)



Río (río_l)

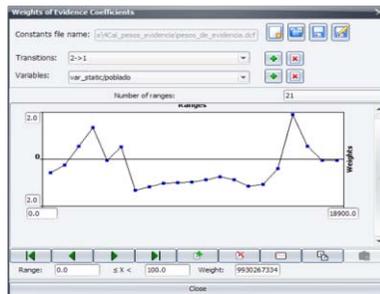


Temperatura

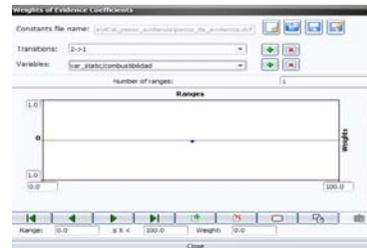


Vía

Figura 5.8: Pesos de evidencia, Transición: 1→2
Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)



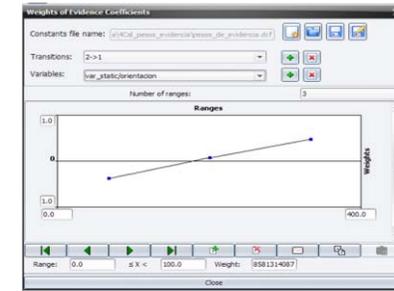
Áreas pobladas



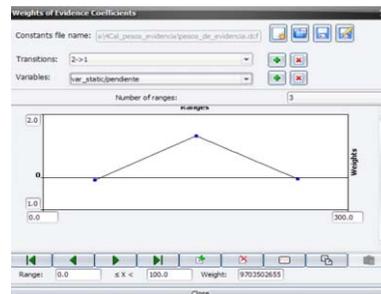
Combustibilidad



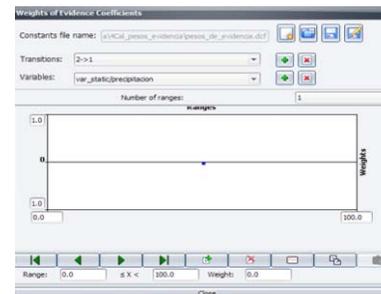
Humedad relativa



Orientación del terreno



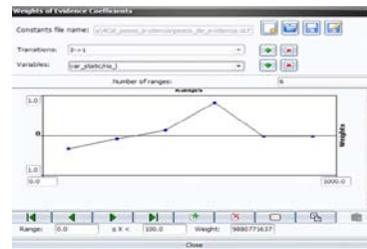
Pendiente del terreno



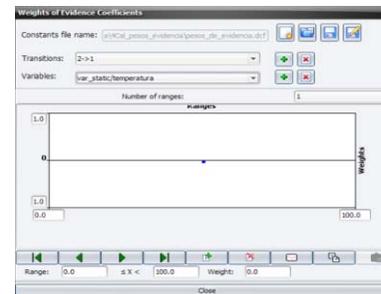
Precipitación



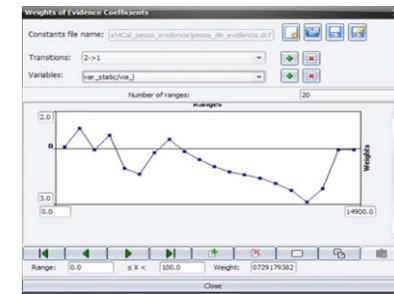
Río (río_a)



Río (río_l)



Temperatura



Vía

Figura 5.9: Pesos de evidencia, Transición: 2→1
Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

- **Quinto paso:** Análisis de correlación de mapas

En este paso se analiza la correlación de las variables por pruebas pareadas, con la finalidad de mostrar la independencia entre las mismas y de este modo elegir las variables que se eliminarán o no del modelamiento (*ver Anexo B09*).

Todas las variables utilizadas se encuentran en el rango de tolerancia fijada por las pruebas pareadas, por lo cual no se eliminó ninguna variable. En el Anexo B10 se encuentran el resultado de este proceso.

5.4.2 Validación

En esta etapa del modelo se obtuvo dos coberturas, una de simulación (*ver Figura 5.10, Anexo A22 y Mapa C04*) y otra de probabilidad (*ver Figura 5.1, Anexo A23 y Mapa C05*).

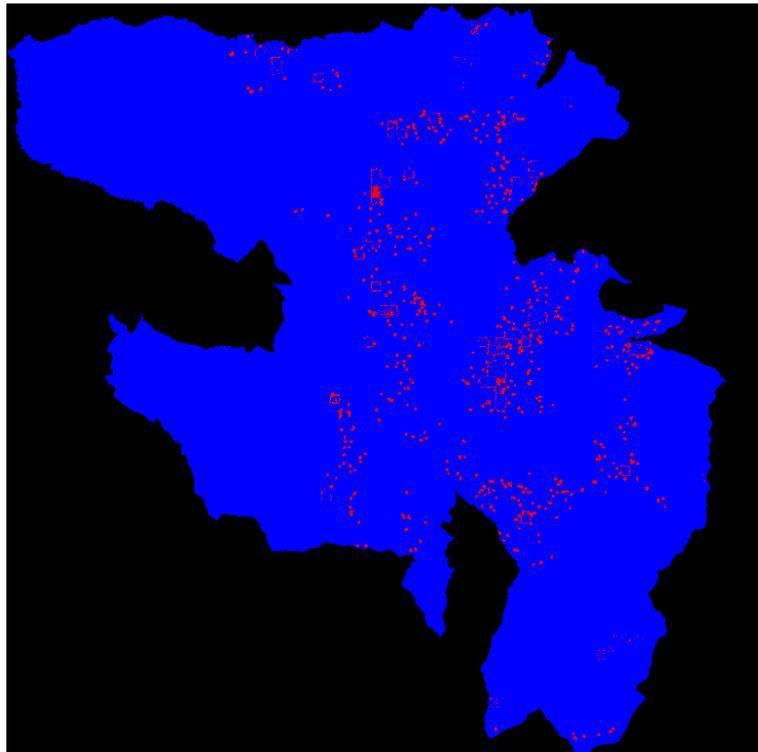


Figura 5.10: Modelo de simulación de focos de incendio de año 2013

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

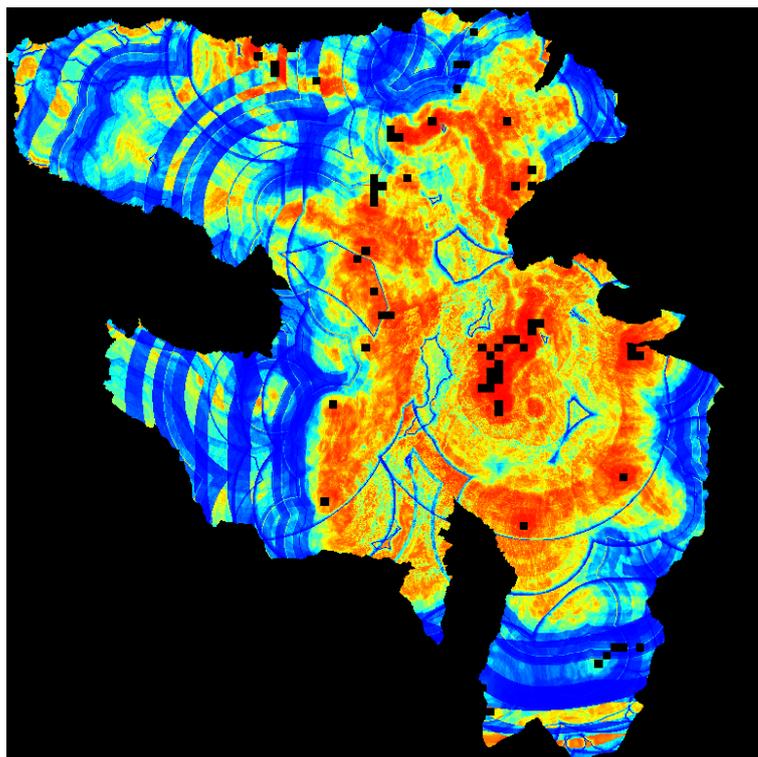


Figura 5.11: Modelo de probabilidad de focos de incendio

Fuente: Aguilar H. & Suárez R. (2013)

El área de color rojo es la más propensa a presentar focos de incendio, por lo que se observa que en el DMQ la mayor influencia para que ocurra este suceso son las áreas pobladas y vías.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- **Concentración de focos de incendio**
 - Los focos de incendio seleccionados desde el año 2000 al 2012 durante los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre fueron únicamente 501 para el DMQ y su área de influencia, recopilados por los satélites polares que presentan una resolución espacial de 1km.
 - Mediante el análisis e interpretación de imágenes satelitales, se descartaron los focos de incendio localizados en zonas edificadas, principalmente en el área consolidada de la ciudad de Quito. Mientras que los ubicados en zonas de cultivo, algunos fueron tomados en cuenta y otros no, por su cercanía a zonas edificadas o encontrarse en zonas de invernaderos o sus inmediaciones.
 - Agosto y septiembre con 164 y 227 focos respectivamente, son los meses que presentan mayor número de incendios desde el año 2000 al 2012.
 - El 2001, 2009 y 2012 (con 105, 134 y 98 focos respectivamente), son los años que históricamente mayor número de incendios forestales han sido registrados.

- De acuerdo a la distribución espacial de los focos de incendio dentro del DMQ, 264 de ellos se ubican en las parroquias rurales y 39 en las urbanas, siendo las parroquias rurales de: Calacalí, Lloa, San José de Minas y Pintag con 38, 29, 28 y 24 focos de incendio respectivamente, las que mayor número de ellos se encuentran en sus territorios; además de encontrarse entre las parroquias con mayor presencia de cobertura de vegetación natural y áreas seminaturales.

- Para establecer las áreas de concentración de focos de incendio, el radio de búsqueda circular de 2.000m produjo una cobertura *raster* de densidad *kernel* más generalizado y suave, con un valor máximo de 1,510 el cual fue normalizado al valor máximo de 1 y mínimo de 0.

- Las áreas de concentración a partir de los valores normalizados, fueron: baja (0 – 0,3), media (0,3 – 0,5) y alta (0,5 – 1). Siendo el valor de superficie de densidad más alto en la ubicación del punto y disminuye conforme aumenta la distancia desde el punto llegando a cero.

- Las áreas de concentración de focos de incendio alta y media corresponden a los relieves de montaña del cerro Catequilla, Cruz Loma, Ilaló, volcanes Atacazo, Casitahua y Pichincha; además las inmediaciones de zonas pobladas como Calacalí, Checa, Cumbayá, Iguñaro, El Naranjal, Guangopolo, Pimaya, Zámbriza y Nayón.

- **Puntos de observación y cuencas visuales para incendios forestales**

- Se determinaron 83 puntos de observación para la detección de incendios forestales, 58 de ellos establecidos como prioritarios y 25 opcionales; los primeros incluyen en sus polígonos de visibilidad áreas de concentración de focos de incendio catalogadas como alta y media; mientras que los otros intersecan con áreas de concentración catalogadas como bajas, y conjuntamente con los prioritarios tratar de cubrir la parte del DMQ.
- Las cuencas visuales generadas a partir de los puntos de observación cubren un área de 225.557,202 Ha, constituyendo el 53,30% del área total del DMQ que es de 423.157,745 Ha.

- **Lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales**

- Mediante la técnica de Evaluación Multicriterio y la utilización del Proceso Analítico Jerárquico (APH), se definieron criterios (variables) que se encuentran asociados a entidades geográficas (factores); todo esto, respecto a la identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales. Obteniéndose mediante el empleo de la escala Saaty como criterio dominante, la distancia a redes de distribución de agua con un peso de 1,668; mientras que el criterio menos influyente con un peso de 0,241 fue la distancia a áreas artificiales.

- La relación de consistencia obtenida en el modelo fue de cero, razón por la cual se lo considera coherente, al igual que los juicios de valor empleados en para su diseño.

- Con los criterios denominados como favorables y limitantes, considerandos para la estructuración de la regla de decisión mediante la Sumatoria Lineal Ponderada, se obtuvo un valor máximo de 1,489 y un valor mínimo de 1,206; los mismos que fueron normalizados a valores entre 1 y 0, para finalmente establecer como áreas óptimas las que presenten valores mayores a 0,95 que se encuentren dentro de las denominadas áreas protegidas del DMQ.

- **Predicción y probabilidad de incendios forestales con la metodología de Autómatas Celulares**
 - La utilización del software DINAMICA EGO para el desarrollo del modelamiento por Autómatas Celulares presenta varias ventajas, además de ser un software libre, muestra un análisis minucioso sirviéndose de pruebas estadísticas para demostrar la hipótesis planteada que en el caso presente, es averiguar escenarios donde se puedan mostrar y ubicar focos de incendio para el 2013, teniendo en cuenta las variables de influencia escogidas por los investigadores a partir de un estudio previo.

 - Para las variables estáticas y dinámicas, se trató de establecer su independencia, ya que si una variable estática muestra relación con la variable dinámica, se puede enmascarar u ocultar el desenvolvimiento natural de la variable en el modelamiento, siendo en el caso presente la variable focos de incendio.

- Las pruebas pareadas permitieron una mayor validez a las deducciones obtenidas para el control o eliminación de variables sospechosas en este estudio.
- Con la validación de las variables empleadas y la utilización de herramientas de DINAMICA EGO, se diseñó un modelo de ajuste por medio de épocas ya dadas; para ello en este estudio, fueron empleados los focos de incendio del año 2001 y 2009, a fin de alcanzar un ajuste óptimo para la simulación de incendios para el 2013.
- Las variables que mayor influencia ejercen para el modelo de probabilidad y simulación de incendios forestales son: áreas pobladas, pendiente y orientación del terreno, ríos y vías; mientras que las variables meteorológicas (humedad relativa, precipitación y temperatura) y combustibilidad que tienden a cero, no aportaran significativamente al modelamiento, sin embargo no fueron descartadas.
- El modelo de Autómatas Celulares indicó que en el año 2013 existirá un aumento en la ocurrencia de focos de incendio en el DMQ, cerca a los centros poblados y vías, determinando que la presencia de incendios forestales dentro del área de estudio son por causas antrópicas.
- Se obtuvo un ajuste del 46.57% en modelo de predicción y simulación de incendios forestales para el año 2013 con la técnica de Autómatas Celulares en el DMQ.

- El modelo de Autómatas Celulares indicó que en el año 2013 existirá un aumento en la ocurrencia de focos de incendio, esto se debe principalmente por causas antrópicas y el desarrollo urbanístico continuo del Distrito Metropolitano de Quito, también se tiene presente que las condiciones geomorfológicas del terreno como es la irregularidad del terreno o pendiente es de gran ayuda para la presencia de focos iniciales.

6.2 Recomendaciones

- Respecto a la distribución espacial de los focos de incendio, es necesario que sea corroborada con información de otras fuentes, tales como registros históricos, fotografías aéreas, imágenes satelitales, etc.; para que sirvan como insumo en la aplicación de diferentes metodologías y técnicas para la determinación de áreas de recurrencia a incendios forestales.
- Para el desarrollo de un modelo espacial, resulta importante tomar en cuenta el tipo de variables que van a intervenir en el mismo, ya sean variables con datos discretos o continuos. Además, si para el modelamiento sea necesario considerar sus cambios a largo plazo de manera gradual o de manera rápida en un breve período de tiempo.
- En la ubicación de puntos de observación para la detección de incendios forestales, es necesario tomar en cuenta a los medios tecnológicos como herramienta de monitoreo y registro en tiempo real de estos eventos. Uno de ellos es mediante la utilización de sensores fijos en áreas de vegetación natural, que

detecten fuentes de calor en zonas denominadas como críticas que permitan un constante seguimiento. La utilización de nuevas tecnologías permitirán cubrir mayor área del DMQ a cualquier hora del día, con datos actualizados y la disminución de horas hombre para la vigilancia de los incendios forestales.

- En cuanto a la identificación de lugares óptimos para la colocación de infraestructura de almacenamiento de agua para la mitigación de incendios forestales, es importante tomar en cuenta el medio para el cual será empleado, ya sea para la recarga de agua por medios terrestres o aéreos; con lo cual las variables y por ende el modelo a obtener diferirá.
- Para estudios de modelamiento y construcción de escenarios predictivos, es necesario tener variables con datos confiables y suficientes, ya que de ello dependerá el ajuste máximo que el modelo puede alcanzar.
- Se debe también utilizar otras metodologías destinadas al modelamiento y compararlas, puesto que de este modo se podrá escoger el que mayor confiabilidad muestre. Al igual que la utilización de otro software.
- Es necesario realizar otro tipo de modelos que incluyan como variable influyente el comportamiento del ser humano respecto a la generación de incendios forestales ya que la mayoría de ellos son intencionados.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, A., Carrillo, C., & Grageda, G. (2001). Autómatas Celulares para modelar usos de suelo urbano: una revisión del modelo de White. *Vetas*, 85-87.
- Aguiló, M. (1991). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología*. Madrid: Centro de Estudios de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente.
- Astudillo, T., & Huilcamaigua, S. (2011). *Utilización de autómatas celulares para modelar el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal y su comparación con técnicas alternativas. Caso de estudio: Sector comprendido entre agrícola Payamino y Callanayacu, provincia de Orellana*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente, Escuela Politécnica del Ejército, Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción: Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente, Sangolquí.
- Barba-Romero, S., & Pomerol, J. C. (1997). *Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica*. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá.
- Blanco, J., García, D., Castellnou, M., Molina, D., Grillo, F., & Pous, E. (2008). *Curso básico de incendios forestales*.
- Bomberos de Navarra. (2002). *Incendios forestales*. Recuperado el 20 de Febrero de 2013, de http://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/forestal2.pdf
- Bonilla, R. (2001). *Guía técnica en prevención y control de incendios forestales*. Guatemala: PROPETEN - Conservación Internacional.
- Bosque, J. (1992). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Rialp.
- Chuvieco, E., & Martín, M. d. (2004). *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid: Bouncopy S.A.
- Cuerpo de Bombreros del Distrito Metropolitano de Quito. (2012). *Plan de prevención y control de incendios forestales 2012*. Quito.
- Denham, M. (2009). *Predicción de la evolución de los incendios forestales guiada dinámicamente por los datos*. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, Escola d'Arquitectura de Computadors i Sistemes Operatius, Barcelona.

- Eastman, J. R., Kyem, P. A., Toledano, J., & Jin, W. (1995). *GIS and Decision Making*. (N. U. (UNITAR), Ed.)
- Ecuador Forestal. (23 de Julio de 2013). *Ficha Técnica No. 15 EUCALYPTUS GLOBULUS LABILL*. (M. Vinueza, Ed.) Recuperado el 30 de Julio de 2013, de Ecuador Forestal: <http://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-15-eucalyptus-globulus-labill/>
- El Comercio (a). (2 de Octubre de 2012). *El verano fue más seco que el del 2009*. (R. Quito, Ed.) Recuperado el 10 de Enero de 2013, de El Comercio: http://www.elcomerciodeecuador.es/quito/verano-seco_0_784121722.html
- El Comercio (b). (26 de Septiembre de 2012). *El eucalipto no propagó el fuego*. (I. Ponce, Ed.) Recuperado el 30 de Julio de 2013, de El Comercio: http://www.elcomerciodeecuador.es/sociedad/eucalipto-propago-fuego_0_780522079.html
- El Comercio (c). (21 de Septiembre de 2012). *17.484,56 hectáreas de bosques se han perdido por los incendios*. (E. Redacción, Ed.) Recuperado el 30 de Abril de 2013, de El Comercio: http://www.elcomerciodeecuador.es/pais/hectareas-bosques-perdido-incendios_0_778122295.html
- El Comercio (d). (26 de Octubre de 2012). *Únase a la reforestación de las laderas*. (R. Quito, Ed.) Recuperado el 31 de Enero de 2013, de El Comercio: http://www.elcomercio.com/quito/Quito-reforestacion-laderas_0_798520297.html
- El Comercio (e). (26 de Septiembre de 2012). *Se acaba la emergencia en Quito*. (R. Quito, Ed.) Recuperado el 25 de Enero de 2013, de El Comercio: http://www.elcomercio.com/quito/acaba-emergencia-Quito_0_781121923.html
- El Comercio (f). (27 de Septiembre de 2012). *La alerta cambió de naranja a amarilla*. (R. Quito, Ed.) Recuperado el 25 de Enero de 2013, de El Comercio: http://www.elcomercio.com/quito/alerta-cambio-naranja-amarilla_0_781122028.html [2013, Enero 2013].
- El Mundo. (15 de Junio de 2009). *El árbol que renace de sus cenizas*. (G. Catalán, Ed.) Recuperado el 30 de Julio de 2013, de El Mundo: <http://www.elmundo.es/elmundo/2009/06/15/ciencia/1245052931.html>
- ESRI (a). (2013). *Cómo funciona de topo a raster*. Recuperado el 3 de Febrero de 2013, de ArcGIS Resource Center: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z0000007m000000>

- ESRI (b). (2013). *Comprender el análisis de densidad*. Recuperado el 25 de Mayo de 2013, de ArcGIS Resource Center: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z0000000w000000/>
- ESRI (c). (2013). *Usar cuenca visual y puntos de observador para el análisis de visibilidad*. Recuperado el 3 de Junio de 2013, de ArcGIS Resource Center: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z0000000v8000000/>
- Estacio, J., & Narváez, N. (Marzo de 2012). Incendios forestales en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ): Conocimiento e intervención pública del riesgo. *Letras Verdes*(11), 27-52.
- FAO. (2006). *Fire management – global assessment 2006*. Roma: FAO Communication Division.
- FAO. (2010). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Franco Araque, A. (2008). Algunas técnicas para el análisis y la prevención ante riesgos naturales de incendios, deslizamientos e inundaciones. *Noveno Congreso Nacional del Medio Ambiente - Cumbre del Desarrollo Sostenible*.
- Fuentes, H. (2010). *Monitoreo de focos de calor y quemas en el Departamento de Pando 2010*. Pando: Herencia.
- Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Pichincha . (2012). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Pichincha 2015*. Quito.
- Gómez, M., & Barredo, J. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio*. Madrid: Alfaomega.
- Hutchinson, M. (1988). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *Third International Symposium on Spatial Data Handling*. Sydney.
- Hutchinson, M. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010). *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000*. Bogotá D.C.: Scripto Ltda.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (s.f.). *Fundamentos de Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 10 de Enero de 2013, de

http://corponarino.gov.co/pmapper-4.1.1/sig/interfase/documentos/introduccion_sig.pdf

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE). (2013). *Monitoreo de quemas e incendios*. Recuperado el 6 de Enero de 2013, de Preguntas frecuentes: Queimadas: <http://peassaba.cptec.inpe.br/queimadas/qmanova/faq.php>

Juárez, G. (Agosto de 2006). *Introducción a la simulación de procesos con autómatas celulares*. Recuperado el 10 de Mayo de 2013, de <http://2006.igem.org/wiki/images/1/1b/IntoCA.pdf>

Junta de Andalucía. (s.f). *Manual de formación para la lucha contra incendios*. Recuperado el 20 de Febrero de 2013, de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Estrategias_Ambientales/Planes/Incendios/Manual_de_formacion_para_la_lucha_contra_incendios.pdf

León, P., & Basurto, R. (24 de Agosto de 2008). *Introducción a los sistemas dinámicos y autómatas celulares*. Recuperado el 10 de Mayo de 2013, de http://uncomp.uwe.ac.uk/genaro/Papers/Veranos_McIntosh_files/SD.pdf

López, A. (26 de Agosto de 2011). *Introducción a la vida artificial y autómatas celulares*. Recuperado el 10 de Mayo de 2013, de http://uncomp.uwe.ac.uk/genaro/Papers/Veranos_McIntosh_files/vida_artificial_Miriam.pdf

Martín, J. (2002). *Manual del vigilante de incendios forestales*. Recuperado el 25 de Mayo de 2013, de Medio ambiente: Junta de Castilla y León: <http://www.jcyl.es/web/jcyl/binarios/816/147/manual%20vigilante%20red.pdf?blobheader=application%2Fpdf%3Bcharset%3DUTF-8&blobheadername1=Cache-Control&blobheadername2=Expires&blobheadername3=Site&blobheadervalue1=no-store%2Cno-cache%2Cmust-revalidate&blob>

MDMQ - Secretaría de Ambiente (a). (2011). *Agenda Ambiental de Quito 2011 - 2016*. Quito: Oleas Grafic.

MDMQ - Secretaría de Ambiente (b). (2011). *Memoria Técnica del Mapa de Cobertura Vegetal del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ)*. Quito: Manthra Editores.

MDMQ - Secretaría de Ambiente (c). (2012). *Los incendios forestales del DMQ: Herramientas de conocimiento e intervención pública*. Quito.

Moreno, A. (2008). *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica*. México D.F.: Alfaomega.

- Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales (MECN). (2009). *Ecosistemas del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Nuevo Arte.
- Ollero, A., Arrue, B. C., Martínez, J. R., & Murillo, J. J. (1999). Techniques for reducing false alarms in infrared forest - fire automatic detection systems. *Control Engineering Practice* 7, 123-131.
- Peredo, M., & Ramallo, R. (Diciembre de 2003). *Aplicación de autómatas celulares a simulación básica de incendios forestales (Tesis de Maestría)*. Universidad Católica Boliviana San Pablo, Cochapamba.
- REDDAF Consortium. (2012). *Report on Socioeconomic Drivers of Deforestation and Forest Degradation in Central African Republic*. REDDAF.
- Reyes Gómez, D. (2011). *Descripción y aplicaciones de los autómatas celulares*. Tesis para obtener la licenciatura en Matemáticas Aplicadas y Computación, Universidad Autónoma de Puebla, Departamento de Aplicación de Microcomputadoras, Puebla.
- RINAMED. (2003). *III Plan de defensa contra incendios forestales*. Recuperado el 12 de Mayo de 2013, de RINAMED: http://www.rinamed.net/docs/prof/incendios_balear/8_4_gravedad.pdf
- Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Madrid: Alianza.
- Saaty, T. (1997). *Toma de decisiones para líderes: el proceso analítico jerárquico, la toma de decisiones en un mundo complejo* (Vol. II). (M. Escudey, E. Martínez, & L. Vargas, Trads.) Rws Publications.
- Sánchez, R. (2001). *La toma de decisiones con múltiples criterios: un resumen conceptual y teórico*. Universidad Mayor de San Simón, Centro de Planificación y Gestión, Cochapamba.
- Soares, B., Rodrigues, H., & Costa, W. (2009). *Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinámica EGO*. Belo Horizonte: Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais.
- Tapia, G. (2008). *Diseño de un sistema de torres de detección de incendios forestales para la Región Metropolitana*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Forestal, Universidad de Chile, Departamento de Manejo de Recursos Forestales.
- Tobler, W. (1979). *Cellular Geography*. Recuperado el 8 de Abril de 2013, de División de Procesamiento de Imágenes (DPI) del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE):

[http://www.dpi.inpe.br/sil/CST310/Referencias/Tobler/Tobler_1979_Cellular Geog.pdf](http://www.dpi.inpe.br/sil/CST310/Referencias/Tobler/Tobler_1979_Cellular_Geog.pdf)

Torres, C. (2010). *Análisis de la cobertura de los puntos de vigilancia contra incendios forestales en Bogotá D.C.* Recuperado el 25 de Mayo de 2013, de Secretaría Distrital de Ambiente: Bogotá D.C.: http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=c0ee2387-f08a-4df7-8819-977e104a877b&groupId=10157

Voogd, H. (1983). *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. Londres.

Zárraga, J. (1990). *Los incendios forestales y las actitudes de la población de las comarcas afectadas*. Sevilla: Instituto Andaluz de Reforma Agraria.