

**Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía**

**E.T.S.I. Topografía, Geodesia y Cartografía**

**Desarrollo de un modelo espacio-temporal para la  
simulación del movimiento espontáneo de las personas  
mediante la creación de superficies de movimiento**

**Autor:**

Ana Maldonado Ibáñez, Ingeniero en Geodesia y Cartografía

**Directores de tesis:**

Dra. Monica Wachowicz, Doctora en Geografía

Dr. Antonio Vázquez Hoehne, Doctor en Geografía

Año 2010



## **AGRADECIMIENTOS**

Siempre que vea este tomo pensaré con gran cariño en mis directores de tesis, Monica Wachowicz y Antonio Vázquez, lo que dijese no bastaría para expresarles mi agradecimiento y la suerte que he tenido de poder andar con ellos este largo camino. Gracias a sus miles de aportaciones, ánimos y confianza en mí, y sobre todo por hacerme reescribir y repensar las ideas haciendo que se hagan más claras en mi cabeza.

También quiero agradecer a las personas que han contribuido con las lecturas de versiones preliminares, con sus comentarios y escuchándome en ensayos y presentaciones, ya que todas estas cosas han ido añadiendo grandes granitos de arena.

Muy importante ha sido para este trabajo todos los integrantes pasados y presentes del grupo Mercator y Latingeo, ya que con ellos empezó esta aventura y además han hecho que estos años hayan sido tan especiales y divertidos.

Un gran agradecimiento al proyecto GEOPKDD, por los datos de los visitantes al parque Dwingelderveld, gracias a los cuales he podido realizar la implementación.

Muchas gracias a Leo por sus deseos de que todo salga bien, por sus consejos, ánimos, y sobre todo por su optimismo contagioso, esencial para que un trabajo llegue a su fin.

Y finalmente muchas gracias a mi familia, mis hermanos y mis padres por su paciencia, por sus ánimos y preocupaciones por mí durante todo este tiempo, especialmente a mis padres ya que sin ellos no habría sido posible esta etapa ni las previas a ésta y por enseñarme a valorar el trabajo y el esfuerzo.



## Resumen

El presente trabajo de tesis trata la interacción existente entre una persona y su contexto espacio-temporal mientras se desplaza de forma espontánea (interactuando en cada instante con el entorno) buscando la trayectoria de mayor utilidad según sus preferencias. El objetivo principal del trabajo es modelar dicho comportamiento con el fin de obtener las predicciones más probables de las trayectorias producidas en un escenario, definido principalmente mediante las variables entorno, persona y tiempo.

Para materializar dicha interacción se han diseñado las “superficies de movimiento”, una de las aportaciones principales de la tesis, que representan los valores de utilidad del entorno a través de una superficie discreta de celdas. Las celdas de mayor utilidad son aquellas que ofrecen más probabilidad de paso a las trayectorias, ya que ejercen fuerzas de atracción proporcionales a sus valores de utilidad, fundamento basado en los modelos gravitacionales de accesibilidad. Por otro lado, la predicción de la trayectoria sobre la superficie de movimiento tiene su fundamento en las superficies de confluencia de flujo, consiguiendo materializar la analogía existente entre los desplazamientos de personas y el deslizamiento de fluidos. Puesto que estas superficies de movimiento son producto de dos componentes cambiantes con el tiempo (persona y entorno), se pueden considerar a su vez entidades dinámicas. Por un lado, la persona es susceptible a la componente temporal debido a los diferentes momentos en los que desarrolla la actividad finalidad del desplazamiento (fechas y horarios), la cual hace variar sus preferencias de desplazamiento. Por otro lado, el tiempo también afecta al entorno del desplazamiento a través de eventos que modifican sus características.

El trabajo describe la metodología que da lugar al modelo a lo largo de tres fases (abstracción, razonamiento y predicción) mediante la sinergia de fundamentos y técnicas variadas como modelos espacio-temporales, orientación a objetos y a eventos, evaluación multicriterio, medidas de utilidad y modelos gravitacionales. También muestra la implementación realizada mediante herramientas de formalización de conocimiento (Protégé y Jess) y mediante la elaboración de una aplicación Java que implementa el mecanismo del modelo, permitiendo realizar simulaciones a partir de un escenario real (desplazamientos de los visitantes al parque Dwingelderveld).

Por último muestra un mecanismo de descripción geométrica del movimiento resultante, que permitirá inferir relaciones inherentes a dicho movimiento.

## Abstract

This essay is focused in the interaction among a person and his spatio-temporal context which takes place during the spontaneous displacement of the person (interacting at every instant with the environment), when the person chooses the maximum utility trajectory according his preferences. The main objective is modelling such human behaviour in order to obtain the most probable trajectories going on in a specified scenario, which is mainly defined trough an environment, a person and a period of time.

One of the main contributions of this dissertation is the movement surface, which have been designed in order to materialise such interaction. They represent the utility value over an environment trough a discrete surface structured by cells. Due to the cells exert an attraction force proportional to its utility (fundament based in accessibility gravity models), the higher utility cells are the most probable ones of being part of the trajectory. The trajectory prediction over the movement surface has its fundament in the flow confluence surfaces, materializing the analogy existing between human displacements and flow of liquids. As this movement surfaces are the result of two components changing over time (person and environment), they are as well characterized by dynamicity. By one hand, the person is susceptible to the temporal dimension: the displacement preferences vary according to the moment (dates and schedules) when the activity finality of the displacement takes place. And by the other hand, time is also affecting the environment trough the events varying its characteristics.

This essay describes the methodology building up the model by the consecution of three phases (abstraction, reasoning and prediction) and using the synergy and techniques as varied as spatio-temporal models, object and event orientation, multicriteria evaluation, utility measures, and gravity models.

It also shows the implementation carried out through a knowledge formalization tool (Protégé & Jess), and trough a Java application implementing the model and allowing make simulations over a real scenario (displacements over Dwingelderveld Park).

Finally, it is shown a mechanism for describing the geometry of resultant movement, allowing inferring different relationships regarding to this movement.

# Índice

<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	1
1.1 Motivación.....	2
1.2 Antecedentes .....	4
1.3 Estado de la cuestión sobre superficies para cálculo de rutas .....	8
1.4 Breve introducción al planteamiento del modelo propuesto .....	10
1.5 Objetivos e interrogantes de investigación.....	12
<i>1.5.1 Objetivo general</i> .....	12
<i>1.5.2 Objetivos específicos</i> .....	12
<i>1.5.3 Interrogantes de investigación (“research questions”)</i> .....	13
1.6 Estructura de la tesis.....	13
<b>Capítulo 2. Fundamentos teóricos empleados y su integración en el modelo propuesto</b> .....	15
2.1 Introducción.....	16
2.2 Fases de modelado.....	18
<i>2.2.1 Fase 1: Abstracción</i> .....	18
<i>2.2.2 Fase 2: Razonamiento o entendimiento</i> .....	19
<i>2.2.3 Fase 3: Predicción</i> .....	19
<i>2.2.4 Fase 4: Planificación</i> .....	20
2.3 Modelos espacio-temporales .....	21
2.4 Modelo orientado a objetos y a eventos .....	24
<i>2.4.1 Definiciones previas</i> .....	24
<i>2.4.2 Modelos orientados a objetos</i> .....	26
<i>2.4.3 Modelos orientados a eventos</i> .....	26
<i>2.4.4 Integración entre objetos y eventos</i> .....	28
2.5 Modelos de gravedad.....	29
2.6 Medidas de utilidad .....	30

2.7 Evaluación multicriterio (EMC).....	33
2.8 Superficies de confluencia.....	34
2.9 Conclusiones .....	35
<b>Capítulo 3. Metodología</b> .....	<b>40</b>
3.1 Introducción.....	41
3.2 Primera fase: Abstracción .....	44
3.2.1 Clase Tiempo .....	47
3.2.2 Clase Evento .....	47
3.2.2.1 Clase Evento “Modifica” Clase Persona .....	48
3.2.2.2 Clase Evento “Modifica” Clase Entorno.....	49
3.2.2.3 Clase Evento “Activa” Clase Interacción.....	50
3.2.3 Clase Entorno .....	50
3.2.4 Clase Persona.....	51
3.2.5 Clase Preferencias.....	52
3.2.5.1 Ponderación.....	53
3.2.5.2 Función de utilidad.....	53
3.2.5.3 Matriz de preferencias.....	55
3.2.6 Clase Interacción .....	55
3.2.7 Clase Superficie de Movimiento .....	56
3.2.8 Clase Trayectoria .....	57
3.3 Segunda fase: Razonamiento.....	57
3.3.1 Construcción de la “función de interacción” .....	57
3.3.1.1 Utilización de las fuerzas de atracción .....	57
3.3.1.2 Medidas de utilidad basada en preferencias .....	57
3.3.1.3 Evaluación Multicriterio .....	58
3.3.2 Formulación de la función de interacción.....	58
3.3.3 Cálculo de utilidades sobre celdas .....	61
3.3.3.1 Ejemplo práctico de aplicación .....	62
3.3.4 Puntos de destino, puntos de paso y constreñimientos .....	65
3.4 Tercera fase: Predicción .....	68
3.4.1 Generación de superficies de movimiento .....	68
3.4.2 Predicción de la trayectoria .....	70

3.4.3 Predicción a partir de un escenario definido .....	71
3.4.4 Clasificación del modelo en cuanto al tipo de predicción .....	71
3.5 Conclusiones .....	72
<b>Capítulo 4. Implementación</b> .....	<b>75</b>
4.1 Introducción.....	76
4.2 Implementación de la fase de abstracción con Protégé .....	77
4.2.1 Breve descripción de Protégé .....	78
4.2.2 Formalización de las clases en Protégé .....	79
4.2.3 Formalización de reglas con Protégé.....	80
4.2.3.1 Implementación en el sistema experto Jess .....	81
4.2.3.2 Regla “tiempo” activa “eventos” .....	83
4.2.3.3 Regla “evento” modifica “entorno” .....	84
4.2.3.4 Regla “actividad” modifica “preferencias” .....	84
4.2.3.5 Función de Interacción .....	85
4.2.3.6 Validación de la función y reglas implementadas .....	85
4.3 Implementación de las fases de razonamiento y predicción en una aplicación Java .....	90
4.3.1 Uso de la aplicación por el usuario.....	93
4.4 Implementación del modelo sobre un escenario real .....	94
4.4.1 Clase Entorno .....	95
4.4.2 Clase Persona.....	98
4.4.3 Clase Preferencias.....	99
4.4.3.1 Preferencia por tipo de Vía.....	100
4.4.3.2 Preferencia por presencia de Vegetación .....	101
4.4.3.3 Preferencia por proximidad a Agua .....	101
4.4.3.4 Preferencia por cercanía de Pájaros .....	102
4.4.3.5 Preferencia por existencia de Atracciones.....	103
4.4.4 Clase Interacción .....	104
4.4.5 Clase Superficie de Movimiento .....	105
4.4.6 Clase Trayectoria .....	105
4.4.7 Clases Tiempo y Evento .....	106
4.4.7.1 Eventos que modifican a la clase Persona .....	106
4.4.7.2 Eventos que modifican a la clase Entorno.....	106
4.5 Conclusiones .....	107

<b>Capítulo 5. Resultados</b> .....	109
5.1 Introducción.....	110
5.2. Primer Caso .....	112
5.2.1 Superficie de utilidad parcial por tipo de vía .....	113
5.2.2 Superficie de utilidad parcial por vegetación.....	115
5.2.3 Superficie de utilidad parcial por agua .....	116
5.2.4 Superficie de utilidad parcial por presencia de pájaros.....	117
5.2.5 Superficie de utilidad parcial por atracciones.....	117
5.2.6 Obtención de la superficie de movimiento .....	118
5.2.6.1 Obtención de los pesos asociados a cada preferencia .....	119
5.2.6.2 Superficie de movimiento simulada .....	121
5.2.7 Predicción de la trayectoria .....	122
5.2.8 Modificación de superficie de movimiento por activación de eventos.....	124
5.2.8.1 Eventos que modifican el comportamiento de las personas .....	124
5.2.8.2 Eventos que actúan sobre las características del entorno .....	125
5.3 Segundo Caso .....	127
5.3.1 Superficie de utilidad parcial por tipo de vía .....	127
5.3.2 Superficie de utilidad parcial por vegetación y agua .....	128
5.3.3 Superficie de utilidad parcial por atracciones.....	128
5.3.4 Superficie de movimiento simulada .....	129
5.3.5 Predicción de la trayectoria .....	130
5.3.6 Modificación de superficie de movimiento por activación de eventos.....	131
5.3.6.1 Eventos que actúan sobre las características del entorno .....	131
5.4 Tercer Caso.....	132
5.4.1 Superficie de utilidad parcial por tipo de vía .....	133
5.4.2 Superficie de utilidad parcial por atracciones.....	134
5.4.3 Superficie de movimiento simulada .....	134
5.4.5 Predicción de la trayectoria .....	136
5.4.6 Modificación de superficie de movimiento por activación de eventos.....	136
5.4.6.1 Eventos que actúan sobre las características del entorno .....	136
5.5 Discusión de los resultados .....	137
5.5.1 Comparación de las trayectorias.....	137

5.5.2	<i>Contraste de trayectoria real sobre superficie de movimiento</i>	139
5.5.3	<i>Variabilidad de la trayectoria: difluencias</i>	140
5.6	Evaluación del modelo	142
5.7	Conclusiones	143
	<b>Capítulo 6. Descripción geométrica del movimiento resultante</b>	145
6.1	Introducción	146
6.2	Metodología	150
6.2.1	<i>Formalización del movimiento mediante una función tridimensional que representa la trayectoria espacio-temporal</i>	151
6.2.2	<i>Definición de primitivas espacio-temporales que representan contextos espacio-temporales</i>	157
6.2.3	<i>Definición de relaciones inherentes al movimiento</i>	160
6.3	Ejemplo de cálculo	165
6.3.1	<i>Desagregación del movimiento en base a eventos</i>	165
6.3.2	<i>Construcción de la función 3D espacio temporal</i>	167
6.3.3	<i>Consultas sobre el movimiento mediante álgebra lineal</i>	169
6.4	Aplicación al movimiento obtenido de superficies de movimiento	172
6.5	Conclusiones	174
	<b>Capítulo 7. Conclusiones</b>	176
7.1	Introducción	177
7.2	Resumen del trabajo de tesis	178
7.3	Conclusiones tras el desarrollo del modelo	182
7.4	Ventajas y limitaciones del modelo	186
7.4.1	<i>Limitaciones</i>	186
7.4.2	<i>Ventajas</i>	186
7.5	Aplicaciones del modelo	188
7.6	Posibles líneas de investigación futuras	189
	<b>Anejo I. Glosario</b>	191

<b>Anejo II. Implementación de clases, objetos y reglas en Protégé y Jess.....</b>	<b>195</b>
<b>Anejo III. Encuesta a los visitantes del parque Dwingelderveld.....</b>	<b>202</b>
<b>Anejo IV. Implementación en Java.....</b>	<b>205</b>
<b>Anejo V. Resultados con variación de pesos de preferencias .....</b>	<b>208</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>211</b>

## Lista de figuras

Figura 1: Comparación de superficie de movimiento con superficies de costos .....	10
Figura 2: Conexión entre fases y fundamentos .....	17
Figura 3: Fases en el modelado de fenómenos.....	20
Figura 4: Trayectoria espacio-temporal (Miller, 2004).....	23
Figura 5: Prisma espacio-temporal (Miller, 2004) .....	23
Figura 6: Activación desencadenada de eventos .....	27
Figura 7: Ejemplo de delimitación de estados por eventos .....	28
Figura 8: Fuerzas de atracción debidas a la utilidad .....	30
Figura 9: Intercambio de beneficio y coste en los desplazamientos .....	31
Figura 10: Utilidad de un entorno en función de las preferencias de cada persona ...	32
Figura 11: Inclusión de Clase Evento en el modelo .....	37
Figura 12: Fundamentos de partida para conceptualizar el movimiento.....	38
Figura 13: Obtención de la función de movimiento.....	38
Figura 14: Apoyo en la superficie de confluencia de flujo para simular el movimiento. ....	39
Figura 15: Sucesión de fases para la construcción del modelo .....	43
Figura 16: Clases y relaciones resultantes de la abstracción.....	44
Figura 17: Función temporal de variación del atributo “Velocidad de paso de un individuo” debida a la aparición de eventos .....	49
Figura 18: Función de variación del atributo “Temperatura” debida a la aparición de eventos.....	49
Figura 19: Fuerzas de atracción por la activación de interacción entorno-persona provocada por eventos basados en actividades .....	50
Figura 20: la variación de atributos del entorno ocasionadas por eventos genera diferentes estados en el entorno .....	51
Figura 21: Modificación de atributos de persona con el tiempo y con ellos preferencias de desplazamiento.....	52
Figura 22: Funciones de utilidad en las preferencias para ir a pasear en el momento t1 .....	54

Figura 23: Variación temporal de las preferencias .....	54
Figura 24: Fuerzas de atracción producidas por la interacción persona-entorno .....	55
Figura 25: Variaciones de la Superficie de Movimiento por la aparición de eventos sobre el entorno y por modificación de la actividad .....	56
Figura 26: Obtención de la función de interacción .....	61
Figura 27: Función de utilidad por tipo de suelo.....	62
Figura 28: Función de utilidad por humedad .....	63
Figura 29: Función de utilidad por tipo de suelo.....	63
Figura 30: Atributos de entorno.....	64
Figura 31: Valores atributos celda A .....	64
Figura 32: Utilidad debida a proximidad a los puntos de destino .....	66
Figura 33: Utilidad debida a proximidad a los puntos de paso .....	66
Figura 34: Zonas de atracción negativas o constreñimientos.....	67
Figura 35: Discurso del agua por una superficie buscando las mayores pendientes..	69
Figura 36: Analogía entre flujo y trayectoria .....	69
Figura 37: Extracción de la trayectoria buscando las máximas utilidades en la superficie de movimiento .....	70
Figura 38: Cálculo de la trayectoria mediante la sucesiva búsqueda de valores máximos de utilidad en la superficie de movimiento .....	70
Figura 39: Visualización en Jambalaya de la implementación en Protégé.....	80
Figura 40. Marco de los sistemas expertos.....	81
Figura 41: Relaciones entre Persona, Entorno, Tiempo y Superficie de movimiento	82
Figura 42: Esquema de la regla de “Tiempo activa eventos” para eventos relacionados con el entorno.....	83
Figura 43: Esquema de la regla de “Tiempo activa actividad” para eventos relacionados con actividades.....	84
Figura 44: Obtención de valores de utilidad en superficies definidas por varios escenarios .....	89
Figura 45: Interfaz de la aplicación Java a partir de las clases del modelo.....	91
Figura 46: Pasos de actuación de la aplicación .....	92

Figura 47: Visualización de superficies de utilidad parcial y superficie de movimiento por la aplicación.....	92
Figura 48: Ejemplo de uso de la interfaz por el usuario.....	93
Figura 49: Mapa de usos del suelo en el parque Dwingelderveld.....	95
Figura 50: Panorámica del parque.....	96
Figura 51: Mapa topográfico del parque.....	96
Figura 52: Foto del parque Dwingelderveld.....	97
Figura 53: Foto del parque Dwingelderveld.....	98
Figura 54: Unificación de las distintas medidas en una única medida de utilidad.....	99
Figura 55: Ejemplo de función de utilidad por tipo de vía.....	100
Figura 56: Ejemplo de función de utilidad por vegetación.....	101
Figura 57: Función de utilidad por proximidad a masas de agua.....	102
Figura 58: Ejemplo de función de utilidad para un visitante que desea ver pájaros	103
Figura 59: Ejemplo de función de utilidad para un visitante que desea visitar una atracción.....	104
Figura 61: Simbolización del valor de utilidad utilizado en lo sucesivo.....	114
Figura 62: Evaluación por tipo de vía.....	114
Figura 63: Superficie de utilidad por tipo de vía calculada para el caso 1.....	115
Figura 64: Superficie de utilidad por vegetación calculada para el caso 1.....	116
Figura 65: Superficie de utilidad por agua calculada para el caso 1.....	116
Figura 66: Superficie de utilidad por pájaros calculada para el caso 1.....	117
Figura 67: Superficie de utilidad por atracciones calculada para el caso 1.....	118
Figura 68: Cálculo de la superficie de movimiento como suma ponderada de las superficies de utilidad parcial.....	118
Figura 69: Superficie de movimiento obtenida para el caso 1.....	121
Figura 70: Superficie virtual obtenida con Surfer a partir de valores de utilidad (Superficie de movimiento).....	122
Figura 71: Trayectoria simulada para el caso 1.....	123
Figura 72: Superposición trayectorias prevista y observada para el caso 1.....	123

Figura 73: Variación de puntos de atracción en diferentes eventos basados en actividades humanas.....	125
Figura 74: Superficie de movimiento correspondiente al evento “persona se va del parque” para el caso 1 .....	125
Figura 75: Activación del evento “cierre vía tipo 1” .....	126
Figura 76: Superficie de movimiento correspondiente al evento “Cierran vías tipo anchas” calculada para el caso 1 .....	126
Figura 77: Utilidad parcial por tipo de vías calculada para el caso 2.....	127
Figura 78: Utilidad parcial por atracciones visitadas en el caso 2. ....	128
Figura 79: Superficie de movimiento calculada para el caso 2.....	129
Figura 80: Superficie virtual obtenida con Surfer a partir de valores de utilidad ....	130
Figura 81: Trayectoria simulada y observada para el caso 2.....	130
Figura 83: Superficie de movimiento y trayectoria correspondientes al evento “Cierran radiotelescopio” calculada para el caso 2.....	132
Figura 84: Superficie de utilidad por tipo de vía calculada para el caso 3.....	133
Figura 85: Superficie de utilidad por atracciones visitadas para el caso 3.....	134
Figura 86: Superficie de movimiento calculada para el caso 3.....	135
Figura 87: Superficie virtual obtenida con Surfer a partir de valores de utilidad ....	135
Figura 88: Superposición de trayectorias simulada y observada para el caso 3.....	136
Figura 89: Superficie de movimiento tras activar el evento “Cierran radiotelescopio” en el caso 3 .....	137
Figura 90: Proceso de evaluación del modelo.....	138
Figura 91: Contraste entre superficie de movimiento obtenida y trayectoria real ...	139
Figura 92: Trayectoria versus flujo en situaciones de grandes y pequeñas variaciones de superficie. Imágenes de flujo obtenidas de Berry, (2007).....	141
Figura 93: Difluencias en la trayectoria simulada en zonas de valores homogéneos de densidad.....	142
Figura 94: Representación de relaciones espacio-temporales.....	147
Figura 95: Correspondencia de punto-eventos en análisis de rectas y eventos temporales durante el movimiento de una persona.....	149
Figura 96: Variación de la posición de un cuerpo debida a un movimiento.....	151

Figura 97: Posición final después del movimiento .....	152
Figura 98: Posición final después del movimiento. ....	152
Figura 99: Eventos modificando estado del movimiento .....	154
Figura 100: Agregación de eventos que generan y modifican el movimiento de un cuerpo .....	154
Figura 101: Trayectoria espacio-temporal (Miller, 2004).....	155
Figura 102: Función temporal para el movimiento de un coche mediante ecuaciones de rectas que pasan por parejas de sub-eventos consecutivos.....	156
Figura 103: Primitivas de partida para la construcción de primitivas espacio- temporales .....	158
Figura 104: Primitivas espacio-temporales propuestas .....	159
Figura 105: Relaciones inherentes al movimiento a partir de primitivas espacio- temporales y trayectoria espacio-temporal.....	161
Figura 106: Intersección de cara instantánea y función de movimiento .....	162
Figura 107: Intersección de nodo instantáneo con función de movimiento.....	163
Figura 108: Intersección de funciones de movimiento con cara instantánea y con cara temporal.....	164
Figura 109: Intersección de dos funciones de movimiento.....	164
Figura 110: Posiciones recorridas por el cuerpo en movimiento .....	167
Figura 111: Movimiento del cuerpo expresado como una función en tres dimensiones .....	168
Figura 112: Obtención de posición $x,y$ asociada a un momento $t$ .....	170
Figura 113: Intersección del movimiento de dos personas .....	171
Figura 114: Trayectoria obtenida para el visitante el caso 1 .....	172
Figura 115: Representación del movimiento en 2 y en 3 dimensiones .....	173
Figura 116: Intersección del movimiento de los dos visitantes.....	174
Figura 117: La inclusión de preferencias permite la determinación de la trayectoria. .....	187
Figura 118: Esquema de comunicación de la aplicación.....	205
Figura 119: Posibles peticiones a la aplicación.....	206
Figura 120: Esquema de resultados expuestos .....	208

Figura 121: Variación trayectoria por variación pesos .....	208
Figura 122: Variación acusada de trayectoria por variación pesos .....	209
Figura 123: Variación de predicción .....	209
Figura 124: Ejemplo de variación de predicción.....	210
Figura 125: Resultado con variación de pesos .....	210

## Lista de tablas

Tabla 1: Clase resultantes de la abstracción .....	45
Tabla 2: Definición de los distintos tipos de relaciones .....	46
Tabla 3: Relaciones entre las anteriores clases abstraídas .....	46
Tabla 4: Ponderación de preferencias para ir a pasear .....	53
Tabla 5: Ejemplo de matriz de preferencias .....	55
Tabla 6: Comparativa de funciones .....	60
Tabla 7: Matriz de preferencias para la finalidad “recolectar setas” .....	63
Tabla 8: Preferencias sobre características de entorno según actividad a realizar .....	87
Tabla 9: Valores de características de entorno según eventos actuantes .....	87
Tabla 12: Tipos de relaciones y posibles consultas .....	161
Tabla 13: velocidad y dirección para el cuerpo del escenario .....	166
Tabla 14: Coordenadas del la posición del cuerpo en cada evento: .....	166
Tabla 15: Puntos de inflexión en la función espacio-temporal .....	168
Tabla 16: Ecuaciones de recta por cada pareja de eventos .....	169
Tabla 17: Función de movimiento de persona B .....	170
Tabla 18: Respuestas extraídas de la encuesta .....	203

## **Capítulo 1. Introducción**

---

Esta investigación se enmarca en el dominio del comportamiento humano, concretamente en el correspondiente a la interacción con el marco geográfico producida durante el desplazamiento de una persona (nivel operacional). En este capítulo de introducción, tras mostrar la motivación de la investigación realizada, se expondrán los antecedentes considerados en otros estudios de desplazamiento humano, describiendo posteriormente las bases en las que nos hemos apoyado para poder cumplimentar los objetivos perseguidos en esta tesis.

---

## **1.1 Motivación**

El estudio del comportamiento humano sobre un contexto geográfico, especialmente el relativo a sus desplazamientos, ha sido de gran interés a lo largo de la historia en investigaciones de geógrafos, urbanistas, planificadores o tomadores de decisiones. Esto no es de extrañar si tenemos en cuenta que dicho estudio encuentra un amplio abanico de posibilidades de aplicación, como por ejemplo, la ayuda en la planificación de ciudades, de tráfico y transporte, la prevención de desastres en aglomeraciones, el diseño de facilidades para viandantes o incluso la localización de servicios destinados a consumidores. Como consecuencia de este interés comprobamos la existencia de numerosas investigaciones a las cuales nos referiremos con mayor detalle en el epígrafe 1.2 de antecedentes.

El amplio rango de escalas con las que se puede considerar los desplazamientos de las personas, ya sea en su dimensión espacial, temporal o de nivel de agregación (número de personas), produce una diversidad de

investigaciones sobre este tipo de fenómenos. Por ello encontramos estudios tan diversos como los relativos a movimientos colectivos correspondientes a migraciones (Pellegrini & Fotheringan, 2002) o invasiones históricas (Andrienko et al., 2007), o estudios de los de desplazamientos para ir al lugar de trabajo (Uboe, 2001) o de movimientos a pie por las ciudades o interiores a edificios públicos (Batty et al., 1998), (Schelhorn et al, 1999) o con motivos recreacionales (de Frutos, 2004). De esta gran cantidad de estudios se han derivado varios modelos capaces de explicar y predecir desplazamientos de personas, de lo que se deduce que no estamos ante fenómenos aleatorios sino, en cierta medida, predecibles y modelables.

En efecto, pese a la apariencia caótica o aleatoria del fenómeno de los desplazamientos humanos, tras su observación reiterada encontramos ciertos patrones de comportamiento que nos van a permitir hacer previsiones sobre ellos. Si analizamos la persona sujeto del desplazamiento, sus características personales, el entorno y el momento en que se encuentra, comprobamos que existe una relación causa-efecto que gobierna cada desplazamiento: una persona elegirá su alternativa de recorrido en función de las características del medio que la rodea y sus requisitos o preferencias personales en ese momento.

No se ha encontrado ningún modelo que simule trayectorias considerando las preferencias y necesidades de una persona en un momento y marco geográfico concreto. La principal motivación de esta tesis ha sido la posibilidad de generar un modelo cuyo fundamento marque la diferencia con los ya existentes en la interacción de las componentes espacio, tiempo y preferencias individuales para realizar previsiones de desplazamiento humano.

Un modelo planteado de esta manera, es decir, orientado a la individualización de desplazamientos según características y circunstancias espacio-temporales de una persona, se encuentra en la línea de evolución de los modelos de desplazamiento, ya que la tendencia de éstos es a la búsqueda de una mayor individualización de estos fenómenos. Los modelos tradicionales representaban movimientos asociados a un gran nivel de agregación (movimientos colectivos) y no eran capaces de dar respuesta a experiencias más individuales o personalizadas. En el momento actual de desarrollo de estos modelos, la tendencia imperante es la de contemplar el fenómeno desde un menor nivel de agregación, teniendo en cuenta las actividades personales y sus constreñimientos temporales,

punto en el que se encuentra el modelo que propone esta tesis. Este análisis se ha conseguido en gran medida integrando fundamentos metodológicos empleados en otros modelos, a veces muy dispares.

Otro aspecto que ha motivado la realización de esta tesis ha sido conseguir elaborar un modelo espacio-temporal que represente y formalice la dimensión relativa al tiempo y sus cambios asociados mediante la generación de eventos, y comprobar su funcionamiento mediante la aplicación al modelado de los desplazamientos.

Y por último, en la perspectiva de la similitud existente entre el desplazamiento de personas y el flujo de líquidos sobre una superficie (Henderson, 1971; 1974), (Batty et al., 1998), (Helbing et al, 2001) se ha planteado en esta tesis la creación de “superficies de movimiento” para simular dichos desplazamientos, convirtiéndose en una de las principales aportaciones de esta investigación.

## 1.2 Antecedentes

En la literatura sobre desplazamiento humano destacan los conocidos modelos de accesibilidad, que evalúan la facilidad de acceso a determinadas localidades desde otras situadas a cierta distancia. A pesar de que la accesibilidad ha existido desde los principios de la historia, apareciendo por primera vez durante la elección de los asentamientos de las primeras civilizaciones, su concepto no surge hasta principios de 1950, a partir de cuando ha sido muy utilizada en conceptos de planificación de transporte. Prueba de ello son las numerosas investigaciones sobre accesibilidad, y sus indicadores, aplicadas a la planificación de infraestructuras de transporte (Monzón, 1988). También se ha encontrado su aplicación al análisis de la capacidad que tienen los peatones para acceder a diversas localizaciones, como por ejemplo a una red de metro (Puebla et al., 2000), o a una red de centros de salud (Puebla et al., 2002).

Debido a la gran variedad de acepciones que recibe la accesibilidad, hay muchas perspectivas bajo las cuales definir y medir este concepto: enfoque infraestructural, enfoque geográfico, de potencial de oportunidades, basado en utilidad, y un enfoque más reciente que es el orientado al individuo (López, 2007).

De entre estas múltiples maneras de medir la accesibilidad, esta investigación está apoyada en la medida basada en la utilidad, según la cual una

persona se desplaza para obtener un beneficio de manera que el coste derivado de ese desplazamiento sea mínimo. Un estudio más a fondo sobre esta manera utilitaria de concebir la accesibilidad nos ha conducido a unos modelos probabilísticos más antiguos empleados por los geógrafos para la modelización y predicción del comportamiento humano en su elección de distintas alternativas. Estos modelos buscan la alternativa de mayor probabilidad elegida por una persona mediante la búsqueda de la maximización de utilidad de las diferentes alternativas (Timmermans et al. 1982). En esto se basan los llamados análisis de preferencias (o “conjoint analysis”), que consisten en medir las preferencias de las personas para predecir su elección más probable en distintos escenarios (Timmermans et al. 1984). La fórmula (1) que emplean estos modelos para medir las preferencias mediante valores de utilidad es uno de los fundamentos de la metodología del modelo propuesto en esta tesis (Dijkstra, & Timmermans, 1997a; 1997b; 1998):

$$U_i = \sum_n x_j \tag{1}$$

Donde,

- $U_i$  es la utilidad total por la alternativa  $i$
- $x_j$  es la utilidad parcial producida por el atributo  $j$
- $n$  es el número de atributos que caracterizan la alternativa  $i$

En definitiva, estos modelos predicen la alternativa que elegiría un usuario mediante el cálculo de utilidad que le ofrece en función de valores de atributos de todas las alternativas posibles. Aunque son aplicables para la elección de cualquier producto o servicio, especialmente se usan en elecciones relacionadas con localizaciones geográficas.

Volviendo a los modelos de accesibilidad propiamente dichos, que ya no están tan relacionados con los procesos de decisión tomados por el individuo como lo anteriores, decíamos que había varios enfoques que permiten representar las previsiones de los desplazamientos. En el modelo propuesto nos hemos apoyado concretamente en los modelos gravitacionales, que representan los desplazamientos mediante fuerzas de atracción existentes entre las distintas localidades, siendo estas fuerzas producidas por la suma total de oportunidades o beneficios que se ofrecen entre ellas. Según Fotheringham y Heynes (1984)

podemos definir el movimiento como el resultado de un proceso de interacción espacial-comportamiento social (desplazamiento al trabajo, fenómeno de migración, asistir a un evento), siendo los modelos gravitacionales los más usados en este tipo de interacción.

Estos modelos inspirados en la física newtoniana, representan los desplazamientos mediante fuerzas de atracción existentes entre las distintas localidades, siendo estas fuerzas producidas por la suma total de oportunidades o beneficios que se ofrecen entre ellas (Frutos, 2004).

Fueron originariamente formulados por Hansen (1959), sufriendo diversas modificaciones o adaptaciones en función del indicador de accesibilidad usado. Una de estas modificaciones es la fórmula (2), mediante la cual estos modelos calculan la accesibilidad basada en el cálculo de potencial de oportunidades, que calcula la accesibilidad proporcionalmente al conjunto de beneficios que contiene e inversamente proporcional a la distancia a cada uno:

$$A_i = \sum_j O_j \cdot f(c_{i,j}) \quad (2)$$

Donde,

- $A_i$  es la accesibilidad en una localización origen  $i$
- $f(c_{ij})$  es la fricción por distancia del punto de origen  $i$  al punto de destino  $j$ .
- $O_j$ : es el número de oportunidades o actividades relevantes en la zona de destino  $j$ . Es la ponderación que recibe la atracción de la localidad  $j$ .

Esta medida es una forma del “modelo de gravedad” donde los atractores son las oportunidades en  $j$  y la distancia ejerce una impedancia a la atracción inversamente proporcional a la distancia  $c_{ij}$ .

Como hemos dicho anteriormente, los “modelos de gravedad” razonan por analogía con la física newtoniana ya que su base se encuentra en la teoría de la gravitación universal cuya fórmula (3) fue enunciada por Newton en el año 1671 (Frutos, 2004):

$$F = \frac{G \cdot (m \cdot m')}{d^2} \quad (3)$$

Donde  $F$  expresa la fuerza de atracción entre dos masas  $m$  y  $m'$  separadas una distancia  $d$ .

Encontramos la aplicación de estos modelos gravitacionales en el estudio de varios desplazamientos, como el de ir al trabajo (Uboe, 2001), el relativo a visitar un parque con motivo recreacional o también desplazamientos de grandes masas, como los migratorios, en varios estudios desde el pionero Ravestein (1885) a Pellegrini y Fotheringan (2002). Sin embargo los modelos de accesibilidad tradicionales, que han dado respuesta a grandes desplazamientos de personas, acusan la dificultad de hacerlo en casos más individuales donde es preciso considerar preferencias y horarios de personas concretas (Kwan & Weber, 2003).

Aparte de estos modelos de accesibilidad, existen otros modelos que también han contribuido en gran medida en la investigación llevada a cabo en esta tesis, como los existentes para modelar trayectorias realizadas por los peatones. Estos modelos tienen mayor capacidad que los anteriores para considerar las respuestas individuales de cada persona durante el fenómeno del desplazamiento. La mayoría coincide en considerar al sujeto/sujetos del desplazamiento como un agente decisor y autoorganizado que elige su trayectoria mediante la búsqueda de la maximización de la utilidad recibida.

Como ejemplos de modelos de sujetos autoorganizados, encontramos en el modelo de Batty et al (1998) una simulación del movimiento en el que cada individuo se organiza en términos de cinco componentes: movimiento en dirección de la localización más atractiva, elusión de obstáculos, movimiento hacia delante, umbrales que generan congestión, e influencia del movimiento de otras personas. También Hoogendoorn (2004) ofrece su contribución a este tipo de modelos en la que asume a los sujetos como “controladores adaptados”, los cuales minimizan su coste subjetivo de desplazamiento teniendo en cuenta sus objetivos y aptitudes personales.

En este tipo de modelos la elección de la ruta escogida durante el desplazamiento está fuertemente condicionada por la maximización de la utilidad recibida por el individuo. Así encontramos estudios como el de Hoogendoorn y Bobby (2002), que ofrecen una simulación de optimización en elección de rutas y áreas de actividad, así como de planificación horaria basándose en la asunción de que los peatones optimizan la utilidad recibida al desarrollar actividades en ciertas localidades teniendo en cuenta el coste por distancia. O en el que ofrecen un

acercamiento al modelado de peatones mediante la premisa de que los sujetos eligen la alternativa de máxima utilidad partiendo de sus preferencias personales. (Hoogendoorn & Bovy, 2005). También el estudio de Kitazawa y Batty (2004), en el que proponen un modelo cuya ruta se corresponde con la de máxima utilidad teniendo en cuenta diversos factores aparte de la distancia.

Dentro de este tipo de modelos encontramos una clasificación de los niveles de elección a los que se enfrenta la persona durante su desplazamiento (Hoogendoorn et al., 2001), (Hoogendoorn & Bovy, 2004), (Steiner et al., 2007):

- Nivel estratégico: Representa la elección realizada previamente al desplazamiento, durante la cual la persona determina las actividades a realizar, la secuencia de su realización y la hora de partida.
- Nivel táctico: Durante este nivel de elección, realizado también a priori, se llevan a cabo las labores de planificación de hora y áreas de las distintas actividades y la programación de rutas.
- Nivel operacional: Representa el comportamiento realizado “*in situ*” por la persona al desplazarse, describe el movimiento físico mientras interacciona con el entorno.

El modelo propuesto en esta tesis se enfrenta al tercero de estos tres niveles, ya que propone la previsión de desplazamiento realizado por una persona en un momento dado durante su interacción con un entorno determinado, circunstancias que corresponden a lo que cabe definir como movimiento espontáneo.

### **1.3 Estado de la cuestión sobre superficies para cálculo de rutas**

Debido a que en el modelo planteado se propone el cálculo de rutas a partir de superficies (las superficies de movimiento), se considera importante hacer una referencia sobre el estado de la cuestión en la obtención de rutas a partir de otro tipo de superficies, las superficies de costos, con el fin de matizar diferencias con la metodología propuesta.

Una superficie de costos es una superficie ráster en la que cada celda contiene el valor del costo (ej. dinero, tiempo, energía) que conlleva atravesar la zona representada en esa celda. Por lo tanto el costo representa la fricción o impedancia al movimiento sobre las celdas del entorno. A partir de esta superficie

---

se pueden calcular trayectorias de coste mínimo. Douglas (1994) calcula la superficie de costos acumulados asignando el valor de cada celda como el costo mínimo acumulado desde la celda de origen, a partir de lo cual genera líneas de pendiente que son las rutas de coste mínimo.

La obtención del camino óptimo sobre estas superficies de costos tiene una solución basada en la analogía con la refracción de la luz en un medio óptico: la ruta de coste mínimo sobre una superficie de costos se asimila a la trayectoria de la luz atravesando medios de distinto índice de refracción. Es decir, de igual manera que los distintos medios ópticos desvían los rayos de luz en función de su índice de refracción, en las superficies de costes las distintas zonas desvían las rutas en función de la fricción de cada zona. (Warntz 1957, 1965). Hay varios algoritmos que permiten calcular el costo de movimiento de un punto a otro a través de un campo de fricción, siendo uno de los más usados el de Dijkstra (1959). Las operaciones focales de modelado cartográfico, concretamente, las de vecindad extendida, permiten aplicar estos algoritmos sobre superficies ráster cuyas celdas tengan valores de costos y por lo tanto nos permitan obtener las rutas de costo mínimo (Tomlin, 1990).

En definitiva, en las superficies de coste las distancias de desplazamiento son medidas mediante una función de coste, que dependiendo del aspecto a considerar se traduce en kilómetros recorridos, tiempo empleado, o dinero gastado en el desplazamiento. Sin embargo, en las superficies de movimiento propuestas en este trabajo, el coste se corresponde con el incumplimiento de las preferencias de la persona sobre las características del entorno.

Como muestra la figura 1, al igual que la superficie de costos, caracterizada por valores de costo de desplazamiento, proporciona trayectorias de coste mínimo, la superficie de movimiento caracterizada por valores de utilidad, proporciona trayectorias de máxima utilidad.

Debido a que la superficie de movimiento está calculada mediante los valores de utilidad correspondientes a un escenario definido por una persona y un entorno en un momento dado, la trayectoria obtenida tiene carácter predictivo para ese escenario, representando el movimiento espontáneo realizado por la persona.

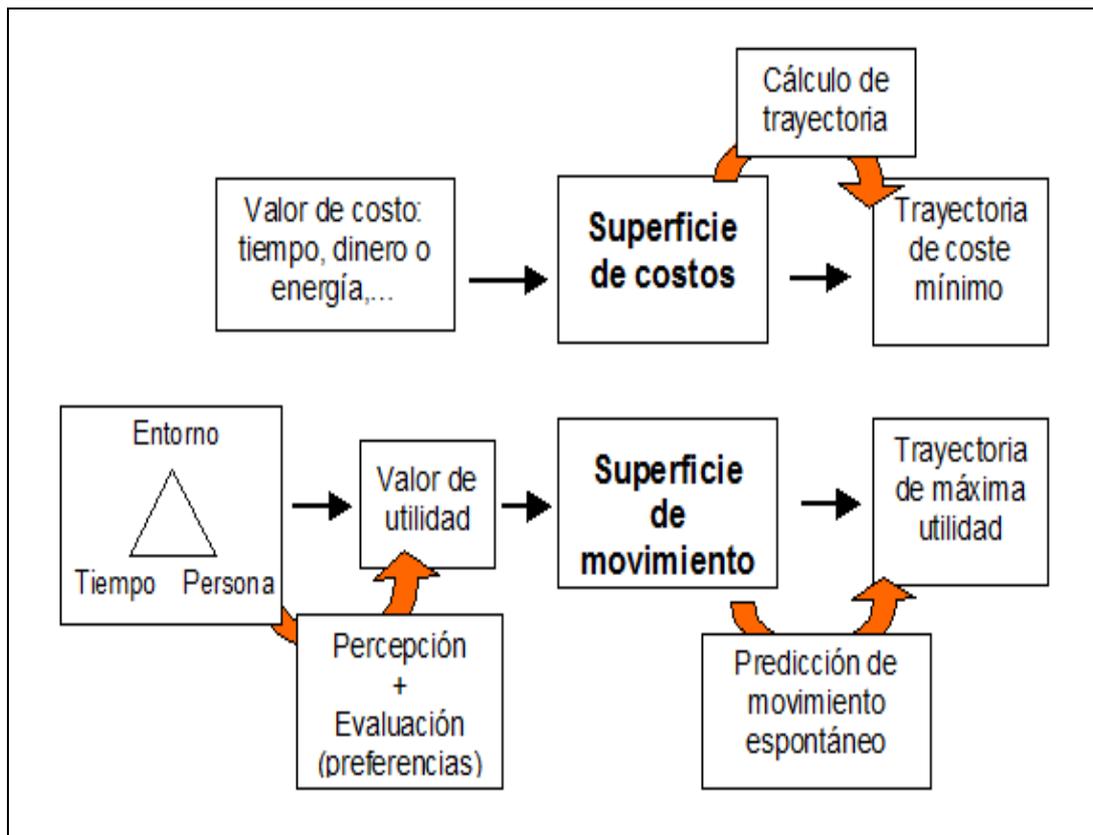


Figura 1: Comparación de superficie de movimiento con superficies de costos

A parte de diferir el significado de las superficies de movimiento con las superficies de costos, también difiere enormemente la construcción de éstas, ya que para su conceptualización se ha usado una convergencia de varias metodologías como las empleadas en modelos de accesibilidad o las empleadas en modelos de trayectorias para peatones.

## 1.4 Breve introducción al planteamiento del modelo propuesto

Una vez revisados los antecedentes de investigación en desplazamientos de personas, en este epígrafe vamos a ofrecer una breve introducción del modelo propuesto, lo que nos permitirá comprender mejor los objetivos de esta tesis, descritos en el siguiente epígrafe 1.4 de objetivos e interrogantes.

El modelo propuesto se basa en analizar la persona o personas sujeto del desplazamiento, sus características personales, el entorno y el momento en que se encuentran, comprobando que existe una relación causa-efecto que gobierna su desplazamiento. Se basa en el enfoque de Antonini (2005), que considerando la

---

persona como un “tomador de decisiones racional”, elegirá su alternativa de recorrido en función de las características del medio que la rodea y sus necesidades o preferencias personales en ese momento. Durante el desplazamiento, la persona evalúa las características del entorno y elige la trayectoria a seguir en función de sus requisitos o preferencias personales (Helbing et al. 2001). Esta evaluación, que realizará el modelo propuesto en la tesis, encuentra su fundamento en la metodología de la toma de decisiones multicriterio, usada frecuentemente para localizar la alternativa espacial más apropiada (Jankowski, 2006), (Suomalainen, 2006). Todo este proceso de modelado conlleva un proceso de simplificación y representación conceptual que permite describir, explicar y predecir el fenómeno en cuestión. Peuquet (1994) y Kavouras (2001) proponen una manera de abordar este proceso a través de la consecución de las fases abstracción, razonamiento, predicción y planificación. Un mecanismo para manera afrontar el modelado del movimiento de las personas, principalmente en la fase de abstracción, es mediante la tecnología usada en los conocidos modelos orientados a objetos (Wachowicz, 1999), (Guimarães, 1995), (Supcik, 1999). Este tipo de modelos está estructurado en clases actuantes en el fenómeno a modelar, permitiéndonos la inclusión de la clase ‘evento’ para integrar la componente temporal en el modelo, importante en este tipo de modelos que implican dinamismo.

El modelo propuesto plantea la predicción de desplazamiento de una persona hacia un punto destino prefijado, siendo dicho desplazamiento el producto de la interacción de la persona con su entorno en un momento dado, es decir la predicción del desplazamiento que se podrá llamar “espontáneo” (frente al planificado). Dicha predicción está asociada a un escenario concreto que está definido mediante tres clases principales: la persona, el entorno y tiempo. La predicción se resuelve con una de las principales aportaciones de esta tesis: las superficies de movimiento. Las superficies de movimiento son diseñadas a partir de la sinergia de los fundamentos comunes en diferentes modelados de desplazamiento. Pese la diversidad de modelos representando desplazamientos a tan diferentes escalas, encontramos fundamentos comunes en muchos de ellos, que son empleados en dicha convergencia: modelos de gravedad, medidas de utilidad y analogía con el flujo de fluidos.

La formalización del movimiento resultante se realiza mediante funciones tridimensionales espaciotemporales que encuentran sus puntos de inflexión o discontinuidades en los eventos que componen el movimiento. Este mecanismo diseñado, que constituye otra de las principales aportaciones de la tesis, ha sido aplicado a la descripción topológica del movimiento de personas simulado a partir de las superficies de movimiento.

## **1.5 Objetivos e interrogantes de investigación**

### **1.5.1 Objetivo general**

El objetivo general de esta tesis es conceptualizar un modelo espacio-temporal capaz de formalizar y representar el fenómeno del movimiento espontáneo de las personas permitiendo hacer predicciones sobre éste mediante la creación de las “superficies de movimiento”.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

El objetivo general mencionado se verá alcanzado tras la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Individualizar los movimientos espontáneos de personas según sus características.
- Abstractar y formalizar el fenómeno del desplazamiento de las personas.
- Construir un modelo espacio-temporal que contenga y relacione las componentes abstraídas del fenómeno y permita su evolución temporal.
- Construir una superficie de movimiento que sea capaz de simular desplazamientos a partir de un escenario concreto.
- Implementar el funcionamiento del modelo permitiendo realizar estas simulaciones.
- Realizar una validación del modelo contrastando las previsiones obtenidas con observaciones reales.
- Diseñar un mecanismo capaz de describir la geometría del movimiento resultante

### 1.5.3 Interrogantes de investigación (“research questions”)

Tras alcanzar los anteriores objetivos específicos, esta tesis debe de dar respuesta a las siguientes interrogantes de investigación:

- ¿Cómo abordar el proceso de modelado del desplazamiento humano de carácter espontáneo?
- ¿Cómo introducir la dimensión temporal en un modelo orientado a objetos?
- ¿Cuales son los fundamentos teóricos cuya sinergia nos va a permitir conceptualizar y predecir el movimiento de las personas?
- ¿Cuáles son las principales clases actuantes en el fenómeno del desplazamiento de las personas?
- ¿Cómo actúan e interactúan las clases abstraídas para producir el movimiento espontáneo?
- ¿Cómo hacer previsiones de desplazamiento espontáneo en un escenario definido?
- ¿Cómo materializar el proceso de modelado propuesto?
- ¿Cómo validar el modelo planteado?
- ¿En vista de los resultados en que tipo de modelos se encuentra el nuestro?
- ¿A qué se debe la incertidumbre existente en la simulación?
- ¿Cómo obtener una descripción topológica del movimiento obtenido?

## 1.6 Estructura de la tesis

El desarrollo de esta tesis se ha estructurado como se describe a continuación:

- En primer lugar encontramos en el capítulo 1 (el capítulo presente) la motivación que ha empujado a realizar esta investigación, seguida de una recopilación de investigaciones sobre este mismo tema. Además este capítulo ofrece una breve introducción al modelo planteado y los objetivos propuestos.
- A lo largo del capítulo 2 exponemos los fundamentos de modelización y análisis usados en este modelado, mostrando cómo han sido empleados para el modelo propuesto.

- El capítulo 3 describe en profundidad la construcción de la metodología producida en esta tesis, que partiendo de los anteriores fundamentos propuestos nos permite conceptualizar y construir el modelo propuesto.
- El capítulo 4 nos ofrece la visión más práctica de este trabajo, exponiéndonos la implementación realizada que se encuentra estructurada en dos partes. Por un lado mostrará la implementación de la formalización de la descripción y reglas de comportamiento de las componentes del fenómeno de los desplazamientos sobre la herramienta Protégé y el sistema experto Jess. Y por otro lado, mediante la construcción de una aplicación Java que se ha realizado para esta tesis, y que mostrará la implementación del modelo sobre un escenario de la vida real, consistente en los desplazamientos realizados por los visitantes a un parque situado al NE de Holanda, el parque Dwingelderveld.
- En el capítulo 5 mostramos los resultados obtenidos durante la implementación del modelado de superficies de movimiento sobre dicho escenario real y además ofrecemos una discusión acerca de éstos.
- El capítulo 6 mostrará un mecanismo de descripción geométrica del movimiento mediante operaciones algebraicas y su aplicación al movimiento obtenido de las superficies de movimiento.
- En el capítulo 7, encontramos el conjunto de conclusiones obtenidas durante la realización de este trabajo. En este mismo capítulo se recogen también las posibles aplicaciones del modelo y futuras líneas de investigación.

**Capítulo 2. Fundamentos teóricos empleados  
y su integración en el modelo propuesto**

---

La metodología llevada a cabo en esta investigación está fundamentada en la integración convergente de varios fundamentos de modelización espacio-temporal y de análisis de información geográfica aplicados al estudio del desplazamiento humano. Este capítulo pretende describir todos estos fundamentos en cuya convergencia se basa la metodología expuesta en el capítulo 3.

---

## 2.1 Introducción

Dada la ambigüedad del término modelo, conviene aclarar previamente el significado que toma en este texto: se entenderá por modelo una herramienta que construye el hombre para tratar de explicar y predecir los fenómenos que observa, mediante una descripción precisa de los elementos existentes en el fenómeno de interés y de sus relaciones. Se obtiene mediante la modelización, una técnica cognitiva que permite simplificar y formalizar un objeto o fenómeno del mundo real mediante un conjunto de operaciones de abstracción, tras lo cual permite la obtención de predicciones.

El proceso de modelización que describe esta tesis aborda dichas labores de abstraer, conceptualizar y predecir durante la ejecución de una serie de fases. Este capítulo pretende describir y justificar tanto la estructura de fases seguidas para obtener el modelo espacio-temporal propuesto, como las operaciones que se desarrollan dentro de cada una de ellas.

Por ello, este capítulo se ha estructurado en diversas secciones en las que se explica tanto las fases llevadas a cabo para realizar el proceso de modelado, como los fundamentos en cada una de estas fases. En primer lugar se hablará de

las distintas fases de modelado (las fases de abstracción, razonamiento y predicción), y posteriormente se explicará cada uno de los fundamentos empleados en cada una de estas ellas.

Se comenzará exponiendo dos epígrafes que tratan los fundamentos empleados en la primera fase, la fase de abstracción: los modelos espacio-temporales y los modelos orientados a objetos y a eventos. En estos epígrafes se tratará la simplificación del mundo real mediante un modelo y como se ha realizado la integración de la componente temporal en dicho modelo.

Posteriormente se mostrarán tres epígrafes que exponen los fundamentos en cuya sinergia nos hemos apoyado para conceptualizar el fenómeno del movimiento de las personas, constituyendo la segunda fase o fase de razonamiento. Estos fundamentos se corresponden con los modelos de gravedad, las medidas basadas en utilidad y las técnicas de análisis de evaluación multicriterio.

Para finalizar se muestra la técnica que hemos utilizado en la tercera de las fases, fase de predicción, que está fundamentada en las superficies de confluencia de flujo.

La figura 2 pretende esclarecer cómo se estructuran los fundamentos, en los que posteriormente profundizamos, dentro de cada una de las fases de modelado.

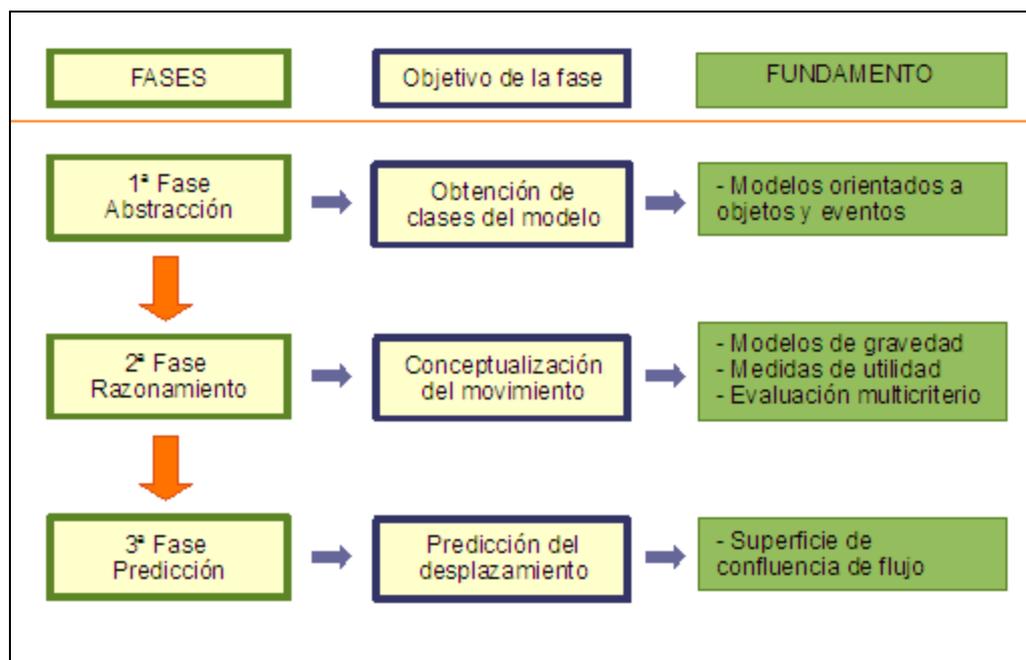


Figura 2: Conexión entre fases y fundamentos

---

De todos los interrogantes de investigación propuestos en el capítulo 1, tras considerar las cuestiones que componen este capítulo, estaremos en condiciones de responder a los siguientes:

- ¿Cómo abordar el proceso de modelado del desplazamiento humano de carácter espontáneo?
- ¿Cómo introducir la dimensión temporal en un modelo orientado a objetos?
- ¿Cuáles son los fundamentos teóricos cuya sinergia nos va a permitir conceptualizar y predecir el movimiento de las personas?

## 2.2 Fases de modelado

El modelado de los desplazamientos de personas, como cualquier fenómeno existente en el mundo real, conlleva un proceso de simplificación y representación conceptual que permite describir, explicar y predecir el fenómeno en cuestión. En un marco más amplio de modelado de fenómenos en general, Peuquet (1994) propone partir de la descripción de sus entidades actuantes, punto del que parte Kavouras (2001) para la determinación de reglas y procesos gobernantes que permiten efectuar predicciones sobre dicho fenómeno y planificar en consecuencia de estas. El resultado de estas pautas se traduce en la ejecución del proceso de modelado mediante las fases que se exponen a continuación, y que además son ilustradas en la figura 3.

### 2.2.1 Fase 1: Abstracción

Una de las características de un modelo es que representa una parte de la realidad fijándose sólo en sus componentes consideradas más relevantes, descartando las irrelevantes. Esto se consigue mediante un proceso de filtrado y clasificación igual al realizado por el ser humano cuando observa un fenómeno en el que considera y clasifica la información que estima importante y la no importante le resulta desapercibida. Este proceso de filtrado y clasificación permiten abstraer y simplificar el fenómeno de la vida real mediante un conjunto de clases que componen el modelo.

Esto constituye la fase de abstracción, que supone una simplificación del mundo real dando respuestas a las preguntas “¿qué?”, “¿cuándo?” y “¿dónde?”.

---

De esta fase se obtiene una concreta descripción de las entidades que hay en un momento y en un lugar, es decir una formalización de dichas entidades. El capítulo de metodología da respuesta a estas preguntas particularizadas al fenómeno de los desplazamientos de personas, lo que proporcionará las clases que componen el modelo.

### **2.2.2 Fase 2: Razonamiento o entendimiento**

Otra de las características de un modelo es que es capaz de representar el comportamiento complejo de un fenómeno mediante la obtención de su patrón de comportamiento, eliminando la componente casual que parece actuar en dicha complejidad. Por ello, una vez alcanzada la abstracción del fenómeno mediante una concreta descripción de clases, el siguiente desafío en el proceso de modelado es lograr el entendimiento de por qué y cómo ocurre el fenómeno. Éste es el objetivo de esta segunda fase de razonamiento o entendimiento, determinar el conjunto de procesos y reglas que gobiernan el fenómeno a modelar.

Esto se logra buscando y estableciendo relaciones y funciones que componen los patrones de comportamiento entre las entidades obtenidas en la fase anterior, lo que da respuesta a las preguntas “¿cómo?” y “¿por qué?” sobre la ocurrencia de un fenómeno.

En el capítulo de metodología también encontraremos las respuestas a estas preguntas particularizadas al fenómeno de los desplazamientos de personas, las cuales describen la definición conceptual realizada sobre el movimiento de una persona.

### **2.2.3 Fase 3: Predicción**

Los modelos sirven para predecir o simular fenómenos que ocurren en la vida real para anticiparse a sus consecuencias, tanto negativas (para atenuar sus efectos), como positivas (para sacar el máximo beneficio de ellos). Esta capacidad de previsión sobre un fenómeno se obtiene a partir del perfecto conocimiento de sus componentes y de la manera en que éstos interactúan. Entonces, una vez que hemos obtenido en las anteriores fases las entidades actuantes en un fenómeno y sus funciones y reglas de comportamiento, estamos en posición de poder realizar predicciones sobre el propio fenómeno. Esto es lo que realiza la fase de

predicción, en la que se da respuesta a la pregunta “¿qué pasaría si...?” aplicada a un determinado escenario.

En el capítulo de metodología se dará respuesta a esta pregunta para el caso del fenómeno de los desplazamientos de las personas, para lo cual como ya se explicará más detenidamente, se han diseñado las superficies de movimiento, que permiten predecir las trayectorias de las personas sobre un entorno.

#### 2.2.4 Fase 4: Planificación

La obtención de un modelo que permite hacer previsiones sobre un fenómeno abre la posibilidad de realizar planificaciones o tomar de decisiones con respecto a éste. En esto consiste la última fase del proceso de modelado: si durante las anteriores fases se obtenía un entendimiento de las relaciones y comportamientos entre entidades, lo que permite esta fase de planificación es planificar de acuerdo a unos objetivos deseados a partir de dicho entendimiento.

En la presente tesis, esta fase se corresponde con los usos y aplicaciones que puede tener el modelo que se propone, los cuales serán tratados en el capítulo 7 de conclusiones.

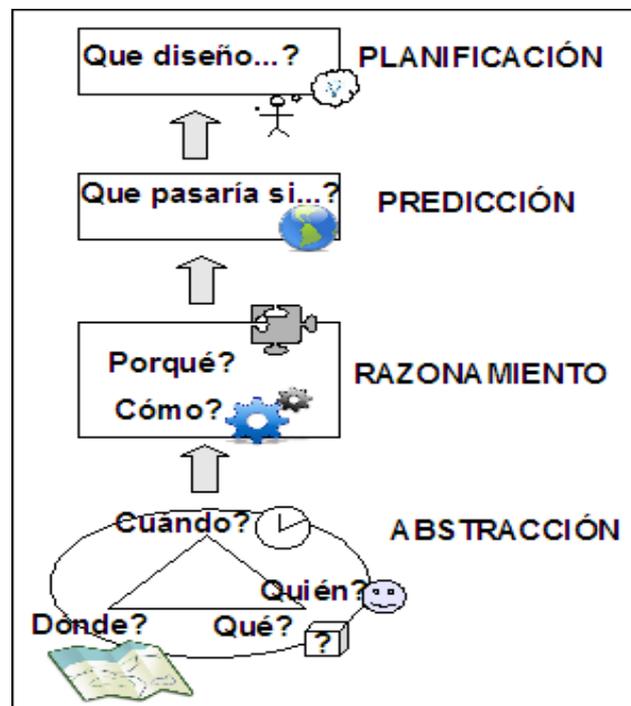


Figura 3: Fases en el modelado de fenómenos

Fuente: Figura basada en Kavouras (2001)

## 2.3 Modelos espacio-temporales

Aunque la representación de fenómenos que implican dinamismo, como ocurre con los relativos a los desplazamientos, está íntimamente ligada con la componente temporal, los modelos de desplazamientos no siempre la han contemplado. Esto no es de extrañar si consideramos que el tiempo no siempre ha estado integrado en los modelos geográficos. Yuang (1995) hace una recopilación de los primeros esfuerzos en integrar la componente temporal en modelados de fenómenos geográficos, diferenciando estos primeros modelos en dos categorías. En primer lugar aquellos que representan el tiempo de una manera discreta y no contemplan conceptos de transición o procesos, como el modelo 'snapshot' de Armstrong (1998) o la composición espacio temporal de Langran y Chrisman, (1988). Y en un segundo lugar describe los modelos que están basados en eventos, que ya son capaces de describir procesos, como el de Peuquet y Duam (1995). En Andrienko et al. (2007) se hace hincapié en la importancia de la dimensión temporal y de los eventos en el modelado del movimiento, poniendo como ejemplo las variaciones de movimientos de tropas en la marcha napoleónica, consecuencias de eventos climatológicos como la lluvia. Incluso en Galton (2001) se afirma que el movimiento es en sí mismo un tipo de evento, y por tanto para manejar movimientos necesitamos un formalismo para contemplar los eventos.

Con respecto a la formalización de eventos, encontramos en Zhang (2005) jerarquías para modelos basados en eventos donde se demuestra la gran versatilidad del empleo de eventos para el modelado de procesos o también la clasificación de eventos mediante ontologías de Kaneiwal (2007). El modelo aquí propuesto describe las variaciones sufridas en las componentes del modelo a lo largo del tiempo mediante la aparición de eventos que son clasificados en dos tipos:

- Por un lado los eventos naturales (es decir, no artificiales) que acontecen en el entorno, como pueden ser el hecho de que llueva, que salga el sol, o la llegada de la primavera. Estos eventos afectan a las características del entorno, por ejemplo la lluvia aumenta el caudal de un río o el sol incrementa las temperaturas.

- Por otro lado los eventos artificiales, de entre los que destacamos aquéllos que representan actividades realizadas por las personas, llamados 'evento de actividad' ('activity-event') (Goodchild et al., 1993), (Goodchild, 1998). La actividad asociada a la finalidad del desplazamiento también es un concepto que ha sido considerado en muchos modelos de desplazamiento de personas (Theriault & Des Rosiers, 2004). Como veremos en mayor profundidad a lo largo de las tesis, en el modelo propuesto este tipo de eventos afectan principalmente a las preferencias de desplazamiento de las personas.

Muy relacionado con las actividades de las personas, nos encontramos con el concepto “geografía del tiempo” (o más comúnmente conocido por su terminología anglosajona “*Time Geography*”), que fue introducido a finales de los 1960 por Torsten Hägerstrand permitiendo incluir los horarios de las actividades de las distintas personas en el estudio de sus movimientos, interacciones sociales y actividades. Sin embargo, no fue hasta principios de los 90 cuando, gracias a las tecnologías GIS, este concepto empezó a revolucionar el estudio de la accesibilidad (Neutens, 2007).

La geografía del tiempo es un concepto que ha contribuido sustancialmente en procesos de razonamiento sobre el comportamiento humano en un marco espacial, delimitando el ámbito en el que se desarrolla la actividad de una determinada persona mediante sus constreñimientos espacio-temporales. Este ámbito queda representado por un prisma cuyas paredes son los constreñimientos tanto espaciales como temporales (Hägerstrand, 1970).

En esta última década ha resurgido el concepto de geografía del tiempo gracias a las mejoras en las representaciones computacionales de algunas de sus entidades básicas como son la trayectoria y el prisma espacio-temporal (Forer 1998), (Kwan & Hong 1998), (Miller 1991). (Son más conocidos por los términos anglosajones de “space-time path” y “space-time prism”.)

Las figuras 4 y 5 de Miller (2004) ilustran estas entidades básicas, trayectoria espacio-temporal y prisma espacio-temporal respectivamente.

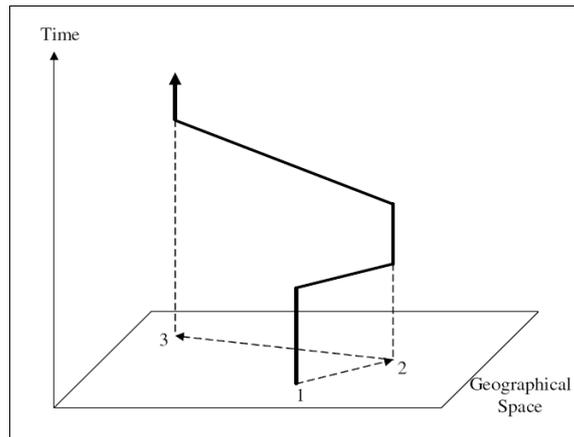


Figura 4: Trayectoria espacio-temporal (Miller, 2004)

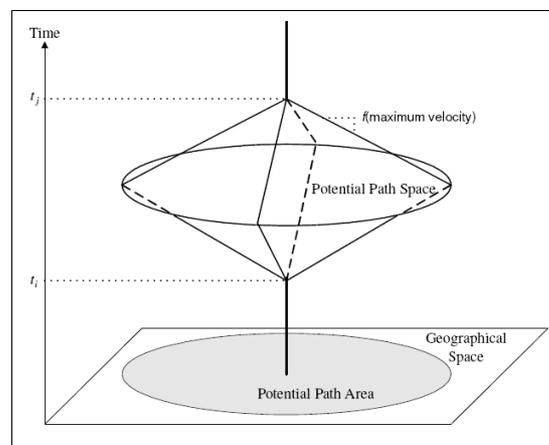


Figura 5: Prisma espacio-temporal (Miller, 2004)

La trayectoria espacio-temporal traza el movimiento de un individuo en el espacio y en el tiempo, y transmite información acerca del espacio ocupado por las actividades de dicho individuo. El prisma espacio-temporal es una extensión de la trayectoria: mide la habilidad de alcanzar localizaciones en un espacio y un tiempo determinado, dadas unas localizaciones y duraciones de actividades prefijadas. El vértice inferior representa la primera actividad en el tiempo y el superior la siguiente actividad tras un cierto intervalo de tiempo. El espacio de trayectoria potencial o PPS (siglas de su traducción anglosajona “potential path space”) se corresponde con el interior del prisma y representa todas las localizaciones espaciales y temporales que una persona puede ocupar durante ese intervalo de tiempo. Una persona solo puede interactuar con otra sólo si ocurre que sus prismas intersectan, o si el prisma de una intersecta con la trayectoria de otra (Golledge & Stimson 1997), (Pred 1981).

El modelo propuesto hereda las propiedades de “*Time Geography*” para asociar los desplazamientos de personas a una finalidad relativa a una actividad,

---

lo que permite delimitar espacios potenciales de ocupación de personas durante intervalos definidos de tiempo e interacciones entre personas. Pero además, al ofrecer la posibilidad de discernir preferencias de desplazamiento de personas, permite afinar más dicha delimitación de espacio potencial ocupado por una persona durante su desplazamiento.

## 2.4 Modelo orientado a objetos y a eventos

Entre las técnicas de modelización usadas para la representación y descripción de fenómenos, nos hemos basado en las que se explicarán a continuación:

- Modelos orientados a objetos
- Modelos orientados a eventos

Nos hemos apoyado en ambos tipos de modelo, porque si bien los primeros nos permiten describir un dominio del mundo mediante sus elementos constituyentes y sus relaciones, los segundos nos permitirán describir los eventos que en él ocurren, cómo afectan a esos elementos y cómo se relacionan dichos eventos entre sí.

### 2.4.1 Definiciones previas

Antes de entrar en estos modelos con mayor profundidad conviene detenerse a considerar unas definiciones previas<sup>1</sup> (Longley et al. 2005):

- **Objeto** (o “instancia”): Un objeto representa un ente o fenómeno concreto del mundo real cuyas sus características y propiedades pueden ser descritas de manera precisa mediante atributos y funciones, son por tanto las entidades del modelo. Los objetos son abstraídos y clasificados según diversos criterios apareciendo el concepto de “Clase” que es explicado a

---

<sup>1</sup> Algunos glosarios: <http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ncgia/u15.html>

[http://www.magic.gov.uk/textonly/Help/to\\_glossary.asp#C](http://www.magic.gov.uk/textonly/Help/to_glossary.asp#C)

<http://www.w3.org/TR/DOM-Level-2-Core/glossary.html>

<http://www.gisdevelopment.net/glossary/>,

<http://openlearn.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=173595>

---

continuación. Por ejemplo el río Ebro es un objeto que representa un fenómeno del mundo real.

- **Clase:** Una clase describe un grupo de objetos con propiedades, comportamientos e interrelaciones comunes, son por tanto abstracciones de objetos. Los objetos se definen a partir de la clase a la que pertenecen, particularizando sus propiedades, hecho conocido con el término de “crear una instancia”. Por ejemplo la clase “Río” es una abstracción de todas las entidades que tienen en común ser un río.
- **Atributo:** Describe las propiedades de los objetos mediante valores de una variable. Los objetos de una misma clase son definidos mediante los mismos nombres de atributos, sin embargo cada objeto tiene un valor particular para dicho atributo. Por ejemplo el atributo caudal es común para todos los objetos de la clase río, y tiene valores diferentes según sea el río que representa.
- **Función** (o método): La función describe, de manera simplificada, el comportamiento asociado a un objeto. Las funciones realizan operaciones que pueden aceptar argumentos o parámetros de entrada y su resultado puede modificar los valores de atributos de objetos. Por ejemplo la función “Lluvia modifica caudal” describe el comportamiento de los objetos de la clase río: en función de unos valores de entrada como valor de precipitación se obtiene una variación en el valor del atributo caudal.
- **Estado:** Es una configuración única de las propiedades que tiene un objeto en un instante dado o durante un periodo de tiempo. Se define mediante el conjunto de valores de atributos que tiene el objeto en ese periodo. Por ejemplo las propiedades descritas por los valores de atributos “caudal = 100 m<sup>3</sup>/s y “temperatura del agua = 15° C” definen el estado de un objeto de la clase río para un determinado momento  $t = t_0$ .
- **Evento:** Es un suceso que ocurre en momento determinado, modificando el estado de los objetos sobre los que actúa, pudiendo variar los valores de sus atributos. Por ejemplo un evento “lluvia torrencial” que ocurriese en un momento  $t = t_1$  hace variar los valores de atributos caudal y temperatura del agua haciendo que el estado del río para  $t = t_0$  ( $< t_1$ ) cambie al estado para  $t = t_2$  ( $> t_1$ ) de ese mismo río.

### **2.4.2 Modelos orientados a objetos**

Encontramos una manera de afrontar un proceso de modelado, principalmente de cara a la fase de abstracción que describe la composición del mundo mediante clases, en los conocidos modelos orientados a objetos (Wachowicz, 1999), (Guimarães, 1995). Su tecnología consiste en la abstracción y clasificación de las entidades actuantes en un fenómeno del mundo real para obtener un esquema simplificado de esa realidad. Estas entidades quedan representadas mediante clases relacionadas entre sí que contienen atributos que las caracterizan y funciones que describen su comportamiento. Una de las ventajas que encontramos en este tipo de modelos, especialmente en aquellos que contemplan movimiento, es que las clases tienen la posibilidad de evolucionar y mutar debido a la acción del tiempo sobre sus atributos, lo que permite la representación de entidades cambiantes (da Rocha et al., 2001), (Supcik, 1999). En Erwig et al. (1999) encontramos una propuesta de modelización orientada a objetos usada para la representación de diversos tipos de entidades con movimiento, asociando a cada objeto un periodo de validez que describe su tiempo de existencia además de atributos que describen posiciones en función del tiempo.

Aparte de las ventajas que aporta en la definición conceptual del modelo, esta estructura en clases relacionadas facilita la transición entre el análisis y la implementación (Guimarães, 1995) mediante programación orientada a objetos que es utilizada en la implementación del modelo propuesto.

### **2.4.3 Modelos orientados a eventos**

Mientras que los anteriores modelos están enfocados a describir las entidades mediante clases con atributos y relaciones, encontramos en los modelos orientados a eventos una descripción más dirigida hacia procesos actuantes a lo largo del tiempo (Claramunt & Thériault, 1995). Nuestro modelo concordaría con el modelo orientado a eventos que propone Worboys (2004), principalmente en los tres siguientes aspectos:

(1) **'Relación Evento-Evento'**: La consideración de relaciones existentes entre eventos, principalmente aquellas que hacen que los eventos actúen de desencadenantes activando sucesivamente otros eventos a lo largo del tiempo. La figura 6 ilustra la activación desencadenada entre eventos.

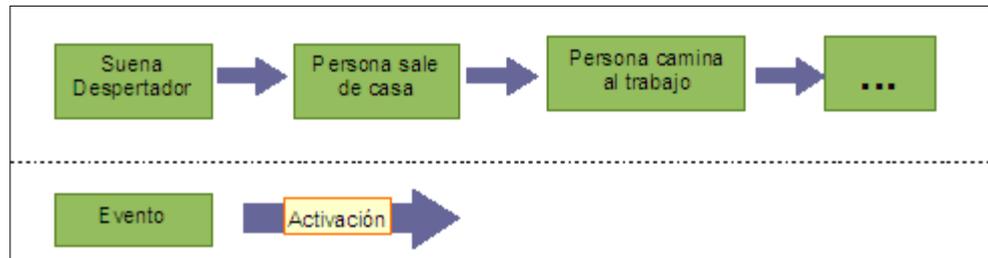


Figura 6: Activación desencadenada de eventos

(2) **'Relación Evento-Objeto'**: ya que en nuestro modelo, objeto y evento están íntimamente ligados. Los eventos son la causa de las variaciones que sufren las entidades representadas por objetos lo largo del tiempo, haciendo que pasen de un 'estado' a otro. El estado de un objeto es el conjunto de valores de atributos que le definen durante un periodo de tiempo, definiendo la sucesión de estos estados la evolución temporal de un objeto. Cuando un evento actúa sobre un objeto modificando los atributos que definen su estado, el estado inicial es sustituido por uno nuevo que es definido por los nuevos valores de atributos. Por lo tanto, los eventos marcan el final del estado de un objeto y el principio de su estado consecutivo. Podemos decir que, si en el espacio las configuraciones están delimitadas mediante líneas, en el tiempo lo están mediante eventos (Langran, 1993). La figura 7 ilustra estas definiciones mediante un ejemplo aplicado a un objeto que representa a la entidad atmósfera, cuyos atributos varían por la aparición de eventos meteorológicos.

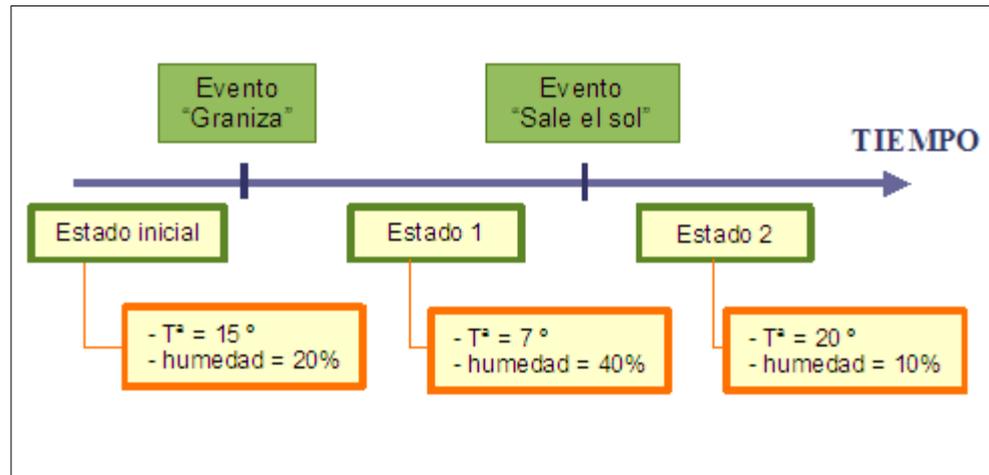


Figura 7: Ejemplo de delimitación de estados por eventos

### (3) Gestión de eventos, especialmente en cuanto a su clasificación.

Los eventos se clasifican en función de muy diversas maneras y, como veremos más adelante, en nuestro modelo hemos definido dos subclases dentro de la clase evento:

- eventos que afectan al entorno
- eventos que representan actividades humanas.

#### 2.4.4 Integración entre objetos y eventos

Como se verá en el capítulo de metodología, hemos integrado ambos modelos mediante la inclusión de la clase ‘evento’ entre las clases del modelo orientado a objetos.

En el fenómeno tratado por esta tesis correspondiente a los desplazamientos de personas, las variaciones por eventos actuarán sobre las entidades entorno y persona: los eventos afectan a las características del entorno haciendo variar sus atributos, por ejemplo el evento “lluvia torrencial” haría incrementar el nivel de agua en embalses y ríos, o el evento “llegada del invierno” que haría descender el valor de la temperatura. De igual manera los eventos hacen variar las preferencias de las personas, por ejemplo durante el evento “ir de recreo” las preferencias del paisaje son más importantes que durante el evento “ir al trabajo” (Hoogendoorn & Bovy, 2005)

## 2.5 Modelos de gravedad

Según Fotheringham y Heynes (1984) podemos definir el movimiento resultante de un proceso humano sobre el espacio (por ejemplo desplazarse para ir al trabajo, migración, asistir a una conferencia) como un proceso de interacción espacial-comportamiento social, siendo los modelos gravitacionales los modelos más usados en este tipo de interacción, formulados originariamente por Hansen (1959). Estos modelos inspirados en la física newtoniana, representan los desplazamientos como resultado de “fuerzas de atracción” existentes entre las distintas localidades, siendo estas fuerzas producidas por la suma total de oportunidades o beneficios que se ofrecen entre ellas (Frutos, 2004). Son usados como modelos de accesibilidad, que evalúan la facilidad de acceso a determinadas localidades desde otras situadas a cierta distancia, ofreciendo una de las diferentes maneras de medir y evaluar la accesibilidad (López, 2007). De las diversas adaptaciones que han sufrido estos modelos de gravedad, la usada en esta investigación se corresponde con la expresada en la fórmula (2), mediante la cual calculan la accesibilidad es la siguiente:

$$A_i = \sum_j O_j \cdot f(c_{i,j}) \quad (2)$$

Donde,

- $A_i$ : es la accesibilidad en una localización origen  $i$
- $f(c_{ij})$ : es la fricción por distancia del punto de origen  $i$  al punto de destino  $j$ .
- $O_j$ : es el número de oportunidades o actividades relevantes en la zona de destino  $j$ . Es la ponderación que recibe la atracción de la localidad  $j$ .

La utilización de modelos gravitacionales abarca la explicación de desplazamientos de muy diversas escalas. Encontramos su aplicación en desplazamientos de pequeñas magnitudes como el de ir al trabajo (Uboe, 2001) o el relativo a visitar un parque con motivo recreacional (De Frutos, 2004). Pero también lo encontramos en aplicaciones de mayores magnitudes como las encontradas, desde el pionero Ravestein (1885) a Pellegrini y Fotheringham (2002), en desplazamientos migratorios.

Los modelos gravitacionales en general basan la explicación del movimiento mediante fuerzas gravitacionales ficticias situadas en el punto destino. Sin embargo, para obtener la trayectoria entera, tal y como propone este trabajo, también se necesitarían las fuerzas presentes en todo el recorrido. Como veremos en el apartado 3 de metodología, las fuerzas repartidas por todo el entorno serán proporcionales a la utilidad obtenida durante el desplazamiento en cada punto de ese entorno, tal y como se muestra en la figura 8.

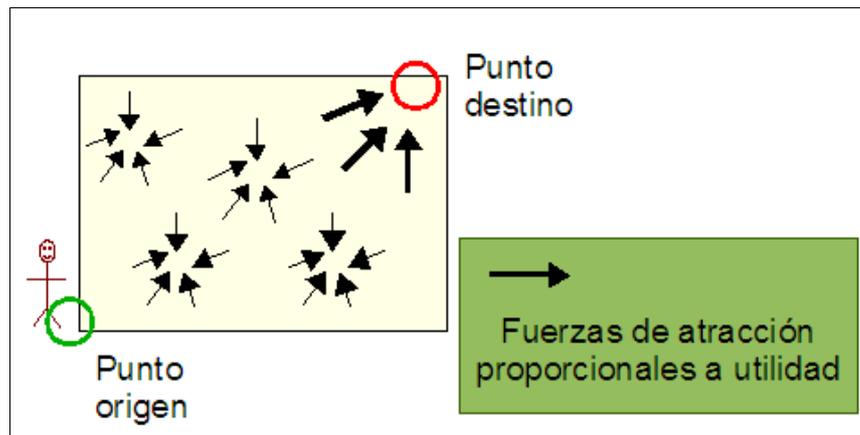


Figura 8: Fuerzas de atracción debidas a la utilidad

La idea de modelar el movimiento de un objeto dinámico por analogía con segunda ley de Newton también ha sido reflejada en algunos estudios de trayectorias: una vez establecido el total de las fuerzas actuantes sobre un cuerpo se obtiene su movimiento (Geerts, 2004), (Macedo, 2007).

## 2.6 Medidas de utilidad

Durante el proceso de desplazamiento de un punto origen a un punto destino, una persona sufre un costo debido a la distancia recorrida a cambio de obtener un beneficio ligado al hecho de acceder al punto de destino. Este intercambio se traduce en términos de utilidad, que es la responsable de que se realice dicho desplazamiento, ya que, si la persona no obtuviese ninguna utilidad derivada del desplazamiento realizado, no se movería (figura 9).

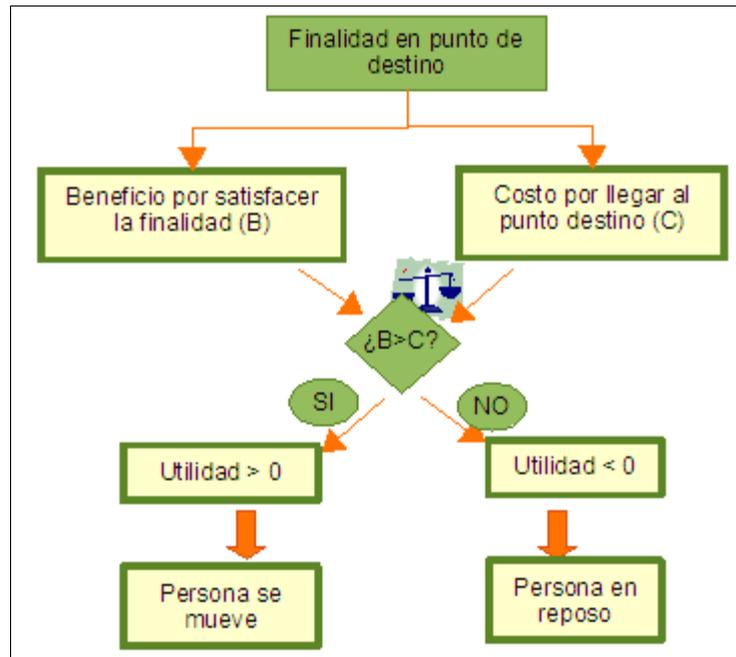


Figura 9: Intercambio de beneficio y coste en los desplazamientos

La utilidad es una de las diferentes perspectivas, basada en la teoría microeconómica, bajo la cual se mide la accesibilidad, constituyendo los indicadores basados en utilidad una de las principales herramientas para evaluar la accesibilidad (Handy & Niemeier, 1997), (Miller, 1999), (Geurs & Wee, 2004). También en el estudio de las rutas escogidas por los peatones y caminantes, numerosos autores coinciden en considerar esta maximización de la utilidad para explicar la ruta escogida (Hoogendoorn & Daamen, 2003), (Hoogendoorn & Bovy, 2005), (Kitazawa & Batty, 2004), (Hoogendoorn & Bovy, 2002) debido a que los peatones se suponen ser “minimizadores de coste” (Hoogendoorn, 2004).

En el modelo propuesto, el sujeto del desplazamiento elegirá entre todas las posibles, aquella trayectoria que maximice la utilidad durante su desplazamiento (Hoogendoorn, 2002). Dicha utilidad resultará de la evaluación del entorno según las preferencias de la persona en el proceso de interacción por el que se desarrolla el desplazamiento. Y dado que las preferencias de desplazamiento son particulares para cada persona (Helbing et al., 2001), la manera en que cada persona juzga la utilidad en un entorno es individualizada según sus preferencias o necesidades (figura 10).

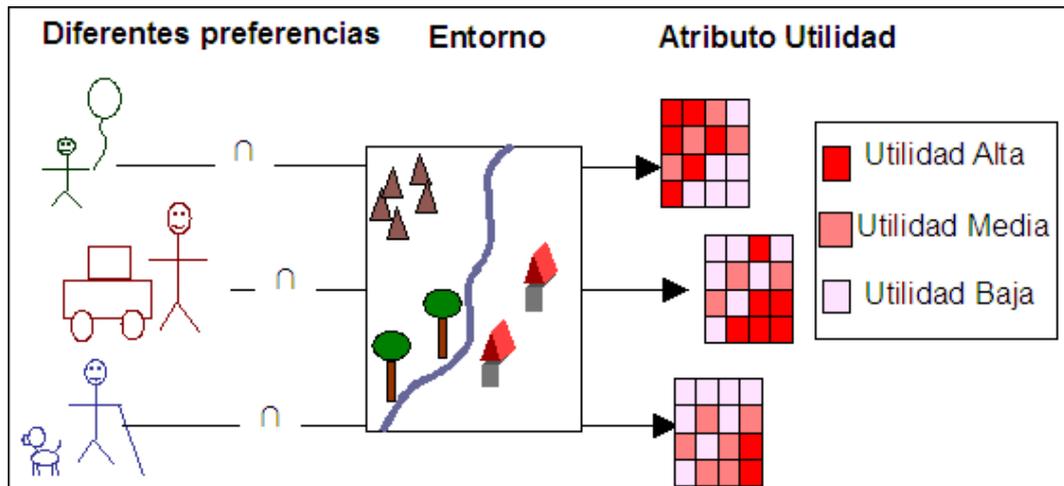


Figura 10: Utilidad de un entorno en función de las preferencias de cada persona

El cálculo de utilidad en esta tesis está basado en las preferencias personales que gobiernan el comportamiento de la elección y proceso de decisión realizado durante la elección del camino, de una manera similar a los análisis de preferencias (conocido con el término anglosajón “conjoint análisis”), donde las preferencias de un consumidor son medidas para modelar su comportamiento (Dijkstra & Timmermans, 1997), (Timmermans et al. 1984).

Los valores de utilidad calculados para el entorno según una persona individualizada por sus preferencias son los que generan la superficie de movimiento, que es la principal contribución de esta tesis. Poder considerar estas preferencias de elección de desplazamiento nos permite simular la trayectoria de cada persona individualmente, como ocurre en modelados de microsimulación, los cuales se están volviendo cada vez más importantes en modelos de demanda de tráfico (Balmer et al, 2006).

El cálculo de estos valores de utilidad que forman la superficie de movimiento se lleva a cabo materializando las preferencias personales mediante funciones de utilidad, muy usadas en los modelos probabilísticos de elección de alternativas. Recordamos la fórmula de utilidad (1) que emplean estos modelos, ya que es una de las bases en las que se apoya la metodología del nuestro (Dijkstra, & Timmermans, 1997a, 1997b, 1998):

$$U_i = \sum_n x_j \quad (1)$$

Donde,

- $U_j$  = Utilidad total por la alternativa j
- $x_i$  = Utilidad parcial producida por el atributo i
- N = Número de atributos que caracterizan la alternativa j

Como veremos en el siguiente capítulo, nuestra metodología añade a esta fórmula las ponderaciones de cada preferencia ya que cada una de las preferencias interviene con distinto peso en la elección de la alternativa dependiendo de la importancia que considere cada individuo. Para ello nos hemos apoyado en el análisis de evaluación multicriterio que trataremos en el siguiente epígrafe.

## 2.7 Evaluación multicriterio (EMC)

En la sección 2.6 veíamos el cálculo de utilidad de cada alternativa según el conjunto de preferencias de un sujeto, siendo cada preferencia considerada con el mismo peso. Sin embargo en nuestro modelo la importancia de cada preferencia variará en función de la finalidad de desplazamiento de cada sujeto, por ello debemos incluir un mecanismo que calcule la utilidad de cada celda del entorno según el conjunto de preferencias ponderadas.

La evaluación multicriterio es una técnica muy usada en los sistemas de información geográfica para localizar la alternativa espacial más apropiada y en temas de tomas de decisiones. Su inclusión en nuestro modelo nos ha permitido evaluar el entorno según el conjunto de preferencias ponderadas de desplazamiento de cada persona.

Esta evaluación multicriterio es análoga a la que realiza mentalmente una persona durante un desplazamiento cuando evalúa las características de su entorno para elegir las zonas de paso de su trayectoria en función de sus preferencias personales. De entre las reglas existentes en la toma de decisiones, nos hemos apoyado más concretamente en la “regla de la suma ponderada simple (SAW)”, usada para combinar criterios (Yoon & Hwang, 1995), (Eastman, 1995) (Malczewski, 1999), (Massam, B. H., 1999), (Ginevicius & Podvezko, 2007).

Esta regla evalúa cada alternativa según un conjunto de criterios de diferente importancia o diferente peso mediante la siguiente fórmula (4):

$$A_i = \sum_j w_j \cdot x_{i,j} \quad (4)$$

Donde,

- $A_i$  = Valoración obtenida para la alternativa  $i$
- $w_j$  = Peso del criterio  $j$
- $x_{ij}$  = Valoración obtenida para la alternativa  $i$  según el criterio  $j$ .

Los criterios que emplea esta regla se corresponden en nuestro modelo con las preferencias de la persona sujeto del desplazamiento, y la valoración obtenida para cada alternativa se corresponde con la medida de utilidad de cada celda del entorno según sus preferencias. Por tanto, mediante esta regla obtendremos la valoración de utilidad para cada alternativa mediante la suma ponderada de cada una de las valoraciones según cada criterio o preferencia. La utilidad resultante será tratada como un atributo del entorno, variable en función de la persona que percibe e interactúa con el entorno.

## 2.8 Superficies de confluencia

La similitud existente entre el desplazamiento de personas y el flujo de líquidos sobre una superficie ha producido numerosas alusiones al respecto (Helbing et al., 2001), (Batty et al. 1998), (Daamen et al., 2005), (Hoogendoorn, 2004), (Andrade et al. 2005), entre otros muchos.

En nuestro modelo hemos materializado dicha similitud considerando que los modelos de drenaje, que permiten predecir el recorrido del flujo del agua, están basados en fuerzas de gravedad, al igual que los desplazamientos de personas, los cuales también pueden ser explicados mediante fuerzas de atracción. Según lo cual, bastaría con calcular las fuerzas de atracción concernientes a cada persona en el momento del desplazamiento para predecir su trayectoria individualizada.

Encontramos este mismo fundamento que en modelados de peatones basados en campos de fuerzas (Burstedde et al., 2001), (Kirchner & Schadschneider, 2002), (Nishinari et al., 2003), que generan un movimiento

---

ocasionado por el gradiente de potenciales. Estos modelos calculan la trayectoria considerando las posibles celdas destino en cada paso del peatón. Similar estos es el modelo de Batty (2003), que representa el movimiento de peatones a través de una superficie de atracción alrededor de los puntos más deseables, de manera que el camino que siguen los peatones es el de los gradientes crecientes en esa superficie. Como se ha dicho en el apartado anterior, este trabajo explica el movimiento mediante la búsqueda de maximización de utilidad de los sujetos del desplazamiento, por lo que las fuerzas de atracción serán proporcionales a la utilidad que produce cada punto del entorno a cada persona. De igual modo que una gota de agua corre desde los puntos más altos a los más bajos pasando por los planos más inclinados, una persona camina desde los puntos más alejados a los más cercanos al punto de destino pasando por las zonas de mayor utilidad.

## 2.9 Conclusiones

En este capítulo hemos asentado los fundamentos teóricos de los que hemos partido para generar la metodología que se describe en esta tesis:

En primer lugar hemos justificado la manera de abordar el proceso de modelización mediante la consecución de una serie de fases (abstracción, razonamiento, predicción y planificación) dentro de las que se estructuran los procesos que producen el modelo: abstracción, razonamiento y predicción. La fase de planificación se enmarca el proceso de explotación y uso del modelo, que será explicado en el capítulo 7. En la primera fase, fase de abstracción, obtenemos las principales clases actuantes en el fenómeno en cuestión, cuyas relaciones y comportamiento serán establecidos en la siguiente fase de razonamiento. Una vez alcanzadas estas dos primeras fases podremos hacer previsiones de desplazamiento durante la tercera fase de predicción.

En segundo lugar hemos descrito cada uno de los fundamentos cuya sinergia va a constituir nuestra definición conceptual de movimiento. La convergencia se basa en representar el movimiento de las personas como resultante de fuerzas análogas a las de gravedad propias de modelos de accesibilidad, que en nuestro modelos son proporcionales al valor de utilidad en cada punto del entorno. Para el cálculo de estos valores de utilidad nos hemos apoyado en el análisis de preferencias ponderadas mediante técnicas de evaluación multicriterio. Para simular dicho movimiento hemos considerado la

---

simulación del movimiento de fluidos sobre una superficie (también causado por fuerzas de gravedad), a partir del máximo gradiente de los valores de pendiente. Nuestro modelo simula el desplazamiento de la persona buscando la maximización de utilidad durante su recorrido, que coincidirá con el máximo gradiente de una superficie constituida por valores de utilidad: las superficies de movimiento.

En resumen, se ha dado respuesta a las tres siguientes interrogantes de investigación:

- ¿Cómo abordar el proceso de modelado del desplazamiento humano de carácter espontáneo?

El modelado que se ha realizado en esta tesis sigue una estructuración en tres fases principales que serán las que marcarán el desarrollo de metodología: (1) abstracción para describir las entidades relevantes, (2) razonamiento para describir su patrón de comportamiento y (3) predicción para plantear posibles predicciones a partir de supuestos de escenario. El fenómeno a modelar está representado mediante un modelo orientado a objetos que contiene las clases que describen las entidades del fenómeno, sus funciones y reglas de comportamiento.

- ¿Cómo introducir la dimensión temporal en un modelo orientado a objetos?

La dimensión temporal provoca la evolución de las clases que representan las entidades que forman parte del fenómeno, permitiendo tanto su variación de atributos como su movimiento. Este cambio está representado mediante la inclusión de la clase evento entre las clases del modelo. Estos eventos modifican el estado inicial de las entidades definidas por un conjunto de atributos y una posición espacial que las definen, son por lo tanto los causantes del cambio y del dinamismo (figura 11).

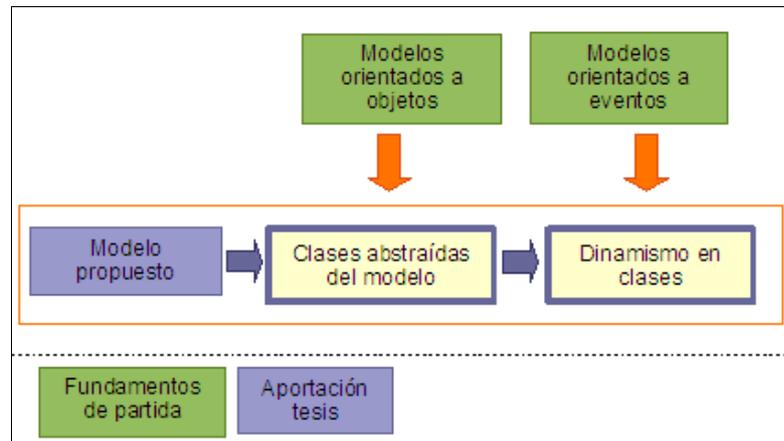


Figura 11: Inclusión de Clase Evento en el modelo

- ¿Cuáles son los fundamentos teóricos cuya sinergia nos va a permitir conceptualizar y predecir el movimiento de las personas?

Por un lado consideramos los fundamentos en los que nos hemos basado para conceptualizar el movimiento de las personas, que como muestra la figura 12 son los siguientes:

- Modelos de gravedad
- Medida de utilidad basada en preferencias
- Evaluación Multicriterio (EMC)

En esta figura también se muestra la relación entre éstos fundamentos: partiendo de un modelo de gravedad que representa el movimiento mediante fuerzas de atracción en puntos de destino, hemos obtenido un modelo que representa el movimiento mediante fuerzas de atracción en cada punto del entorno, permitiéndonos así obtener la trayectoria entera. El valor de estas fuerzas, que simulan fuerzas de atracción, lo hemos obtenido a partir de medidas de utilidad del entorno basadas en preferencias, para cuyo cálculo se emplea la evaluación multicriterio.

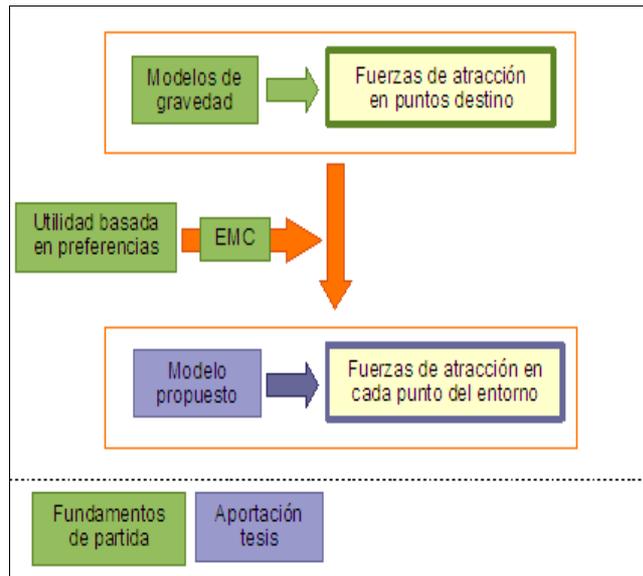


Figura 12: Fundamentos de partida para conceptualizar el movimiento

La analogía existente en las fórmulas de estos fundamentos nos ha permitido obtener la función de dicho movimiento que será descrita en el capítulo 3, relativo a la metodología (figura 13).

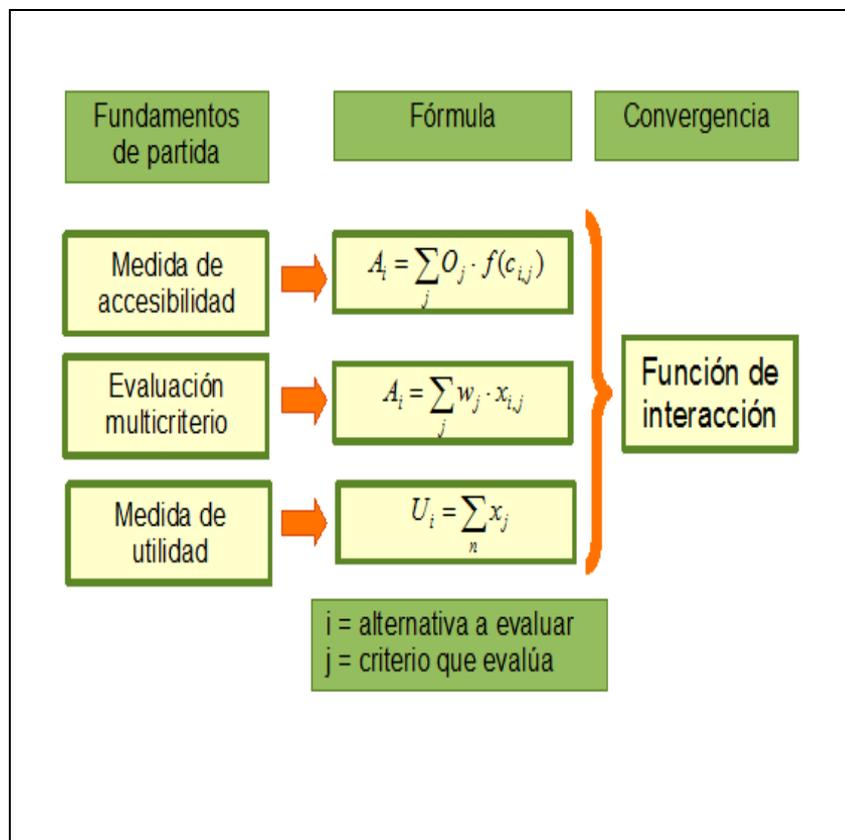


Figura 13: Obtención de la función de movimiento

Por otro lado hemos considerado el fundamento que va a permitir simular el movimiento resultante en la fase de predicción. Éste se centra en la simulación del movimiento de fluidos mediante la superficie de confluencia de flujo (figura 14), y su aplicación a nuestro modelo, que, como será explicado en el capítulo de metodología, se realizará mediante la creación de superficies de movimiento.

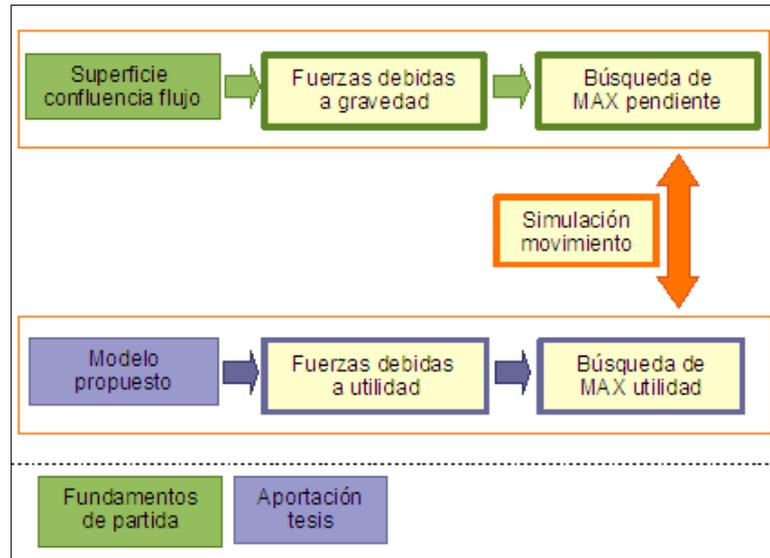


Figura 14: Apoyo en la superficie de confluencia de flujo para simular el movimiento.

## **Capítulo 3. Metodología**

---

Pese al aparente caos que parece reinar en el fenómeno de los desplazamientos espontáneos de las personas, si reparamos en sus circunstancias espaciales, temporales y personales, descubrimos que es un fenómeno sujeto a un patrón de comportamiento. Partiendo de los fundamentos expuestos en el anterior capítulo, vamos a describir la metodología que da lugar al modelo propuesto en esta tesis, la cual nos permite modelar ese patrón de comportamiento.

---

### 3.1 Introducción

Si observamos desde una perspectiva en altura el movimiento de las personas, puede que en un principio percibamos un cierto caos en dichos movimientos: incluso para llegar a un mismo destino unas personas pasean, otras corren, unas se detienen, otras se desvían, unas van por un camino y otras van por otro distinto. Sin embargo, pese a este aparente caos, si relacionamos estas observaciones con las circunstancias espacio - temporales, (hora, día, condiciones atmosféricas, circunstancias de entorno...) y las correspondientes a cada persona (finalidad de desplazamiento, sus preferencias) nos daremos cuenta de que esos movimientos no son casuales. Así por ejemplo, si para llegar a un mismo destino existen dos caminos alternativos, uno muy pedregoso, y otro liso pero atravesando una zona con abundancia de polen, una persona que llevase tacones se decantaría por el camino liso, mientras que otra persona que tuviese alergia preferiría ir por el pedregoso, pero sin polen. Aunque en caso de emergencia ambas irían por el más corto, fuese cual fuese, ya que entonces las preferencias comentadas adquirirían menor relevancia.

El modelo descrito en esta tesis propone la previsión de desplazamiento de un sujeto caracterizado por un conjunto de preferencias personales para una

determinada finalidad, considerando las circunstancias espaciales y temporales en las que se encuentra. Este desplazamiento surge de la elección improvisada que realiza la persona en función del contexto espacial en el momento que se desplaza (elección “in situ”), por eso acotamos los movimientos susceptibles de modelado con el modelo propuesto a los de carácter espontáneo frente los planificados, fruto de una elección a priori.

En este capítulo se desarrollan las fases que comprenden la formación del modelo propuesto. El primer paso que afrontamos en nuestro modelado es el filtrado y clasificación de información, mediante el cual retenemos y clasificamos la información que consideramos importante y descartamos la restante. Este proceso representa la primera etapa en el modelado: *fase de abstracción*. Mediante esta fase determinamos las clases actuantes en el fenómeno del movimiento de las personas, lo que nos permite formalizar y acotar las complejas observaciones del mundo real. Así por ejemplo si tratásemos de modelar el fenómeno del movimiento de las personas para ir a trabajar, nos fijaríamos en los elementos que considerásemos influyentes para tal fin (ej. persona, vehículo, puntos origen y destino, horarios jornada laboral, atascos), mientras que descartaríamos los irrelevantes (ej.: pájaros y flores del entorno).

Una vez obtenidas las clases actuantes en el fenómeno del movimiento de las personas, el siguiente paso es obtener el porqué y el cómo ocurren dichos movimientos. Es decir, procedemos a buscar la regla por la que se rige dicho movimiento, que, como veremos más adelante, concebiremos como basado en fuerzas de atracción proporcionales a la utilidad en cada punto del entorno. Este paso constituye la *fase de razonamiento*.

Llegado a este punto de caracterización del modelo, habiendo descrito la regla que rige el comportamiento de movimiento de las personas sobre un entorno nos vemos en condiciones de hablar de predicciones sobre dicho movimiento. Esta fase se correspondería con la tercera fase de modelado de procesos: *fase de predicción* del comportamiento. Hemos abordado esta fase de predicción mediante nuestra principal aportación: las superficies de movimiento. Las superficies de movimiento surgen ante la necesidad de representar todos los elementos descritos en nuestro modelo (personas, preferencias, entorno, etc.) y de aplicar la ley de movimiento de las personas debido a fuerzas de atracción basadas en el aumento de la utilidad. Para ello nos hemos basado en los modelos de

representación de los flujos de agua, también basados en fuerzas gravitacionales: Así como una gota de agua se desliza por una superficie buscando las máximas pendientes, una persona se moverá por un entorno buscando las máximas utilidades.

A continuación se desarrollan por separado, mediante sendos epígrafes, cada una de estas fases mencionadas que constituyen nuestro modelo y extraídas de las propuestas de modelado de fenómenos de Peuquet (1994) y Kavouras (2001):

- Fase de abstracción
- Fase de razonamiento
- Fase de predicción

La figura 15 muestra el orden en el que se relacionan secuencialmente estas tres fases:

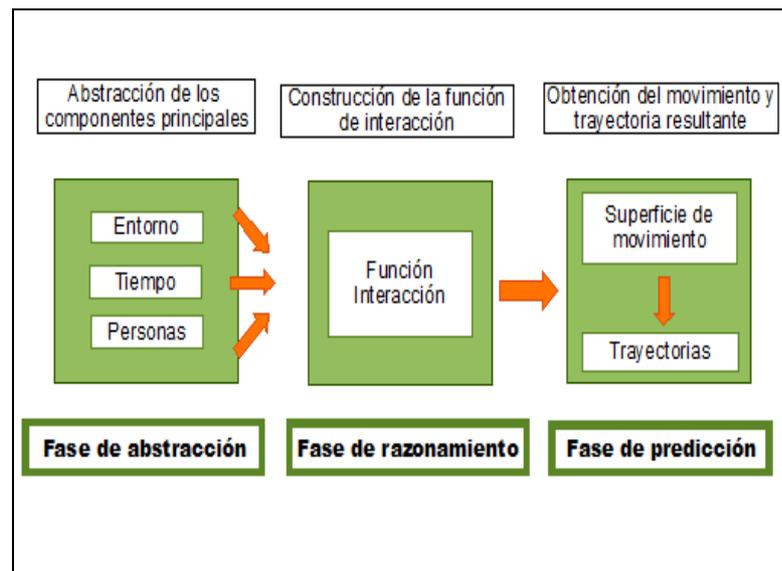


Figura 15: Sucesión de fases para la construcción del modelo

Este capítulo da respuesta a las siguientes interrogantes de investigación:

- ¿Cuáles son las principales clases actuantes en el fenómeno del desplazamiento de las personas?
- ¿Cómo actúan e interactúan las clases abstraídas para producir el movimiento?
- ¿Cómo hacer previsiones de desplazamiento en un escenario definido?

### 3.2 Primera fase: Abstracción

La fase de abstracción consiste en el proceso de simplificación y clasificación de las componentes actuantes en un fenómeno a modelar, obteniéndose así el conjunto de clases presentes en el modelo. La primera aportación del modelado propuesto se encuentra en esta fase, que es la definición de las tres componentes principales que interactúan en el fenómeno a modelar: personas, tiempo y entorno.

La estructuración y definición de las clases se realiza mediante las técnicas de modelo orientado a objetos y a eventos como fue explicado en el capítulo 2 referente a los fundamentos empleados.

Antes de adentrarnos en la explicación de cada una de las clases, y con el fin de facilitar la comprensión de su estructura, ofrecemos en la figura 16 un esquema simplificado de todas las clases resultantes de la abstracción y las relaciones existentes entre ellas.

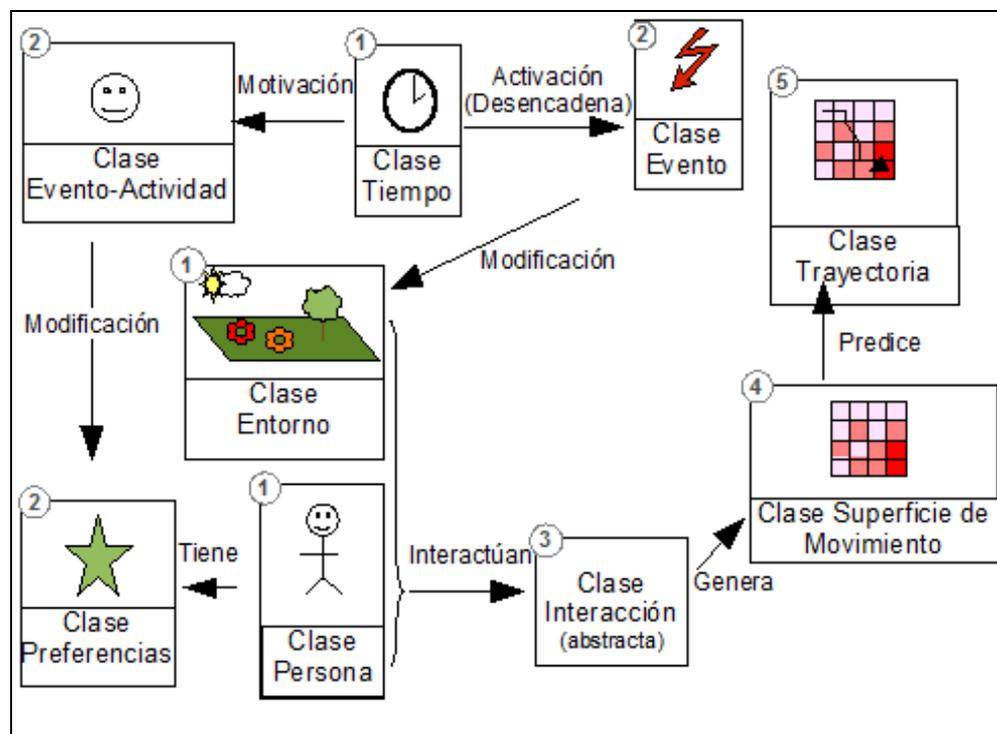


Figura 16: Clases y relaciones resultantes de la abstracción

Además las tablas 1 y 2 muestran respectivamente la definición de cada una de las clases obtenidas en la fase de abstracción, y los tipos de relaciones. Y por último, antes de profundizar en la descripción de las clases y sus relaciones, la tabla 3 resume las relaciones existentes entre clases, cuya justificación se encuentra en el capítulo 2 de fundamentos. Tras estos conceptos previos, a continuación se describirán con más detalle cada una de estas clases obtenidas y sus relaciones.

Tabla 1: Clase resultantes de la abstracción

<b>CLASE</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
Persona	Representa el sujeto del movimiento. Está definida por un conjunto de atributos que la caracterizan y una finalidad de desplazamiento (compras, ocio, trabajar).
Entorno	Describe el espacio físico donde la persona se está moviendo por medio de las variables (atributos) que influyen en la elección de la trayectoria.
Preferencias	Describe el conjunto de requisitos de cada persona durante su desplazamiento (paisaje, seguridad, temperatura, ...)
Interacción	Esta clase abstracta representa la manera en que un entorno es percibido y evaluado por la persona.
Tiempo	Representa la dimensión temporal en la que discurre el movimiento.
Evento	Clase responsable de la detonación del movimiento y de las variaciones causadas en atributos de instancias de clases Persona y Entorno.
Superficie de Movimiento	Esta clase representa la tendencia de una persona a moverse en la medida que incrementa su nivel de utilidad. Está caracterizada por valores de utilidad para cada punto del entorno.

Tabla 2: Definición de los distintos tipos de relaciones

<b>RELACIÓN</b>	<b>DEFINICIÓN</b>
Activa	Sinónimo de “puesta en acción”. Representa el desencadenamiento de procesos o eventos a lo largo del tiempo. Un evento se activa cuando se cumple una serie de circunstancias necesarias para ello.
Modifica	Acto de variación de los valores de atributos de diversas clases por la actuación de un evento que se encuentra activado.
Tiene	Asocia un objeto de la clase persona con las preferencias que le caracterizan.
Interactúan	Relaciona las clases entorno y persona, a partir del cual un objeto de la primera clase es percibido y evaluado por uno de la segunda.
Genera	Proceso mediante el cual un objeto de una clase produce la existencia de un objeto de otra clase.
Se mueve sobre	Desplazamiento de la persona a partir de la superficie de movimiento generada.

Tabla 3: Relaciones entre las anteriores clases abstraídas

<b>OBJETOS DE LA CLASE ...</b>	<b>TIENEN RELACIÓN DEL TIPO...</b>	<b>CON OBJETOS DE LA CLASE ...</b>
Tiempo	“Activa”	Evento
Persona	“Tiene”	Preferencias
Evento	“Modifica”	Persona
Evento	“Modifica”	Entorno
Evento	“Activa”	Interacción
Persona	“Interacciona con”	Entorno
Persona	“Se mueve sobre”	Superficie de Movimiento

### 3.2.1 Clase Tiempo

Partiendo de las obviedades de que los cambios ocurridos en la dimensión espacial están intrínsecamente asociados con el tiempo (Kavouras, 2001), y de que el movimiento de un cuerpo es la variación temporal de su atributo 'posición', el presente modelo adquiere el carácter de espacio-temporal. Sin la dimensión temporal no tendríamos más que una escena congelada en el tiempo, totalmente incompatible con el fenómeno que estamos representando, por lo que reconocemos la componente tiempo indispensable en un modelo de trayectorias. Así lo declaran también en Macedo et al. (2008) aunque también advierten de la carencia de modelos espacio-temporales perfectamente adaptados para el modelado de trayectorias.

En el proceso de abstracción realizado, la *Clase Tiempo* representa la componente temporal del modelo, sus objetos (instancias) son los instantes de tiempo en los que ocurren los eventos o cambios (objetos de la *clase Evento*).

En función de la resolución temporal del modelo, estos instantes variarían de horas, días, meses o incluso años. Es decir, para representar un desplazamiento por un parque como el mostrado en este trabajo necesitaríamos una resolución temporal de horas, sin embargo para representar desplazamientos de tipo migratorio nos bastaría con una resolución de días o de meses.

Teniendo en cuenta que el transcurso de tiempo permite la existencia de cambios y eventos (Theriault et al. 1999), (Kavouras, 2001) ambas clases están ligadas mediante la relación: Clase Tiempo “Activa” Clase Evento.

### 3.2.2 Clase Evento

Es otra clase que junto con la del tiempo, nos ha permitido introducir la dimensión temporal en nuestro modelo. Como veremos en los ejemplos siguientes, se ha introducido esta dimensión mediante variaciones de atributos por la acción de eventos a lo largo del tiempo.

Los eventos representan las acciones que originan los cambios, sus instancias crean variaciones en los atributos de objetos de otras clases del modelo. Producen variaciones sobre cualquier tipo de entidad (cosas, personas, entorno,...), se consideran pues los límites que delimitan los estados de esas entidades,

entendiendo estados como el conjunto de atributos que poseen esas entidades en ese momento. Los eventos producen variaciones sobre los estados de las entidades porque han modificado los atributos que caracterizan esas entidades. (Langran, 1993), (Kavouras, 2001).

De modo que podemos representar estos atributos variantes a lo largo del tiempo mediante funciones de variación temporal, que registran el valor que toma cada atributo con el transcurso de los diferentes eventos. En este modelo de desplazamientos, aparte de los eventos que modifican las características del entorno, nos interesan especialmente aquellos que representan las actividades realizadas por las personas, llamados 'evento de actividad' ('activity-event') (Goodchild et al., 1993), (Goodchild, 1998), que al igual que el concepto de "time-geography", delimitan el espacio de desplazamiento en función de las actividades que realizan las personas. Por lo tanto, encontramos dos subclases dentro de esta clase evento:

- Eventos que afectan al entorno,
- Eventos que representan actividades humanas.

En el presente modelo, como exponemos a continuación, los eventos están relacionados con las Clases Persona, Entorno e Interacción.

### *3.2.2.1 Clase Evento "Modifica" Clase Persona*

La variación temporal de los atributos de la clase persona se representa mediante una función temporal en la que sus atributos adquieren distintos valores a lo largo del tiempo que son modificados mediante la clase evento. Por ejemplo, el atributo 'velocidad de paso' de un individuo quedaría representado mediante la función de la figura 17.

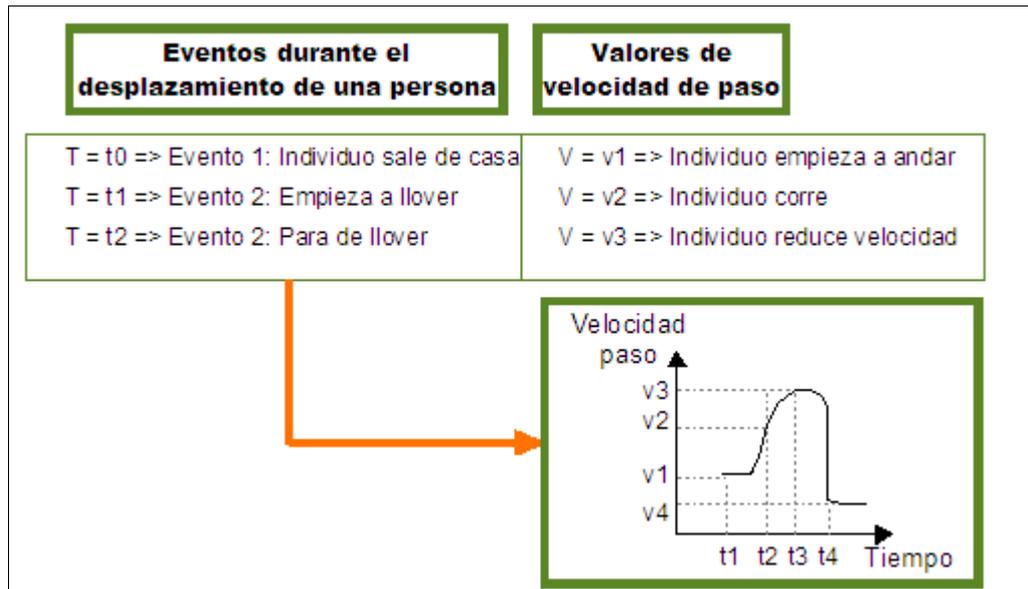


Figura 17: Función temporal de variación del atributo “Velocidad de paso de un individuo” debida a la aparición de eventos

### 3.2.2.2 Clase Evento “Modifica” Clase Entorno

El mecanismo para representar la dimensión temporal sobre el entorno sigue siendo mediante funciones temporales. La clase evento modifica los atributos de la clase entorno, un ejemplo de variación de atributo relativo al entorno, la temperatura, lo podemos ver en la función de la figura 18.

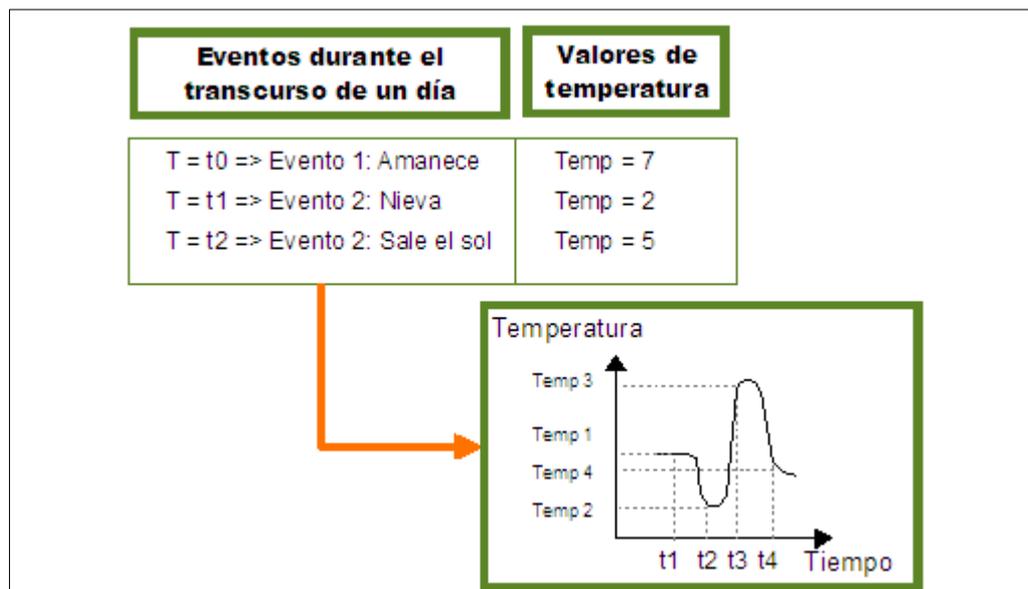


Figura 18: Función de variación del atributo “Temperatura” debida a la aparición de eventos

### 3.2.2.3 Clase Evento “Activa” Clase Interacción

Esta relación se debe a que la interacción entre persona y entorno que origina el movimiento se produce a partir de un evento que motiva la necesidad o deseo de desplazamiento. Estos eventos están basados en actividades que realiza la persona: ir de compras, ir a trabajar, etc.

Un evento basado en actividad activa la interacción entre persona y entorno, generándose las fuerzas de atracción en el entorno que hacen que la persona se mueva desde su punto origen a su punto destino. La figura 19 ilustra este proceso mediante una serie de ejemplos: mientras que el evento (1) “Partir hacia el médico” genera fuerzas de atracción hacia hospitales, el evento (2) “Partir hacia el parque” las genera hacia los parques y el evento (3) “Salir de compras” hacia los supermercados.

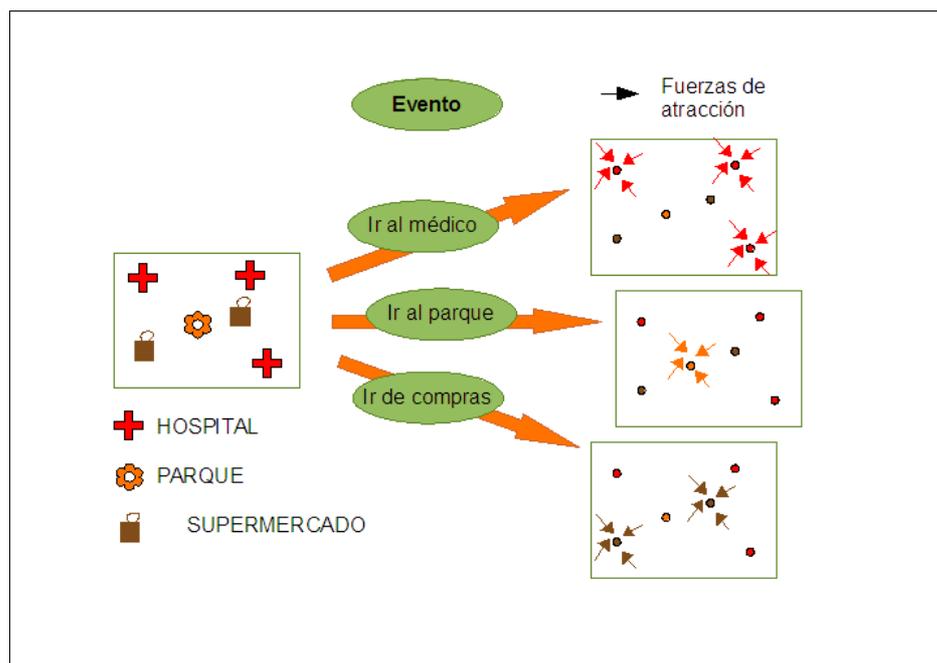


Figura 19: Fuerzas de atracción por la activación de interacción entorno-persona provocada por eventos basados en actividades

### 3.2.3 Clase Entorno

Representa la componente espacial del modelo, es el espacio en el que se desarrolla el movimiento de la persona, y se encuentra estructurado mediante celdas. Cada celda del entorno está caracterizada por un conjunto de atributos (pendiente, temperatura, tipo de suelo, etc.) que es percibido por la persona durante el desplazamiento. Este proceso de percepción forma parte de la

interacción entre persona y entorno, fruto de la cual surge el movimiento (Fotheringham & Heynes, 1984). El entorno en el que se desarrolla el movimiento está comprendido entre el punto origen y punto destino del desplazamiento y tiene una extensión variable entre estos dos puntos.

La Clase Evento está unida a esta Clase Entorno mediante la relación “Modifica”, pues al estar el entorno definido por atributos que pueden variar con la acción de cambios o eventos, será susceptible a variaciones temporales como se muestra en la figura 20.

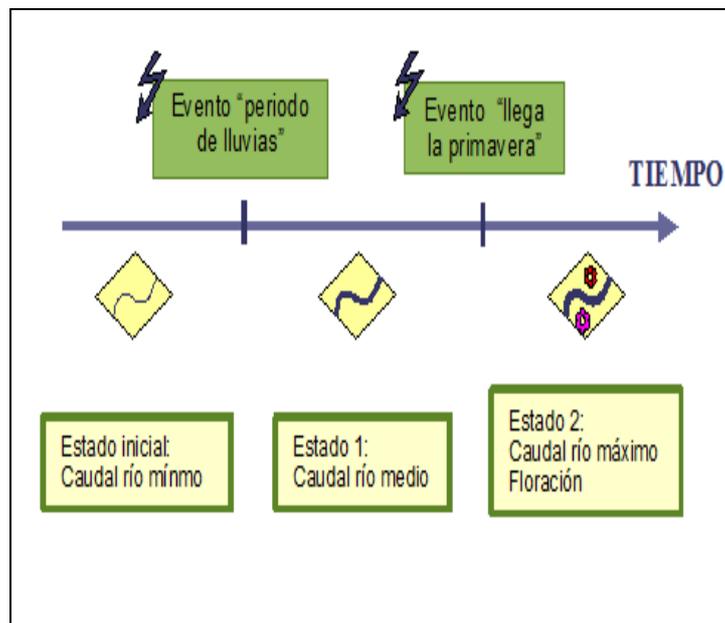


Figura20: la variación de atributos del entorno ocasionadas por eventos genera diferentes estados en el entorno

### 3.2.4 Clase Persona

En contraposición con los modelos tradicionales de accesibilidad, que no permitían la representación de experiencias individuales (Kwan & Weber, 2003), este modelo ha introducido esta clase para poder definir un sujeto y contemplar sus desplazamientos personalizados. Esta clase representa el sujeto que realiza el desplazamiento, que puede ser un individuo o un conjunto de individuos que tengan las mismas preferencias o requisitos de desplazamiento.

Cada objeto de la *Clase Persona* estará asociada a uno correspondiente a la *Clase Preferencias* mediante la relación *Clase persona "Tiene" Clase Preferencias*. Al igual que ocurre con la Clase Entorno, esta clase también está

unida a la Clase Evento mediante la relación “Modifica”. Los atributos de la clase Persona también pueden variar con la acción de cambios o eventos y con ellos variarán también sus preferencias personales, como se verá en el siguiente punto (figura 21).

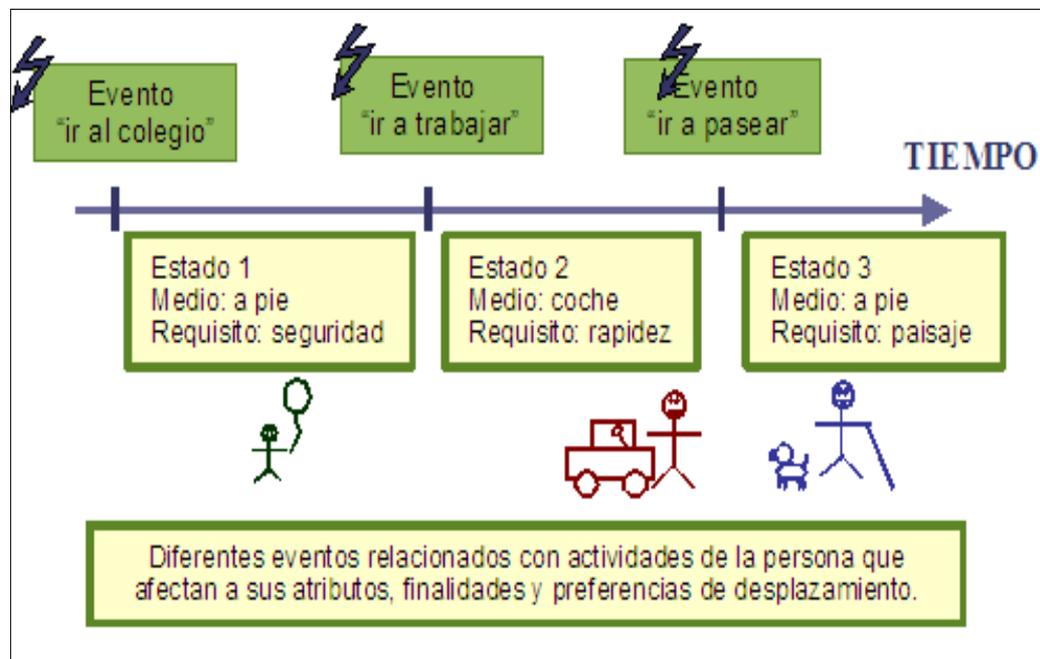


Figura 21: Modificación de atributos de persona con el tiempo y con ellos preferencias de desplazamiento

### 3.2.5 Clase Preferencias

Representa las preferencias de desplazamiento de la persona, que son distintas para cada individuo y se corresponden con el conjunto de requisitos bajo los cuales se evalúa el entorno en busca de la mejor alternativa de recorrido. En el modelado del comportamiento de las personas en procesos de elección, las alternativas están caracterizadas mediante diversos atributos, y los criterios que juzgan estos atributos son los que proporcionan las preferencias de la persona en el modelado de su comportamiento (Dijkstra & Timmermans, 1997).

En este modelo, de entre los posibles atributos de entorno deben ser seleccionados los relevantes para la elección del desplazamiento para la persona. Las preferencias de desplazamiento de una persona se traducen en el conjunto de criterios que evalúan los atributos de entorno mediante el sistema multicriterio, que permite obtener la trayectoria de mayor utilidad. Estos criterios están compuestos por dos componentes, la **ponderación** y la **función de utilidad**

asociada: mientras que la ponderación indica qué variables resultan más importantes a cada persona, la función de utilidad indica qué valores de esas variables le proporcionan mayor utilidad. A continuación se explican más detalladamente:

### 3.2.5.1 Ponderación

La ponderación define la relevancia mediante un valor porcentual que tiene cada variable para cada individuo.

La tabla 4 muestra un ejemplo de cuál podría ser la ponderación de preferencias para pasear por el campo de una persona cuya mayor preocupación sea la pendiente del suelo seguida por el tipo de suelo que atraviesa y en último lugar de las flores existentes. Según este orden de prioridades se estiman los pesos expresados mediante los porcentajes que figuran en la tabla 4.

Tabla 4: Ponderación de preferencias para ir a pasear

Pendiente	Tipo de suelo	Flores
50%	30%	20%

### 3.2.5.2 Función de utilidad

La función de utilidad proporciona la utilidad que produce a una persona cada valor de una variable del entorno. Por ejemplo, las funciones de utilidad para una persona que en un momento  $t_1$  prefiere pendientes llanas, suelo no pavimentado y ausencia de flores serían las que se ven en la figura 22. Tendríamos tres funciones de utilidad distinta para ese momento  $t_1$  que las denominamos como sigue:

- Función de utilidad por pendiente: 'FU pte  $t_1$ '  
Reflejará una máxima utilidad en zonas llanas, utilidad media en zonas ligeramente inclinadas y mínima en las más inclinadas.
- Función de utilidad por suelo: 'FU suelo  $t_1$ '  
Reflejará una máxima utilidad en suelos con hierba, utilidad media en suelos de arena y mínima en suelos asfaltados.
- Función de utilidad por flores: 'FU flores  $t_1$ '

Reflejará una máxima utilidad en zonas ausentes de flores, y mínima en zonas muy pobladas de flores.

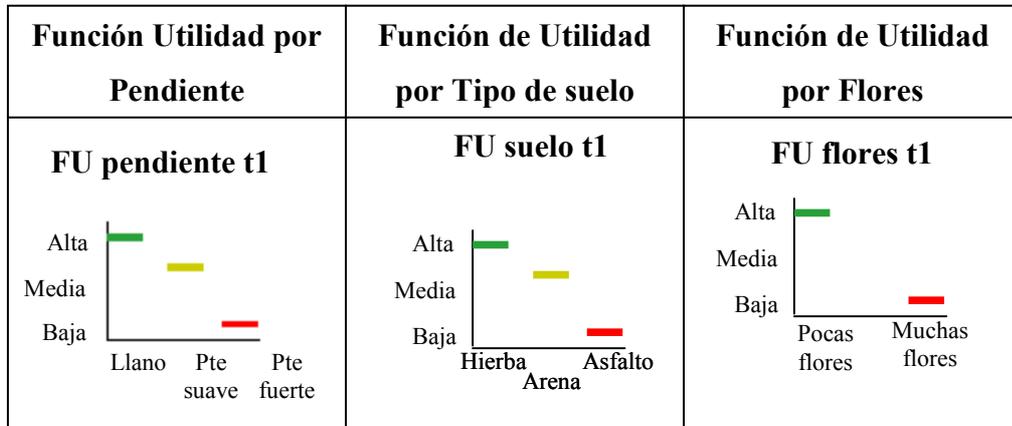


Figura 22: Funciones de utilidad en las preferencias para ir a pasear en el momento t1

Como se ve en la figura 23, estas preferencias están sujetas a variaciones temporales, que varían según la finalidad del desplazamiento y están determinadas en cada momento por la actividad que realiza la persona. Dicha figura muestra las distintas definiciones de preferencias para un momento t1 y para un momento t2 en los que se realizan distintas actividades.

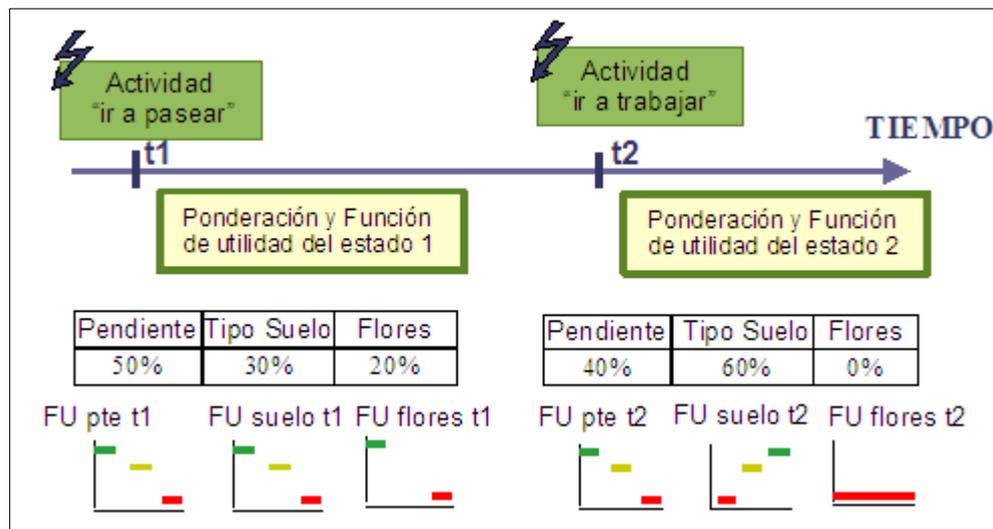


Figura 23: Variación temporal de las preferencias

### 3.2.5.3 Matriz de preferencias

Estas matrices han sido diseñadas con el fin de obtener una formalización de la **Clase Preferencias**. Definen mediante los términos de “ponderación” y “función de utilidad” las preferencias de desplazamiento para cada individuo según sea la finalidad. En la tabla 5 vemos la matriz de preferencias que correspondería al anterior ejemplo mostrado en la figura 22 mediante asignación de ponderación (Peso) y función de utilidad (FU):

Tabla 5: Ejemplo de matriz de preferencias

Finalidad	Pendiente	Tipo de suelo	Flores
Ir a pasear	Peso =50% FU pte t1	Peso =30% FU suelo t1	Peso=20% FU flores t1
Ir a trabajar	Peso =40% FU pte t2	Peso =60% FU suelo t2	Peso=0% FU flores t2

### 3.2.6 Clase Interacción

Representa la evaluación del entorno según los requisitos de desplazamiento de la persona, generando fuerzas de atracción en el entorno que atraen a la persona en función de sus preferencias (ver figura 24). Como resultado de este proceso se originan las “superficies de movimiento”.

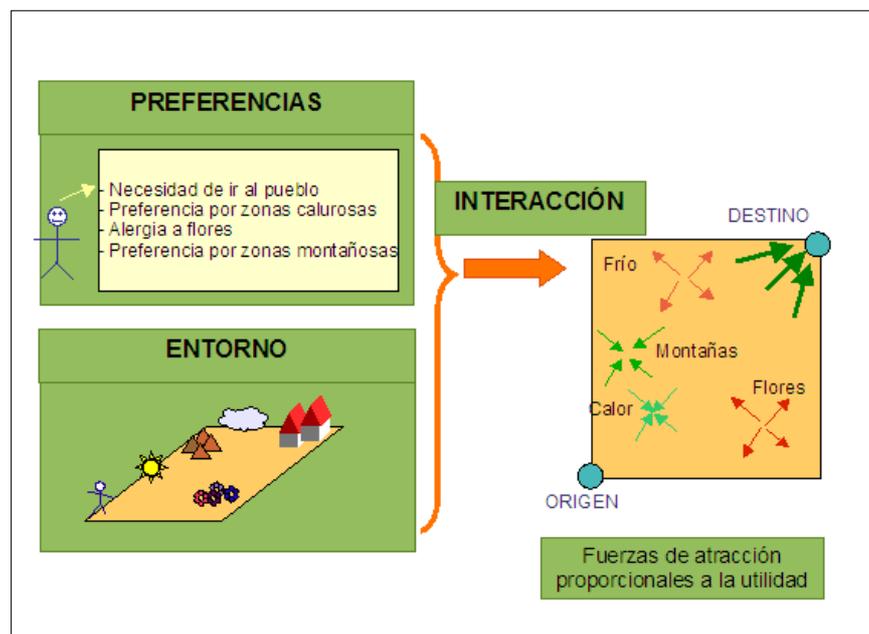


Figura 24: Fuerzas de atracción producidas por la interacción persona-entorno

Esta clase contiene la función de interacción, que se ha diseñado en esta tesis para calcular la utilidad del entorno en función de las preferencias de cada persona, y será explicada más detalladamente en el siguiente punto (Fase de Razonamiento). Los *input* de esta función son una instancia de la Clase Preferencias y una instancia de la Clase Entorno, y como *output* tendrá una instancia de la clase Superficie de Movimiento.

### 3.2.7 Clase Superficie de Movimiento

Representa el resultado de la evaluación del cumplimiento de los requisitos de la persona sobre el entorno mediante valores de utilidad. De esta superficie se obtiene la trayectoria efectuada por el sujeto, así pues, de una instancia de esta clase se genera una instancia de la **Clase Trayectoria**. El concepto y la construcción de las superficies de movimiento son explicados en profundidad más adelante. Dado que esta clase es originada tras la interacción entre instancias de la **Clase Preferencias** y de la **Clase Entorno**, clases que varían con la dimensión temporal, esta clase también será susceptible a variaciones temporales (figura 25).

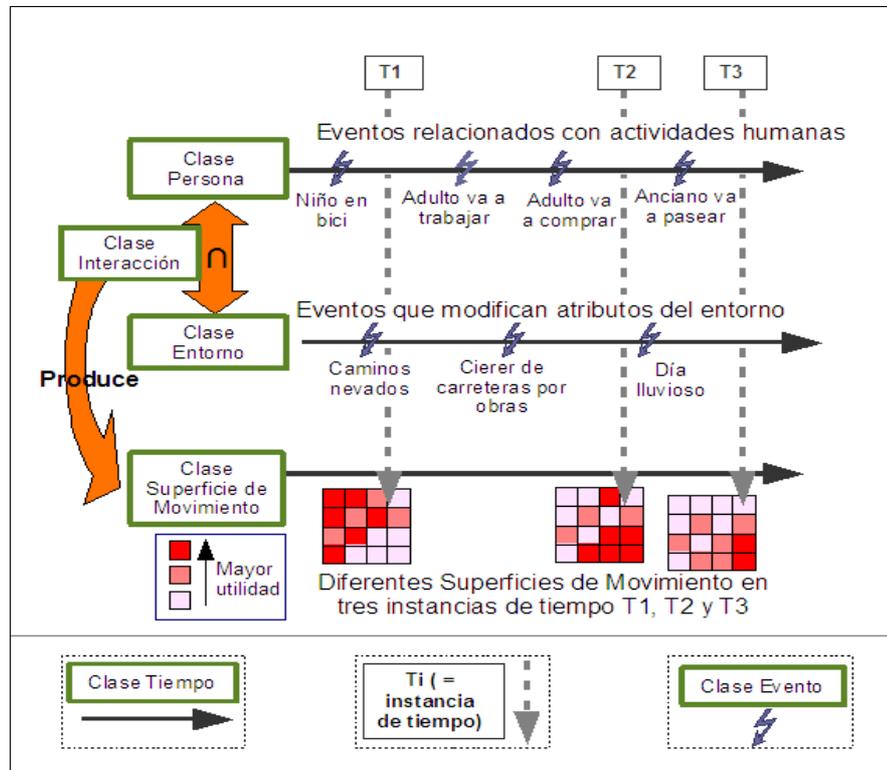


Figura 25: Variaciones de la Superficie de Movimiento por la aparición de eventos sobre el entorno y por modificación de la actividad

### 3.2.8 Clase Trayectoria

Representa el desplazamiento que realiza la persona sobre el entorno buscando los valores de máxima utilidad de la superficie de movimiento, es por tanto el resultado final del proceso de modelado. Esta clase se obtiene a partir de la Clase Superficie de Movimiento, a la que está unida mediante la relación “genera”, cuya obtención se explica en el apartado de Fase de Predicción.

## 3.3 Segunda fase: Razonamiento

La fase de razonamiento se corresponde con la obtención del comportamiento de las clases obtenidas en la fase de abstracción. En esta fase encontramos otra aportación del modelo propuesto, que consiste en la construcción de la “**función de interacción**” entre una persona y su entorno en un momento dado. Esta función evalúa cada celda del entorno según las preferencias de desplazamiento de una persona para ser elegida punto de paso.

### 3.3.1 Construcción de la “función de interacción”

La función de interacción proviene de una combinación de los siguientes procedimientos metodológicos comentados en el capítulo de fundamentos:

#### 3.3.1.1 Utilización de las fuerzas de atracción

Las fuerzas de atracción son propias de los modelos gravitacionales de accesibilidad. En el modelo propuesto las fuerzas de atracción son proporcionales a la utilidad experimentada por una persona al interactuar con una celda del entorno en un momento dado.

#### 3.3.1.2 Medidas de utilidad basada en preferencias

Una persona se desplaza para obtener un beneficio de manera que el coste derivado de ese desplazamiento sea mínimo. El beneficio aparece implícito en la necesidad o deseo de cumplir una finalidad asociada a una actividad (ocio, trabajo, compras,...). Este modelo propone como medida del coste las insatisfacciones sufridas por la persona durante la trayectoria. Para ello realiza una evaluación de la utilidad en cada punto del entorno considerando los requisitos o preferencias personales de desplazamiento.

### 3.3.1.3 Evaluación Multicriterio

Esta técnica permite la aplicación de las reglas aditivas propias del análisis de toma de decisiones multicriterio (Malczewski, 1999), (Pearce et al., 2006) sobre valores de utilidad. En el modelo propuesto la función de interacción realiza una evaluación de cada celda del terreno para ser elegida punto de paso obteniéndose un valor de utilidad para cada una. Esta evaluación es análoga a la evaluación de alternativas realizada en la toma de decisiones, asimilando las preferencias a los criterios de decisión. Dado que cada preferencia tiene un peso distinto, esta función combina las utilidades ponderadas obtenidas en cada punto del entorno según cada preferencia. Las preferencias en este modelo quedarán definidas mediante las “matrices de preferencias” que contienen las ponderaciones de cada una, y mediante las curvas de utilidad que expresan las utilidades proporcionadas por los valores de variables del entorno.

### 3.3.2 Formulación de la función de interacción

La “función de interacción” calcula la fuerza de atracción de cada punto del entorno proporcional a su utilidad total según un conjunto de preferencias o criterios para un determinado momento 't'. La persona elegirá los puntos de paso de su trayectoria de acuerdo con estas fuerzas de atracción.

Para su formulación nos hemos basado en los tres anteriores procedimientos:

1. Utilización de fuerzas de atracción: el significado de la función de interacción es análogo a la función de atracción usada los modelos gravitacionales de accesibilidad donde representan el movimiento como la resultante de fuerzas de atracción aplicadas sobre la persona. Sin embargo, mientras que en los modelos gravitacionales dichas fuerzas son proporcionales al número de oportunidades o beneficios en el punto destino, en nuestro modelo las fuerzas son proporcionales a la utilidad en cada punto del entorno.
2. Medidas de utilidad: el valor de utilidad en cada celda se calcula evaluando la manera en que los atributos en dicha celda del entorno cumplen las preferencias de la persona. Por ello hemos introducido las medidas de utilidad basadas en preferencias, que calculan la utilidad asociada a distintas alternativas en una elección realizada por una persona

en función de sus preferencias. En nuestro modelo este valor de utilidad se correspondería con la utilidad asociada a cada celda del entorno para ser elegida como lugar de paso durante su desplazamiento.

3. Evaluación Multicriterio, concretamente el método SAW, que es una técnica que permite evaluar un conjunto de alternativas (en nuestro caso son las posibles celdas por donde pasa la trayectoria) en función de un conjunto de criterios ponderados, que en nuestro modelo representan las preferencias ponderadas. Por lo tanto proporciona el cálculo del valor de utilidad para cada celda considerando preferencias con diferentes ponderaciones en función de la actividad finalidad del desplazamiento.

En resumen, la función de interacción representa el movimiento de las personas como resultante de fuerzas análogas a las de gravedad propias de modelos de accesibilidad, que en nuestro modelo son proporcionales al valor de utilidad en cada punto del entorno. Para el cálculo de estos valores de utilidad emplea el análisis de preferencias ponderadas mediante técnicas de evaluación Multicriterio. Su fórmula (5), como posteriormente muestra la tabla 6, tiene la misma forma que la función de atracción de los modelos gravitacionales y la del método SAW. Está compuesta por la suma ponderada de todas las utilidades parciales, que representan el cumplimiento de cada preferencia:

$$U_i = \sum_j P_j \cdot G_{i,j} \quad (5)$$

Donde,

- $U_i$  = utilidad total para cada punto  $i$  del entorno en el momento  $t$
- $j$  = número de requisitos asociados a la finalidad de la accesibilidad en el momento  $t$
- $P_j$  = peso del requisito  $j$  para la finalidad  $F$  (matriz de preferencias) en el momento  $t$
- $G_{(i,j)}$  = grado de cumplimiento del requisito  $j$  en el punto  $i$  del entorno en el momento  $t$ . (Es la función de utilidad)

Hay que considerar que cada punto  $i$  del entorno sobre el que se calcula la utilidad se corresponde con una celda; por lo tanto, el resultado de aplicar esta

función será una superficie discretizada mediante celdas que contienen valores de utilidad.

La tabla 6 muestra a modo de resumen de lo anteriormente expuesto, una comparativa de la función de interacción con las funciones empleadas en los procedimientos metodológicos de fundamento.

Tabla 6: Comparativa de funciones

	Accesibilidad según Modelo de gravedad (Indicador: actividades)	Cálculo de utilidad mediante Evaluación mediante regla SAW	Función de interacción
Fórmula	$A_i = \sum_j O_j \cdot f(c_{i,j})$	$A_i = \sum_j w_j \cdot x_{i,j}$	$U_i = \sum_j P_j \cdot G_{i,j}$
Que proporciona la función	$A_i$ = Medida de accesibilidad	$A_i$ = Puntuación total para cada alternativa	$U_i$ = Utilidad en cada punto del entorno
Usada para...	Accesibilidad en un punto espacial	Optimización en el problema de localización	Construcción de una superficie de movimiento mediante valores de utilidad
El cálculo es una medida que caracteriza...	El punto origen	Las celdas entorno (posibles alternativas)	Las celdas entorno (posibles puntos de paso)
Fundamento	Fuerzas de atracción del punto final j al origen i	Evaluación multicriterio + Utilidad por preferencias	Fuerzas de atracción de cada punto del entorno
Término principal de la fórmula	$f_{c_{(ij)}}$ = Impedancia de distancia entre puntos destino j y origen i	$X_{ij}$ = Utilidad parcial para cada alternativa i según cada criterio j	$G_{(i,j)}$ = Utilidad parcial para cada punto del entorno i según cada preferencia j
Término de ponderación	$O_j$ = Número de oportunidades en el punto destino j	$W_j$ = Ponderación de cada criterio o preferencia j	$P_j$ = Ponderación de cada preferencia j.

La figura 26 ilustra la anterior explicación de la obtención de la función de interacción: basándonos en la fórmula de modelos de gravedad y considerando

fuerzas proporcionales a la utilidad en cada punto del entorno, calculada mediante evaluación multicriterio, obtenemos una fórmula que calcula la utilidad en cada punto del entorno.

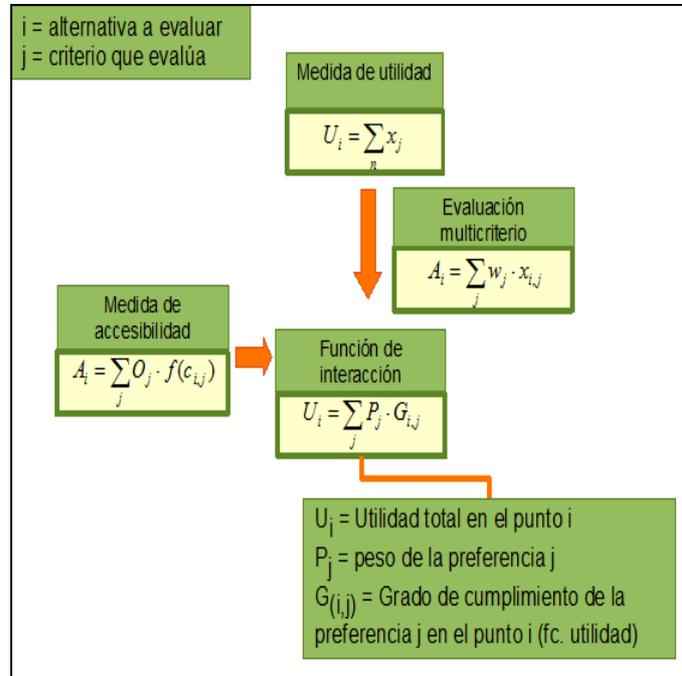


Figura 26: Obtención de la función de interacción

### 3.3.3 Cálculo de utilidades sobre celdas

Como en cualquier otra evaluación multicriterio, este cálculo del valor de utilidad sobre cada punto del entorno se realiza sobre el espacio de una manera discreta, mediante su subdivisión en celdas. Por lo tanto, como se muestra en el siguiente ejemplo de cálculo, cada punto del entorno es representado mediante una celda sobre la que se calcula cada una de sus utilidades parciales por cada preferencia y su utilidad total como suma ponderada de todas ellas.

Las utilidades parciales se calculan en base a un mismo rango normalizado, de modo que su suma ponderada permanece dentro de ese rango. El rango usado en el siguiente ejemplo va de 0, como valor mínimo de utilidad, a 10, como valor máximo de utilidad. Este mismo rango será el usado en la implementación práctica del modelo, sin embargo la visualización de estos valores calculados sobre las celdas se hará mediante un rango reducido de tres valores (utilidad baja, media y alta)

### 3.3 3.1 Ejemplo práctico de aplicación

A continuación se expone un ejemplo de cálculo de utilidad sobre un entorno a partir de las preferencias de un individuo.

En primer lugar vamos a definir el escenario:

- **Sujeto**

Como sujeto consideremos un individuo cuya finalidad es la de trasladarse de un pueblo a otro en cuyo mercado va a vender las setas que va recolectando por el camino.

- **Preferencias**

Las preferencias de desplazamiento de este individuo estarán marcadas por la finalidad de recolectar setas, por lo tanto preferirá el césped como tipo de suelo con una importancia del 50% y las zonas de mayor humedad con 40%. Supongamos que además a este individuo le parece más cómodo caminar sobre zonas más llanas frente a las más empinadas, constituyendo esto una preferencia de menor relevancia, un 10%.

Definimos estas preferencias mediante sus funciones de utilidad (representadas en las figuras 27, 28 y 29) y ponderaciones correspondientes:

#### Preferencia 1: Tipo de suelo

- Función de utilidad = F1

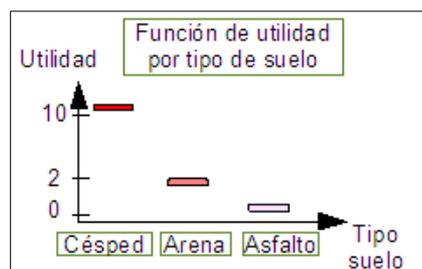


Figura 27: Función de utilidad por tipo de suelo

- Peso de la preferencia por tipo de suelo = 50%

**Preferencia 2: Grado de humedad**

- Función de utilidad = F2

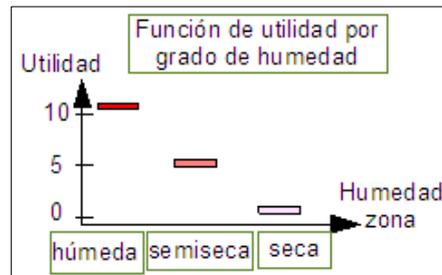


Figura 28: Función de utilidad por humedad

- Peso de la preferencia por grado de humedad = 40

**Preferencia 3: Pendiente**

- Función de utilidad = F3

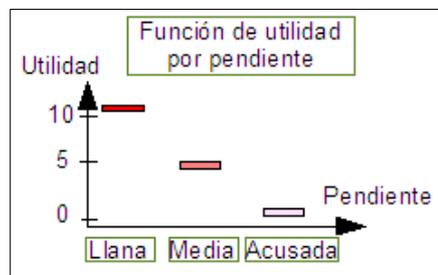


Figura 29: Función de utilidad por tipo de suelo

- Peso de la preferencia por pendiente = 10%

La tabla 7 muestra la matriz de preferencias correspondiente a la definición de preferencias para dicho individuo:

Tabla 7: Matriz de preferencias para la finalidad “recolectar setas”

	Tipo suelo	Humedad	Pendiente
Función utilidad	F1	F2	F3
Peso	50%	40%	10%

- **Entorno**

El entorno está definido por el conjunto de atributos que consideramos relevantes en la simulación del comportamiento, en este caso son tres: tipo suelo, humedad y pendiente. Como vemos en la figura 30, el entorno se describe mediante los valores de estos tres atributos para cada una de las celdas que lo componen.



Figura 30: Atributos de entorno

- **Cálculo de utilidad**

Una vez descrito el escenario, vamos a calcular la utilidad en una de las celdas del entorno mediante la función de interacción obtenida:

1- Primero extraemos los valores de los atributos de la celda en la que queremos calcular la utilidad (celda A de la figura 31)

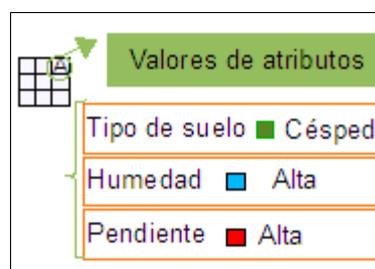


Figura 31: Valores atributos celda A

2- Posteriormente extraemos las utilidades parciales para esos valores de atributos según las funciones de utilidad que describen las preferencias:

- Preferencia "Tipo suelo": Utilidad parcial = 10
- Preferencia "Humedad": Utilidad parcial = 10

- Preferencia “Pendiente”: Utilidad parcial = 0

Una vez que tenemos las utilidades parciales ya podemos calcular la utilidad total para la celda A mediante la función de interacción (5):

$$U_i = \sum_j P_j \cdot G_{i,j}$$

$$U_{celdaA} = P_{suelo} \cdot G_{(celdaA,suelo)} + P_{humedad} \cdot G_{(celdaA,humedad)} + P_{pte} \cdot G_{(celdaA,pte)}$$

$$U_{celdaA} = 50\% \cdot 10 \quad + \quad 40\% \cdot 10 \quad + \quad 10\% \cdot 0$$

$$U_{celdaA} = 9$$

### 3.3.4 Puntos de destino, puntos de paso y constreñimientos

Como se ha explicado anteriormente, este modelo se diferencia de los modelos de gravedad en que, mientras en dichos modelos las fuerzas de atracción están solo en los puntos de destino, en este modelo propuesto se consideran fuerzas repartidas por todos los puntos del entorno. Sin embargo no hay que olvidarse que la fuerza que ejerce el punto de destino sigue estando presente en este modelo, ya que el usuario se mueve desde el punto de origen hacia el de destino por una finalidad que debe satisfacer. Habrá desplazamiento hacia dicho punto de destino con independencia de que tenga que atravesar zonas menos propicias pues la utilidad del destino final debe ser lo suficientemente grande como para compensar los costos sufridos durante dicho desplazamiento. Manteniendo la línea de razonamiento de nuestro proceso de modelado, la fuerza de atracción ocasionada por el acceso al punto de destino se representa también proporcional a la utilidad, la cual está presente desde el punto origen impulsando el movimiento hacia el destino. Para su cálculo, al ser tratada como una fuerza de atracción, los puntos del entorno más próximos al punto destino ofrecerán una utilidad mayor que los puntos más alejados generando una fuerza en dirección a dicho punto (figura 32). Por ello uno de los criterios para el cálculo de la utilidad total durante la evaluación multicriterio será la proximidad de cada punto del entorno al punto de destino, adquiriendo este criterio una ponderación relevante y variable en función de la localización.

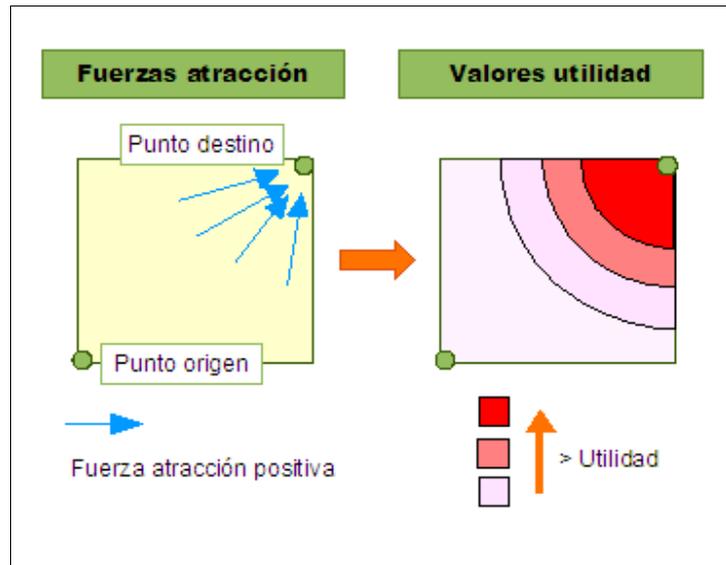


Figura 32: Utilidad debida a proximidad a los puntos de destino

Continuando con el razonamiento anterior, también lo podemos aplicar a posibles puntos de paso, capacitando a nuestro modelo para modelar trayectorias considerando imposiciones de paso por determinadas zonas (Ej.: persona que de camino al trabajo compra el periódico en un quiosco, estudiante que de camino al colegio recoge a un compañero, transportista que para a repostar en una estación determinada). De modo que la fuerza de atracción de estos puntos de paso se representará con valores de utilidad más elevados que el resto. (Figura 33)

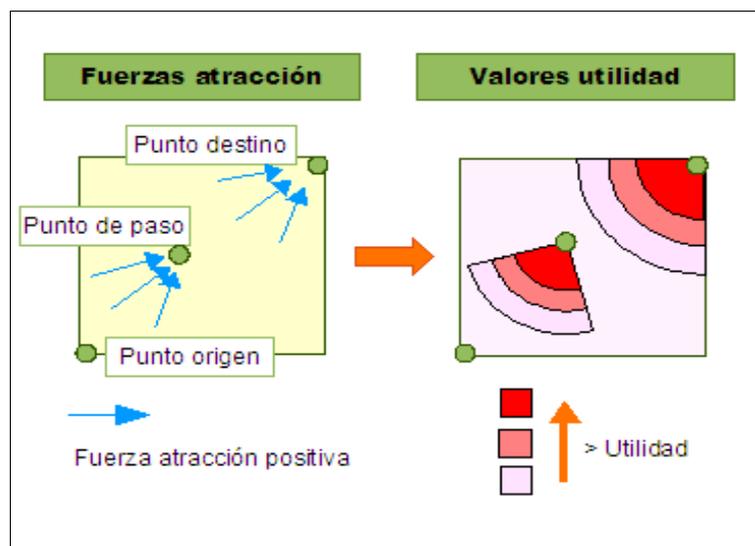


Figura 33: Utilidad debida a proximidad a los puntos de paso

Este razonamiento se aplicará posteriormente en la implementación realizada en este trabajo durante el cálculo de utilidad debida a las atracciones del

parque. Estas atracciones actuarán como puntos de paso del visitante, por lo tanto se evaluarán los distintos puntos del entorno en función de la cercanía a dichas atracciones, adquiriendo cada uno su valor de utilidad correspondiente.

De igual modo razonamos para la inclusión de constreñimientos o limitaciones, es decir, zonas y puntos a evitar durante el desplazamiento (Ej.: zonas de vertederos durante una visita turística, zonas de altas temperaturas en el transporte de mercancías inflamables, zonas valladas durante un paseo). Si los puntos de paso y puntos destino ejercen una fuerza de atracción positiva hacia ellos, los puntos no deseados ejercerán una fuerza repulsiva. Si los puntos de atracción positiva se representaban mediante valores de utilidad altos, los puntos de atracción negativa se representarán mediante descensos de utilidad respecto los demás.

Incluso podemos considerar otro tipo de constricciones, las zonas que generan atracción, pero que no puedan ser atravesadas como por ejemplo un lago.

La figura 34 muestra los dos tipos de constricciones, una zona que produce una atracción negativa como es un vertedero y otra que ejerciendo una atracción positiva pero que es una zona de imposible transición como un lago.

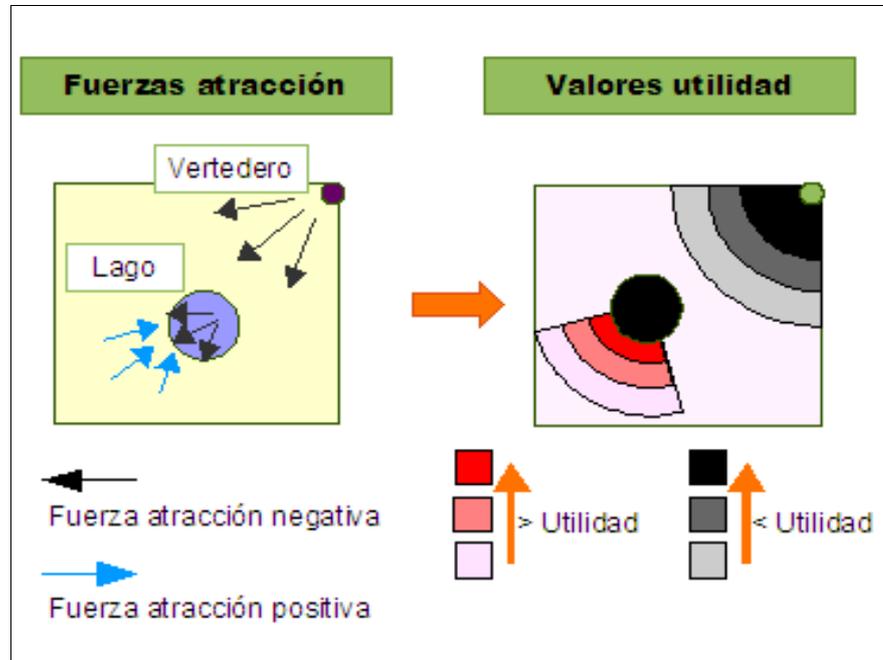


Figura 34: Zonas de atracción negativas o constreñimientos

### 3.4 Tercera fase: Predicción

El hombre construye los modelos para poder explicar y predecir los fenómenos que observa en la vida real, que en el caso de esta tesis se trata de predicciones sobre los desplazamientos efectuados por las personas.

Una vez alcanzadas las dos primeras fases de este modelado, habremos obtenido las principales componentes actuantes en el fenómeno del desplazamiento de las personas, y el razonamiento que rige su movimiento a través de la interacción realizada con su entorno. Por lo tanto, en esta tercera fase, ya podremos realizar posibles predicciones sobre desplazamientos de personas en un entorno y obtener las trayectorias resultantes.

#### 3.4.1 Generación de superficies de movimiento

Hemos abordado esta fase de predicción mediante la principal aportación de la tesis: las “**superficies de movimiento**”. Las superficies de movimiento surgen ante la necesidad de representar los componentes definidos en nuestro modelo (personas, entorno, tiempo) y los valores de utilidad resultantes de aplicar la función de interacción. Para ello nos hemos basado en los modelos de representación de los flujos de agua (superficies de confluencia de flujo), también basados en fuerzas gravitacionales: así como una gota de agua se desliza por una superficie buscando las máximas pendientes, una persona se moverá por un entorno buscando las máximas utilidades.

La superficie de movimiento abarca el entorno donde se encuentran los puntos origen y destino del desplazamiento y permite simular la trayectoria efectuada entre estos dos puntos. La manera de simular dicha trayectoria partiendo de la superficie de movimiento es análoga al cálculo del recorrido del agua partiendo de su superficie de confluencia de flujo que se basa, como muestra la imagen 35, en que el flujo se dirige hacia los puntos más bajos por la mayor pendiente.

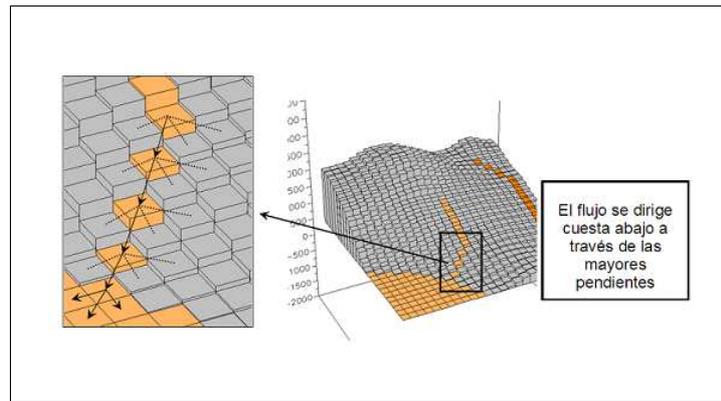


Figura 35: Discurso del agua por una superficie buscando las mayores pendientes

Fuente: Berry, 2005

Por lo tanto, las superficies de movimiento nos permiten materializar la analogía entre flujo y desplazamiento de personas a la que numerosos autores de investigaciones se refieren. La figura 36 muestra un esquema de dicha materialización.

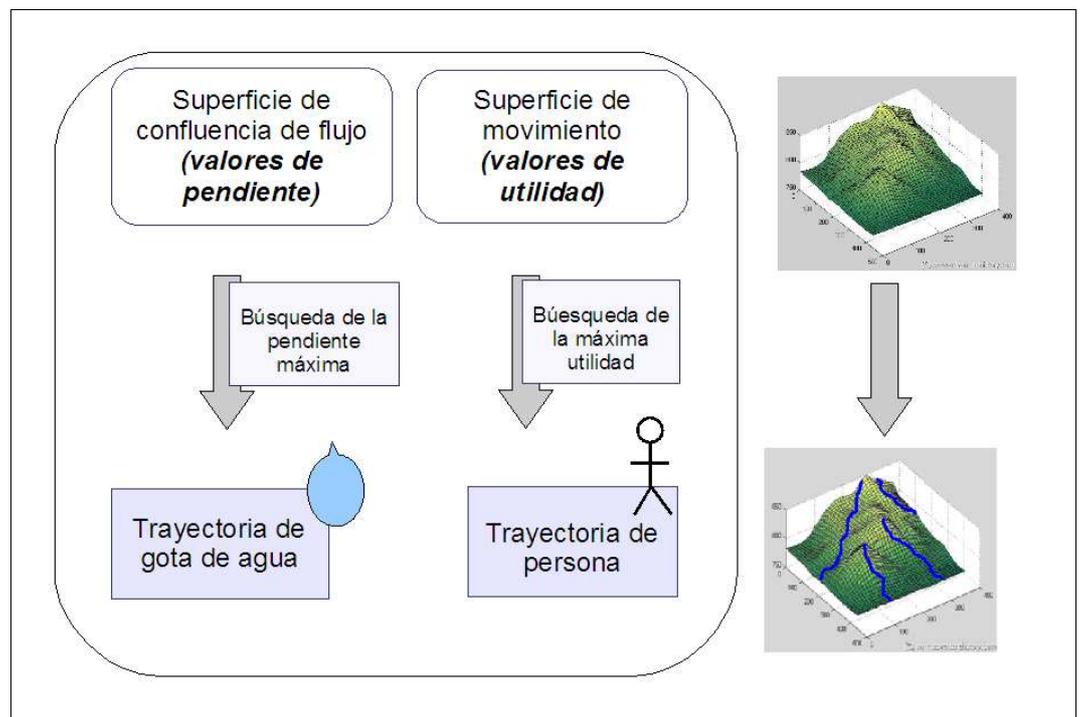


Figura 36: Analogía entre flujo y trayectoria

(Imagen del MDT extraída de <http://www.adventurehistory.com/>)

### 3.4.2 Predicción de la trayectoria

Por tanto, el cálculo de la trayectoria busca sucesivamente los valores de mayor utilidad entre las celdas colindantes hasta llegar al punto de destino, y en situaciones con celdas de valores iguales de utilidad se buscarán las mayores utilidades en el entorno extendido de la superficie de movimiento (figura 37).

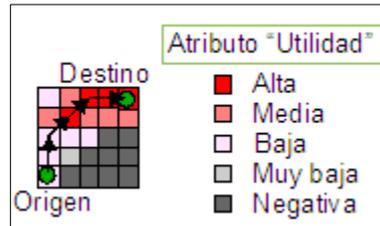


Figura 37: Extracción de la trayectoria buscando las máximas utilidades en la superficie de movimiento

Este cálculo de trayectoria mediante la búsqueda sucesiva de los mayores valores de utilidad en las celdas próximas se realiza mediante el bucle expresado en la figura 38, que itera la búsqueda de máxima utilidad hasta llegar al punto destino.

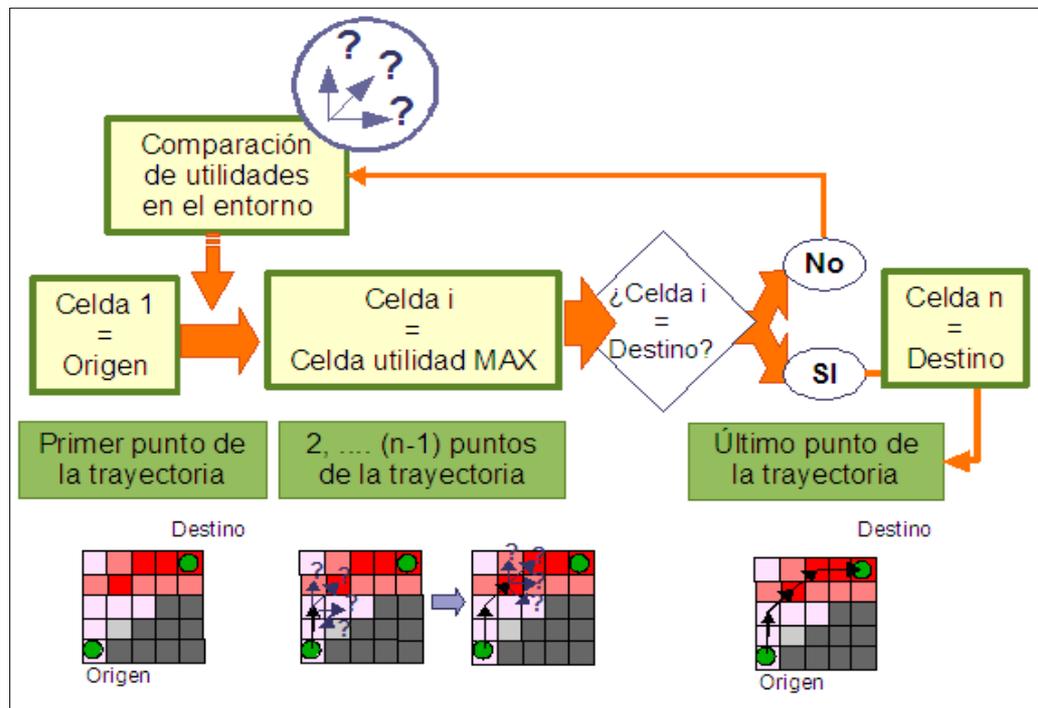


Figura 38: Cálculo de la trayectoria mediante la sucesiva búsqueda de valores máximos de utilidad en la superficie de movimiento

### 3.4.3 Predicción a partir de un escenario definido

En general, la técnica de predicción, que establece o describe la probabilidad de ocurrencia de un proceso, se encuentra sujeto al conjunto de circunstancias que se consideran en torno ese proceso, es decir a su escenario. Por tanto, para obtener predicciones primero hay que definir el escenario sobre el que se están aplicando. En nuestro modelo el escenario queda definido mediante el sujeto y sus preferencias, el entorno en el que se encuentra, los eventos actuantes en ese momento y el punto de destino. Y a partir de la definición de este escenario estaremos en posición de efectuar previsiones de trayectoria aplicadas sobre él.

En este trabajo de tesis se plantea en el capítulo 4 de implementación, una definición de escenario real a partir de los desplazamientos de los visitantes al parque Dwingelderveld, a partir del cual realizaremos previsiones de desplazamiento.

### 3.4.4 Clasificación del modelo en cuanto al tipo de predicción

Esta fase de predicción es la que confiere a nuestro modelo el carácter de modelo de simulación. Revisando otros modelos de simulación, podemos decir que el nuestro cumple con los cuatro aspectos distintivos de los modelos de tráfico típicos de geosimulación: (1) consideración del tiempo en el sentido que las entidades simuladas reaccionan de acuerdo a las condiciones ambientales en un momento determinado, (2) posibilidad de aplicación en escalas microscópicas permitiendo simulaciones muy detalladas a nivel de peatones o vehículos, (3) habilidad de desarrollar simulaciones basadas en entidades partiendo de sus características o atributos individuales y (4) concepción de una interacción localizada como flujo existente entre las entidades modeladas (Torrens, 2004).

En cuanto a la incertidumbre de predicción, los modelos de simulación se dividen fundamentalmente en dos tipos, los deterministas y los estocásticos o probabilistas (Fotheringham & Wegener, 2000):

- Modelo determinista: Formalización de un fenómeno de la vida real precisando la conducta exacta y valores de variables de cada componente, sin dejar entrar el concepto de probabilidad en la predicción. Es decir, para un escenario definido solo existe una posible predicción.
- Modelos estocásticos o probabilistas: Formalización de un fenómeno de la vida real en la cual los valores de las variables de sus componentes no son

conocidos de manera precisa y por tanto la predicción del modelo no es una solución única sino un rango de posibles soluciones.

Para enmarcar nuestro modelo en uno de estos dos modelos, en primer lugar consideramos que en su fase de conceptualización hemos partido de un modelo de elección de alternativas. Este modelo de partida que materializa las preferencias personales mediante funciones de utilidad, ofrece la alternativa de mayor probabilidad en función de las preferencias de un potencial usuario (Timmermans et al. 1984). Esto sitúa en un principio a nuestro modelo más cercano a un modelo probabilista que determinista, lo que conllevaría que obtengamos simulaciones dentro de un cierto grado de probabilidad. Sin embargo explicaremos más adelante que para asegurar exhaustivamente la clasificación de un modelo como probabilista se requiere un estudio estadístico que proporcione un modelo de probabilidad para calcular el nivel de confianza para las desviaciones. Por ello clasificamos al modelo como un modelo aproximado que proporciona trayectorias dentro de un rango de exactitud que variará en función de la escala considerada.

Además consideramos que estamos ante la modelización de un comportamiento humano, caracterizado por su imprevisibilidad y susceptibilidad frente a una infinidad de factores (Cziko, 1989) entre los que podemos encontrar posibles eventos imprevisibles propios de las personas y no contemplados en el modelo. Dado que un modelo es una simplificación de la realidad, no puede contemplar un número ilimitado de factores ya que sería tan complejo que necesitaríamos a su vez de otro modelo para entenderlo.

En definitiva encontraremos una cierta incertidumbre que atañe a la interpretación de las previsiones de trayectorias obtenidas, por lo que las superficies de movimiento representan las de tendencia de desplazamiento mostrando aquellas trayectorias más probables.

### **3.5 Conclusiones**

Las conclusiones de este capítulo dan respuesta a los tres interrogantes de investigación planteados en el capítulo 1 de introducción que a continuación se exponen:

1. ¿Cuáles son las principales clases actuantes en el fenómeno del desplazamiento de las personas?

La respuesta a esta pregunta se obtiene en la primera fase de metodología, en la cual se determinan las siguientes clases principales en el fenómeno a modelar: persona, preferencias, interacción, entorno, tiempo, evento, superficie de movimiento, trayectoria. Además en esta primera fase han quedado todas estas clases relacionadas entre sí: una persona caracterizada por un conjunto de preferencias interactúa mediante la clase interacción con un entorno en un instante de tiempo dado en el que los eventos que ocurren determinan tanto los valores de las preferencias como los del entorno. Resultado de esta interacción surge la superficie de movimiento de cuyos valores de utilidad resulta la trayectoria.

2. ¿Cómo actúan e interactúan las clases abstraídas para producir el movimiento espontáneo?

Esta pregunta se responde con la conclusión que nos permite conceptualizar el fenómeno de los desplazamientos mediante fuerzas de atracción proporcionales a valores de utilidad. Mientras que puntos deseados del entorno ejercen fuerzas de atracción positiva con valores altos de utilidad, los no deseados o constreñimientos constituyen fuerzas de atracción negativa o repulsiva con descensos en valores de utilidad. Para el cálculo de estas fuerzas proporcionales a la utilidad recibida se ha desarrollado la función de interacción, que representa interacción de una persona y su entorno (percepción y evaluación del entorno por la persona), y tiene como resultado la superficie de movimiento

3. ¿Cómo hacer previsiones de desplazamiento espontáneo en un escenario definido?

La manera de hacer previsiones de desplazamiento en un escenario definido parte de la premisa de que el sujeto siente una fuerza de atracción ocasionada por la utilidad de acceder al punto de destino para satisfacer una finalidad en dicho punto.

El escenario queda definido mediante el sujeto y sus preferencias correspondientes a la finalidad del desplazamiento, el entorno en el que se encuentra y los eventos actuantes en ese momento. A partir de la definición del escenario se calcula la superficie de movimiento mediante el cálculo de los valores de utilidad en cada punto del entorno y cuyo resultado es la previsión de la trayectoria. El cálculo de esta trayectoria se basa en maximizar la utilidad durante

el desplazamiento, por lo que se sigue la misma técnica que en la simulación de un fluido sobre las superficies de confluencia de flujo mediante la búsqueda de la máxima pendiente.

## **Capítulo 4. Implementación**

---

Este capítulo recoge la implementación efectuada sobre el modelo obtenido en el anterior capítulo de metodología. En primer lugar muestra la implementación realizada mediante herramientas de formalización de clases y reglas de comportamiento (Protégé y Jess), que han permitido obtener una descripción formal de la estructura de clases resultantes de la fase de abstracción. En segundo lugar presenta la elaboración de una aplicación Java que implementa el mecanismo del modelo, permitiendo realizar simulaciones a partir de un escenario real definido.

---

## 4.1 Introducción

La descripción del modelo obtenido tras el desarrollo de la metodología es puramente teórica, que no permite su uso de una manera práctica, ni su experimentación sobre escenarios de la vida real. Este capítulo propone materializar la descripción teórica mediante una implementación tangible que nos permita aplicar los conceptos establecidos y constatar el correcto funcionamiento del modelo.

Hemos estructurado la implementación en las tres siguientes etapas que serán desarrolladas en profundidad a lo largo de este capítulo:

- La primera etapa de implementación está orientada a la fase de abstracción descrita en el capítulo de metodología, produciendo una formalización de las clases abstraídas mediante su integración en la herramienta Protégé. Además se han formalizado las reglas de comportamiento entre clases dentro de un sistema experto (Jess) para que calcule de una manera automática según esas reglas la superficie de movimiento correspondiente a cada escenario definido.
- La segunda etapa de implementación está dirigida a las fases de razonamiento y predicción, integrando los conceptos teóricos obtenidos de estas fases en una aplicación Java realizada dentro de esta tesis.
- Por último, en la tercera etapa de implementación se han integrado los datos procedentes de un escenario real en la anterior aplicación desarrollada para comprobar el funcionamiento del modelo.

Para la descripción de estas tres etapas de implementación se ha estructurado el presente capítulo en los siguientes epígrafes:

- Implementación de la fase de abstracción con Protégé y Jess
- Implementación de las fases de razonamiento y predicción en una aplicación Java
- Implementación del modelo en un escenario real

Este capítulo dará respuesta a los siguientes objetivos de investigación:

- Materialización del modelo propuesto mediante aplicaciones prácticas
- Puesta en práctica de estas aplicaciones sobre los datos de un escenario real.

## **4.2 Implementación de la fase de abstracción con Protégé**

Los resultados de la fase de abstracción se corresponden con el conjunto de clases que componen el modelo, además de sus respectivas propiedades y relaciones internas. La implementación de estas clases produce una descripción formal de las entidades actuantes en el fenómeno a modelar y de sus propiedades y relaciones. Para ello hemos usado Protégé, una herramienta de acceso libre para el desarrollo de ontologías y sistemas basados en el conocimiento que se explica a continuación con mayor profundidad.

---

### 4.2.1 Breve descripción de Protégé

Protégé<sup>2</sup> es una herramienta libre y de código abierto que está desarrollada en Java por la Universidad de Stanford. Es extensible y proporciona un ambiente “plug-and-play” que la convierte en una base flexible y rápida para la creación de prototipos y desarrollo de aplicaciones.

Esta herramienta encuentra su aplicación en el campo perteneciente a los sistemas de representación y procesamiento automático del conocimiento y las aplicaciones desarrolladas con ella son empleadas frecuentemente en resolución de problemas y toma de decisiones orientadas a dominios específicos. Está mantenida por una gran comunidad de desarrolladores, académicos, gobiernos y usuarios corporativos que la están usando para obtener soluciones basadas en conocimiento en áreas tan diversas como biomedicina, recopilación de información actualizada y relevante (proceso conocido con el término anglosajón “intelligence gathering”) y modelado de empresas.

La plataforma de Protégé se enfrenta a los procesos de modelado mediante dos modalidades principales: Protégé-OWL y Protégé-Frames, siendo esta última la que se ha utilizado en esta tesis.

Con Protégé se puede representar el mundo como una colección de objetos que tienen ciertos atributos, funcionalidades y relaciones con otros objetos. Los objetos son el principal elemento constitutivo de las bases de conocimiento y sirven para representar, tanto elementos físicos (entidades tangibles), como conceptos (entidades abstractas). Los objetos se relacionan entre sí para capturar las interacciones y relaciones que existen entre las entidades que representan.

La herramienta Protégé emplea una interfaz de usuario que facilita la creación de una estructura de “frames” mediante la creación de un proyecto en Protégé. Un proyecto Protégé consiste en el desarrollo de una ontología o estructura de conocimiento mediante la integración de diversos elementos que fundamentalmente son clases, slots, formularios, instancias y consultas (aunque la herramienta es modular y permite adicionar más componentes de una forma sencilla). En Protégé las clases representan un grupo o una colección de objetos que reúnen las mismas características atendiendo a las cuales se ha realizado la clasificación. Una instancia es un objeto específico creado a partir de una clase

---

2 <http://protege.stanford.edu/>

mediante la asignación de valores a los atributos o slots que la definen. Los formularios son la utilidad que ofrece Protégé para la introducción de información en las diferentes instancias de nuestra estructura de conocimiento. Cada clase creada tendrá su propio formulario, el cual es creado inicialmente de forma automática por Protégé, pero puede ser fácilmente modificado.

#### **4.2.2 Formalización de las clases en Protégé**

Como resultado de este proceso de formalización hemos obtenido las clases actuantes, asociadas a sus correspondientes propiedades y atributos y las relaciones existentes entre las mismas.

Protégé tiene un módulo de razonamiento (llamado “*reasoning*”) que nos permite detectar posibles incongruencias en el diseño del modelo. Una vez que se tiene el modelo implementado y se ha pasado el proceso de razonamiento sin encontrar ninguna inconsistencia, se puede proceder a la obtención visual de la formalización realizada. Protégé tiene diversos módulos para visualizar el resultado de la fase de abstracción, obteniendo las clases y relaciones entre ellas. En este trabajo se ha usado el módulo “*Jambalaya*” y la imagen de la figura 39 muestra el gráfico que ha proporcionado tras la implementación de clases realizada en Protégé y sus relaciones.

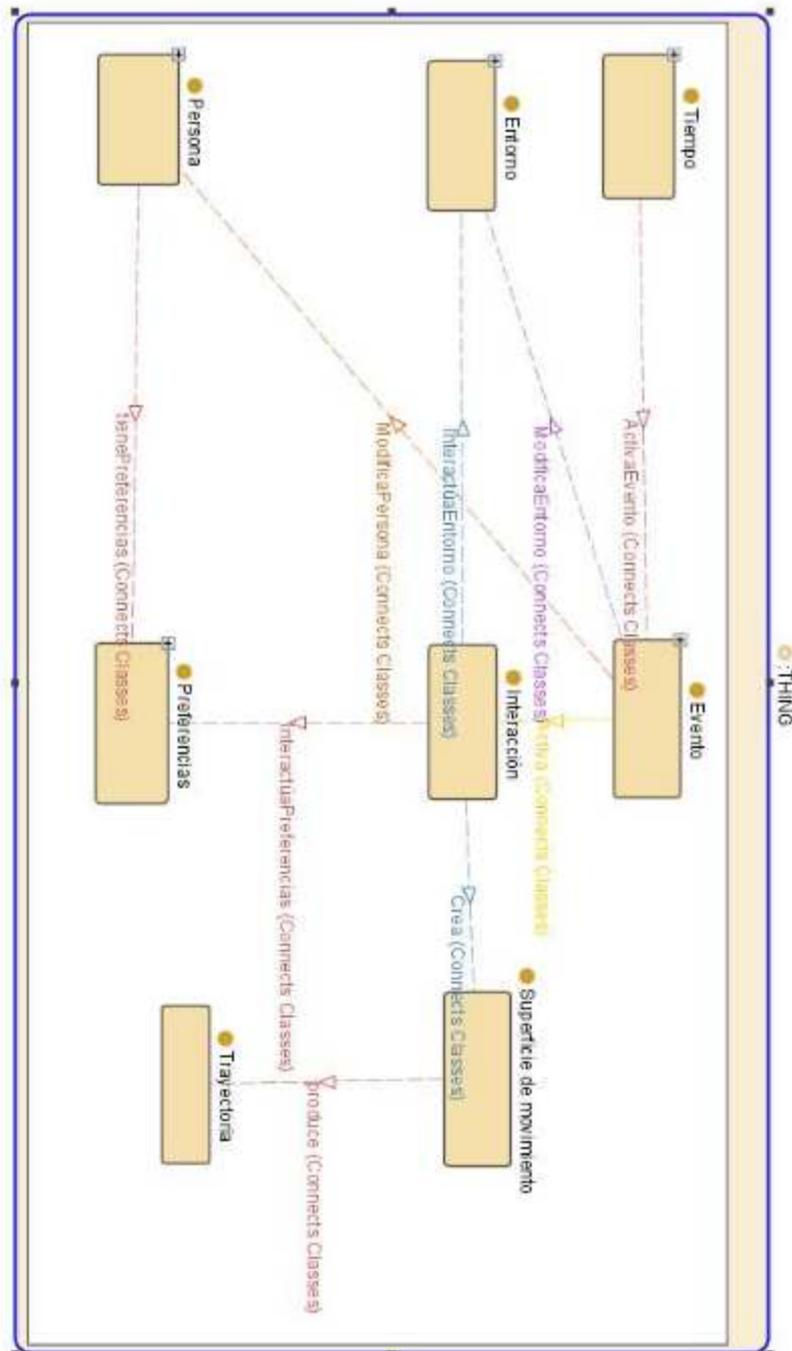


Figura 39: Visualización en Jambalaya de la implementación en Protégé

#### 4.2.3 Formalización de reglas con Protégé

Además de la implementación de clases, se han implementado en Protégé algunas instancias de estas clases y las reglas y funciones que definen su comportamiento, lo que nos han permitido experimentar la interacción entre

clases y comprobar su correcto funcionamiento. Esto se ha realizado mediante Jess<sup>3</sup>, un sistema experto que puede ser utilizado mediante un plugin dentro de Protégé. Un sistema experto es, desde el punto de vista conceptual, un campo de los sistemas basados en conocimiento dentro del ámbito más general de la inteligencia artificial (figura 40). Desde el punto de vista práctico es un software cuyo objetivo es el de reproducir comportamiento humano dentro de un dominio de problema específico.

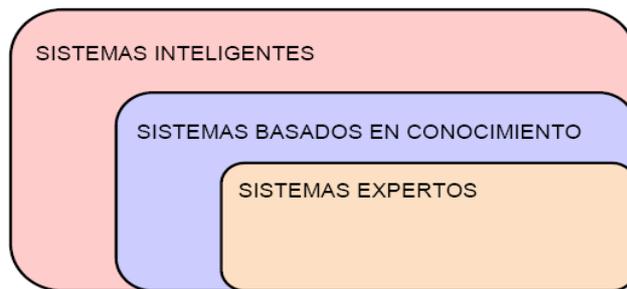


Figura 40. Marco de los sistemas expertos  
(Julio Villena Román, 2008<sup>4</sup>)

#### 4.2.3.1 Implementación en el sistema experto Jess

Mediante esta implementación se han formalizado las pautas de comportamiento entre clases dentro de un sistema experto para que calcule, de una manera automática y según esas pautas, la superficie de movimiento correspondiente a cada escenario definido.

El escenario que determina cada superficie de movimiento está definido por la terna persona, entorno y tiempo. Y además hay que considerar que cada instancia de tiempo (o momento) actúa como un disparador o activador de eventos que modifican entorno y persona.

Los posibles escenarios sobre los que el sistema experto calcula la superficie de movimiento son diversos contextos de desplazamiento, a diversas horas del día y para realizar diversas actividades, en los que se calcula la utilidad en diversos puntos del entorno para diferentes personas teniendo en cuenta sus preferencias de desplazamiento según rapidez, seguridad o paisaje. Los momentos

<sup>3</sup> <http://www.jessrules.com/>

<sup>4</sup> [www.it.uc3m.es/jvillena/irc/material/03.pdf](http://www.it.uc3m.es/jvillena/irc/material/03.pdf)

en los que se realiza dicho cálculo son las horas a lo largo del día en las que ocurren varios fenómenos atmosféricos como lluvia, sale el sol, salen nubes o sale el arco iris y en las que se desarrollan varias actividades humanas como ir a trabajar, de compras o a pasear. Además hay que considerar que estas actividades son desarrolladas en un horario diferente según cada persona para la que se calcula la superficie de movimiento. Como veremos a continuación estos posibles escenarios se obtienen de la combinación de una serie de instancias que se han definido para la comprobación de este sistema experto.

El sistema experto calcula superficies de movimiento a partir de instancias de persona, entorno y tiempo teniendo en cuenta las siguientes reglas y función que representan las relaciones entre clases expresadas en la figura 41:

- regla: Tiempo activa Evento.
- regla: Evento (subclase “Evento sobre entorno”) modifica Entorno
- regla: Evento (subclase “Actividad humana”) modifica Preferencias de Persona.
- Función: Función de Interacción, teniendo como *input*: Persona y Entorno, y como *output*: valor de utilidad en superficie de movimiento.

El código en Jess para la definición tanto de estas reglas y funciones como de las clases e instancias se encuentra en el anejo I.

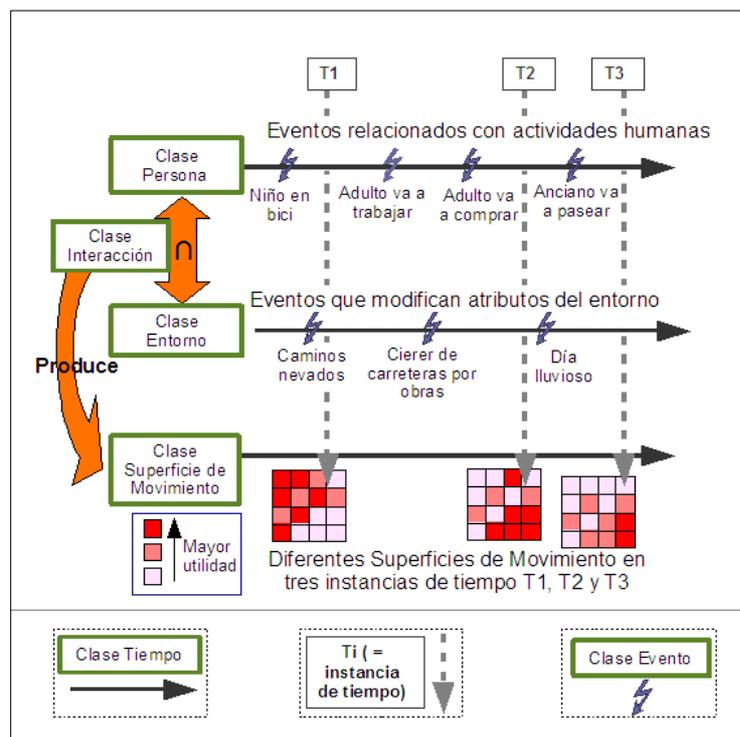


Figura 41: Relaciones entre Persona, Entorno, Tiempo y Superficie de movimiento

#### 4.2.3.2 Regla “tiempo” activa “eventos”

Las instancias de tiempo son cada uno de los momentos para los que se calcula la superficie de movimiento. Cada una de estas instancias o momentos activan los pertinentes eventos, lo que en nuestro modelo se traduce en cambiar el valor de estado de OFF a ON, lo que provocará una serie de modificaciones, tanto en el entorno, como en las personas. En la implementación de reglas con Jess se han escogido los siguientes eventos clasificados en dos subclases de eventos:

- eventos relacionados con entorno: sale el sol, lluvia, nublado, sale el arco iris
- eventos relacionados con actividades humanas: ir a trabajar, ir a pasear, ir de compras

Cada uno de estos eventos está asociado a un intervalo definido por una hora de inicio y una hora de finalización, por lo tanto cuando el momento en el que se calcula la superficie de movimiento esté comprendido en un intervalo de ocurrencia de algún evento, dicho evento será activado y su valor de estado cambiará de OFF a ON. La figura 42 ilustra esta regla para eventos relacionados con el entorno y la figura 43 lo hace con aquellos relacionados con las actividades humanas.

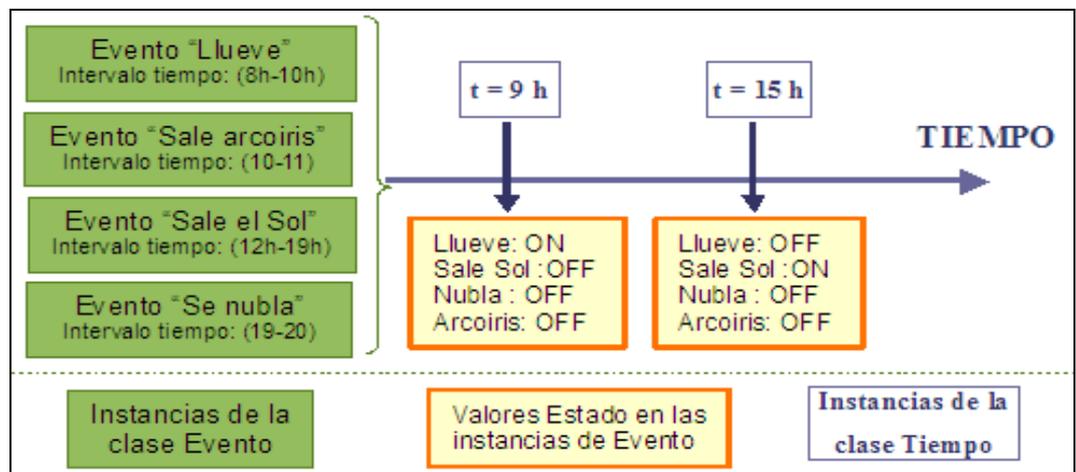


Figura 42: Esquema de la regla de “Tiempo activa eventos” para eventos relacionados con el entorno

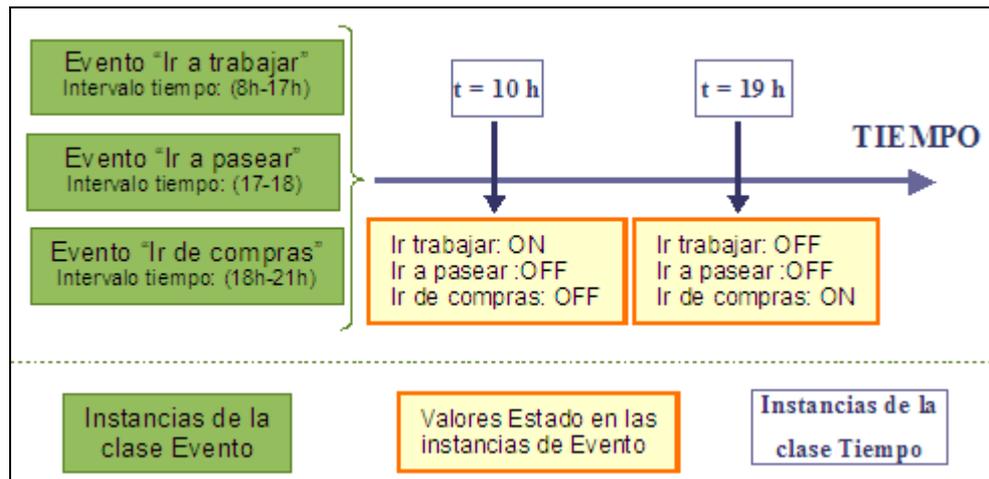


Figura 43: Esquema de la regla de “Tiempo activa actividad” para eventos relacionados con actividades

#### 4.2.3.3 Regla “evento” modifica “entorno”

Las instancias de la subclase “eventos relacionados con el entorno” producen variaciones en instancias de la clase “entorno”, modificando los valores de sus atributos. En la implementación de reglas con Jess se han escogido los siguientes atributos de entorno relacionados con desplazamientos:

- paisaje
- rapidez
- seguridad

Estos atributos variarán en cada momento en función del evento que acontezca. Por ejemplo, el atributo paisaje tendrá un valor alto cuando salga el arco iris, y un valor bajo cuando esté lloviendo. O el atributo seguridad tendrá un valor alto cuando esté soleado y un valor bajo cuando esté lluvioso.

#### 4.2.3.4 Regla “actividad” modifica “preferencias”

Las instancias de la subclase “eventos relacionados con actividades” producen variaciones en instancias de la clase de “preferencias” de las personas, que describen los valores de atributos de entorno preferidos para cada actividad. Por tanto las preferencias de desplazamiento por paisaje, rapidez y seguridad estarán en función de la actividad que realiza la persona. Por ejemplo durante la actividad “ir a trabajar” la preferencia por rapidez tendrá un valor alto, mientras que la preferencia por paisaje tendrá un valor bajo. Sin embargo durante la

---

actividad “ir a pasear” la preferencia por paisaje tendrá mayor valor que la preferencia por rapidez.

#### 4.2.3.5 Función de Interacción

Durante la función de interacción las preferencias de la persona sujeto del desplazamiento interactúan con los atributos del entorno, obteniéndose un valor de utilidad sobre el entorno que valora la medida en que los atributos del entorno cumplen las preferencias de la persona. Esta función de interacción produce la superficie de movimiento, cuyos valores de utilidad serán los resultantes de calcular esta función. Se ha implementado la función de interacción de una manera simplificada, de manera que devuelva el valor de utilidad tras comprobar el número de criterios que se cumplen en el entorno según las preferencias de la persona, considerando el mismo peso para cada una de ellas.

#### 4.2.3.6 Validación de la función y reglas implementadas

Para la comprobación de este sistema experto se han definido una serie de posibles escenarios mediante la combinación de las instancias de Persona, Entorno y Tiempo que se describen a continuación.

Por un lado se han definido dos instancias de la clase Persona (“Pluto” y “Leo”), cuyas preferencias de desplazamiento están afectadas por las siguientes actividades: ir a trabajar, ir a pasear e ir de compras. Pero hay que tener en cuenta que son personas individuales y cada una tiene un horario distinto para realizar estas actividades (Goodchild et al., 1993), (Goodchild, 1998):

- Instancia de Persona: Pluto
  - Horario para “Ir a comprar”: 8h-12h
  - Horario para “Ir a pasear”: 12h – 20h
- Instancia de Persona: Leo
  - Horario para “Ir a trabajar”: 8h-16h
  - Horario para “Ir a pasear”: 16h-20h

Así mismo se han generado dos instancias de Entorno (“El Cerro” y “El Valle”) en las que se calculará el valor de utilidad mediante la interacción de sus atributos de entorno en función del evento que acontece y de las preferencias de la persona en función de su actividad realizada en un momento determinado. Como

son dos instancias de entorno distintas, estarán afectadas por diferentes eventos relacionados con el entorno y en momentos dispares:

- Instancia de Entorno: “El Cerro”
  - Sale el sol: 8h-13h
  - Se nubla: 13h – 20h
- Instancia de Entorno: “El Valle”
  - Llueve: 8h-10h
  - Sale el sol: 10h-18h
  - Sale el arco iris: 18h-19h

Una vez definidos los componentes que integran el escenario para el que se calcula la superficie de movimiento (persona, entorno, momento) calculamos, mediante el sistema experto, el valor de utilidad de dicha superficie de movimiento en varios escenarios posibles:

- **Escenario 1:** Persona = Pluto; Entorno = El Valle; Momento = 9h
- **Escenario 2:** Persona = Leo ; Entorno = El Valle; Momento = 9h
- **Escenario 10:** Persona = Pluto; Entorno = El Cerro; Momento = 9h
- **Escenario 11:** Persona = Leo ; Entorno = El Cerro; Momento = 9h
- **Escenario 3:** Persona = Pluto; Entorno = El Valle; Momento = 17h
- **Escenario 5:** Persona = Leo ; Entorno = El Valle; Momento = 17h
- **Escenario 6:** Persona = Pluto; Entorno = El Cerro; Momento = 17h
- **Escenario 7:** Persona = Leo ; Entorno = El Cerro; Momento = 17h
- **Escenario 8:** Persona = Pluto; Entorno = El Valle; Momento = 19h
- **Escenario 9:** Persona = Leo ; Entorno = El Valle; Momento = 19h
- **Escenario 12:** Persona = Pluto; Entorno = El Cerro; Momento = 19h
- **Escenario 10:** Persona = Leo ; Entorno = El Cerro; Momento = 19h

En primer lugar (1) vamos a calcular manualmente el valor de utilidad que correspondería a la superficie de movimiento para cada uno de estos escenarios y (2) posteriormente vamos a mostrar el resultado que devuelve el sistema experto Jess con la aplicación de reglas definidas, tras lo cual comprobaremos que ambos coinciden.

**(1) Cálculo manual**

Las tablas 8 y 9 recogen los valores de atributos de entorno para cada evento y los valores de preferencias para cada actividad a partir de los cuales calcularemos el valor utilidad.

Tabla 8: Preferencias sobre características de entorno según actividad a realizar

		<b>Preferencias de valores entorno</b>		
		Paisaje	Seguridad	Rapidez
<b>Actividades</b>	Compras	2	2	2
	Pasear	3	2	1
	Trabajar	1	2	3

Tabla 9: Valores de características de entorno según eventos actuantes

		<b>Valores entorno durante cada evento</b>		
		Paisaje	Seguridad	Rapidez
<b>Eventos</b>	Sale sol	3	3	3
	Lluvia	2	1	1
	Sale arco iris	3	2	1
	Llegan nubes	3	1	1

Vamos a hacer el cálculo para el escenario 1, que esta definido por: Persona = Pluto; Entorno = El Valle; Momento = 9h, mediante los siguientes pasos:

1. Primero se determinan los eventos y actividades que acontecen a las 9 horas según las tablas de horarios expuestas anteriormente (Este paso se corresponde con la regla que activa eventos y actividades):

- Actividad que realiza Pluto a las 9h: Ir de compras
- Evento que ocurre sobre El Valle a las 9h: Llueve

2. Se determinan las preferencias de entorno durante la actividad “ir de compras” (Este paso se corresponde con la regla actividad modifica preferencias):

- Preferencia por paisaje: 2
- Preferencia por seguridad: 2
- Preferencia por rapidez: 2

3. Se determinan los valores del entorno durante el evento “lluvia” (Este paso se corresponde con la regla “evento modifica entorno”):

- Paisaje: 2
- Seguridad: 1
- Rapidez: 1

4. Se calcula la utilidad que recibe Pluto a las 9 horas, hora en la que su actividad es ir de compras, en El Valle, donde a esa hora el evento imperante es la lluvia (este paso se corresponde con la función de interacción). La función de interacción compara los valores del entorno con los deseados según las preferencias. Por la característica de seguridad no recibe ninguna utilidad ya que el valor deseado (2) no se corresponde con el existente en el entorno (1), y lo mismo ocurre con la rapidez, cuyo valor deseado (2) tampoco se corresponde con el existente en el entorno (1). Sin embargo por paisaje si recibe utilidad, ya que el valor deseado (2) es el mismo que el existente (2). Por lo tanto, según la función de interacción para este escenario, la utilidad toma el valor de 1, que será el valor que adquiera la superficie de movimiento en ese punto.

Procedemos de igual manera con el resto de los escenarios según se describe en la figura 44, en la que se muestran los resultados correspondientes a cada uno de ellos.

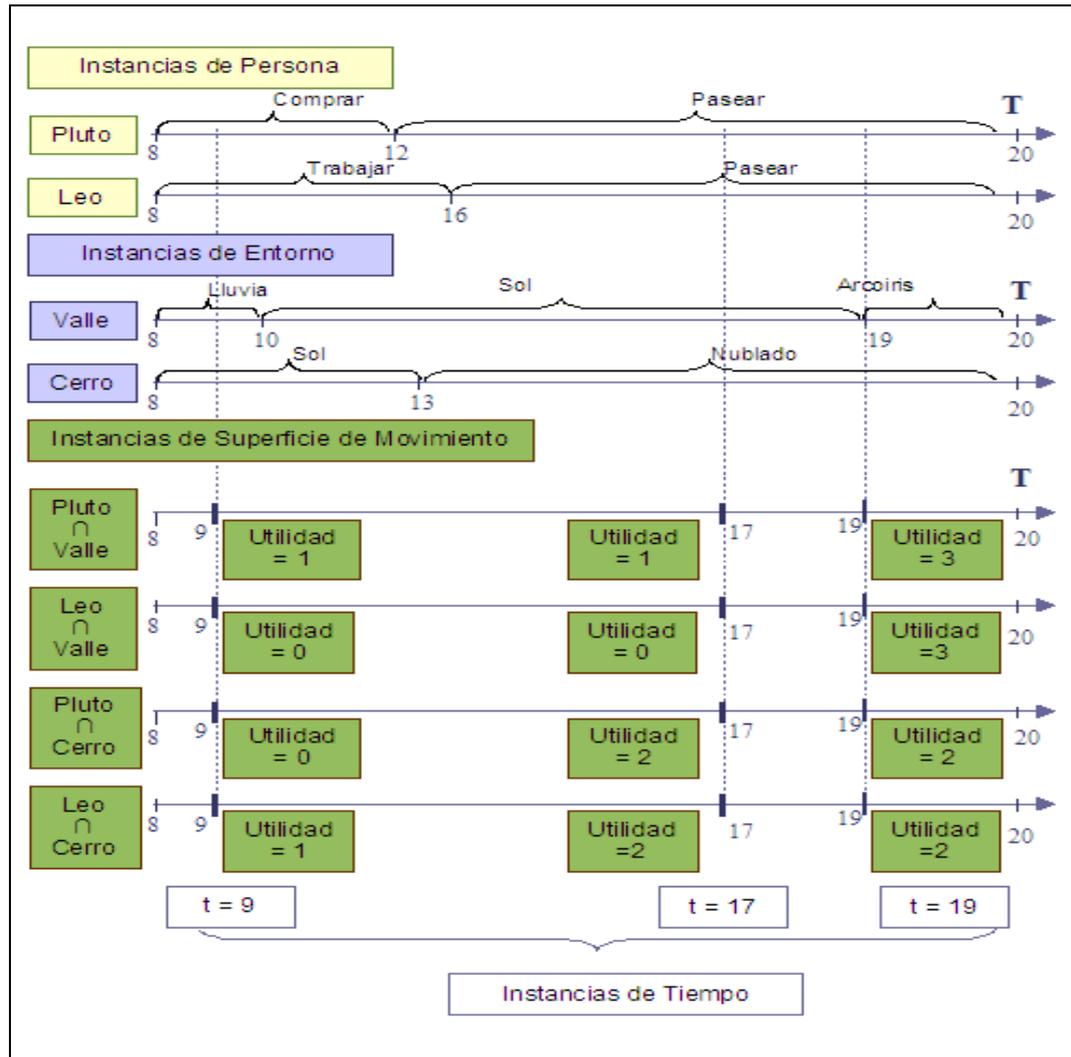


Figura 44: Obtención de valores de utilidad en superficies definidas por varios escenarios

## (2) Cálculo mediante el sistema experto definido

Solicitamos al sistema experto el cálculo de utilidad para cada uno de los escenarios definidos, y el sistema devuelve los siguientes resultados que comprobamos que son los mismos que calculados manualmente:

```
Jess>(hora persona entorno) => valor utilidad Superficie Movimiento
```

```
-----
Jess> * (9 Pluto Valle) => utilidad Superficie Movimiento = 1
Jess> * (9 Leo Valle) => utilidad Superficie Movimiento = 0
Jess> * (9 Pluto Cerro) => utilidad Superficie Movimiento= 0
Jess> * (9 Leo Valle) => utilidad Superficie Movimiento= 1
Jess> * (17 Pluto Valle) => utilidad Superficie Movimiento= 1
Jess> * (17 Leo Valle) => utilidad Superficie Movimiento= 1
Jess> * (17 Pluto Cerro) => utilidad Superficie Movimiento= 2
Jess> * (17 Leo Cerro) => utilidad Superficie Movimiento= 2
Jess> * (19 Pluto Valle) => utilidad Superficie Movimiento= 3
Jess> * (19 Leo Valle) => utilidad Superficie Movimiento= 3
Jess> * (19 Pluto Cerro) => utilidad Superficie Movimiento= 2
Jess> * (19 Leo Cerro) => utilidad Superficie Movimiento= 2
```

### 4.3 Implementación de las fases de razonamiento y predicción en una aplicación Java

En esta etapa de la implementación se ha desarrollado una aplicación en Java que realiza las fases de modelización correspondientes a razonamiento y predicción. En el anejo III puede verse el esquema de clases de programación en Java realizado para la construcción de esta aplicación.

Aparte de las ventajas que aporta la modelización orientada a objetos en la conceptualización del modelo, tenemos además que esta estructura en clases relacionadas facilita la transición entre el análisis y la implementación (Guimarães, 1995) mediante programación orientada a objetos. Esta facilidad de transición se traduce en que las clases abstraídas en el modelo orientado a objetos durante la fase de abstracción son las mismas que se han empleado para la programación de la aplicación y además manteniendo las mismas relaciones.

Incluso como se muestra en la figura 45, la interfaz de la aplicación desarrollada está estructurada en las clases que componen el modelo.

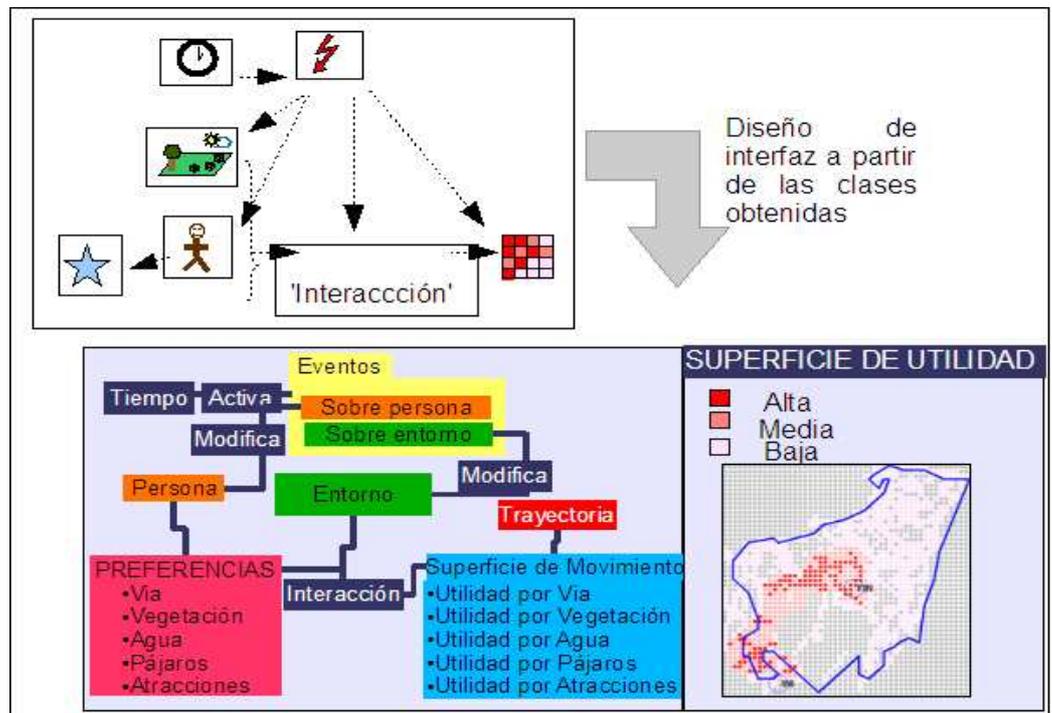


Figura 45: Interfaz de la aplicación Java a partir de las clases del modelo

La interfaz se ha diseñado de manera que la definición de entorno, sujeto y preferencias se encuentran en la parte izquierda y en la derecha se visualizan los resultados parciales (superficies de utilidad parcial) o finales (superficie de movimiento) asociados a esa definición. Como veremos en el siguiente epígrafe, esta interfaz puede ser manejada de manera interactiva por el usuario para elegir el tipo de sujeto que realiza el desplazamiento, modificar sus preferencias o activar eventos para simular las distintas superficies de movimiento que se originan y sus correspondientes desplazamientos.

Como se muestra en la figura 46, la aplicación procede mediante los siguientes pasos:

- 1- Lee de la semipantalla de la izquierda los datos relativos al escenario a simular
- 2- Calcula la utilidad asociada a cada punto del entorno en función de las preferencias definidas en el anterior paso mediante la función de interacción.
- 3- Muestra en la semipantalla de la derecha bien la superficie de movimiento resultante con su desplazamiento derivado o bien cada una de las superficies de utilidad correspondientes a cada preferencia.

4- Finalmente reaccionará a posibles eventos que active el usuario de manera interactiva, recalculando la nueva superficie de movimiento resultante.

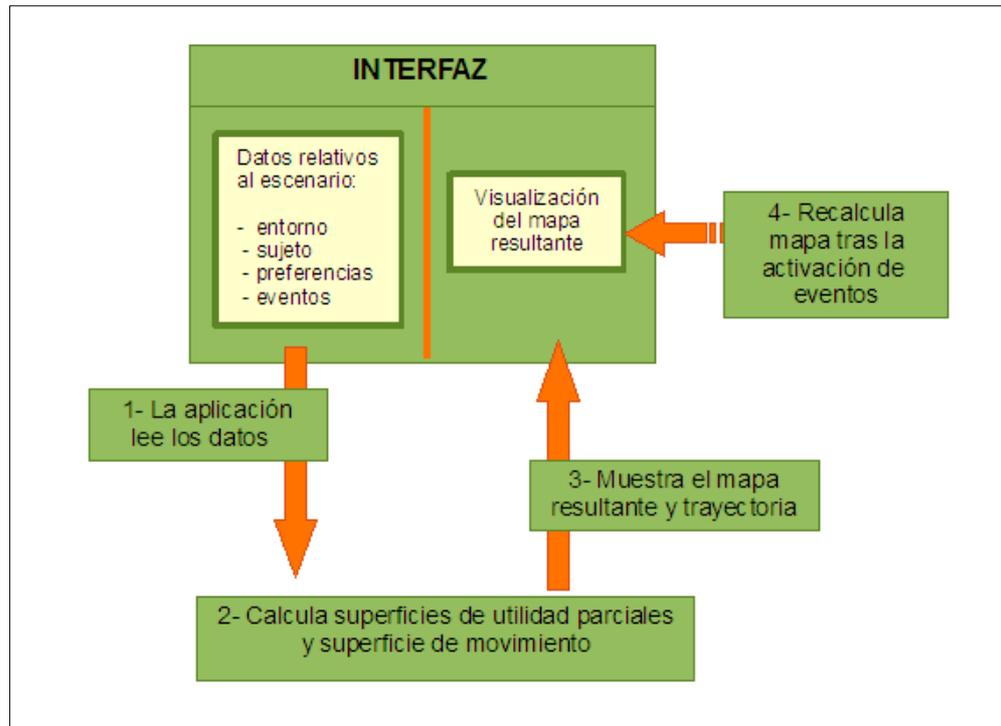


Figura 46: Pasos de actuación de la aplicación

Además, la herramienta da opción a visualizar los resultados parciales de la función de interacción. Es decir, no sólo se podrá visualizar la superficie de movimiento resultante del cálculo, sino también cada una de las superficies de utilidades parciales correspondientes a cada preferencia. (Figura 47)

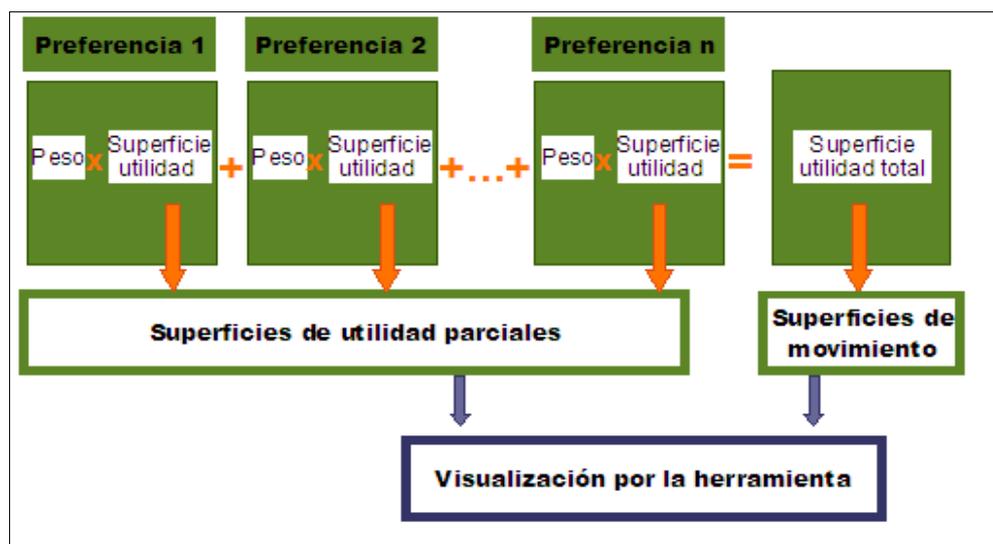


Figura 47: Visualización de superficies de utilidad parcial y superficie de movimiento por la aplicación

### 4.3.1 Uso de la aplicación por el usuario

Como hemos dicho más arriba, la interfaz de la aplicación está dividida en dos semipantallas, la de la izquierda que permite al usuario manipular los datos del escenario y elegir qué desea visualizar, y la de la derecha que muestra los resultados de cálculo solicitados por el usuario y su correspondiente leyenda.

La siguiente imagen, figura 48, ilustra cada una de las partes de la interfaz y la interoperabilidad que ofrece al usuario. En ella se muestran numerados de 1 a 6 los pasos que realiza el usuario en su uso: (1) el usuario elige y activa los posibles eventos, (2) elige el tipo de visitante, (3) comprueba las funciones de utilidad de cada preferencia pudiendo editarlas, (4) modifica los pesos de estas preferencias, (5) elige visualizar las superficies de utilidad parciales correspondientes a cada preferencia o la superficie de movimiento, (6) elige visualizar trayectoria bien simulada, bien observada. La aplicación además ofrece al usuario la opción marcada con (\*) en la interfaz para visualizar los datos del entorno en el mapa. La parte de la derecha contiene, señalado con (v1), un mapa del parque, con (v2) la leyenda del mapa que se muestra abajo y con (v3) el mapa que solicita el usuario en cada una de sus peticiones.

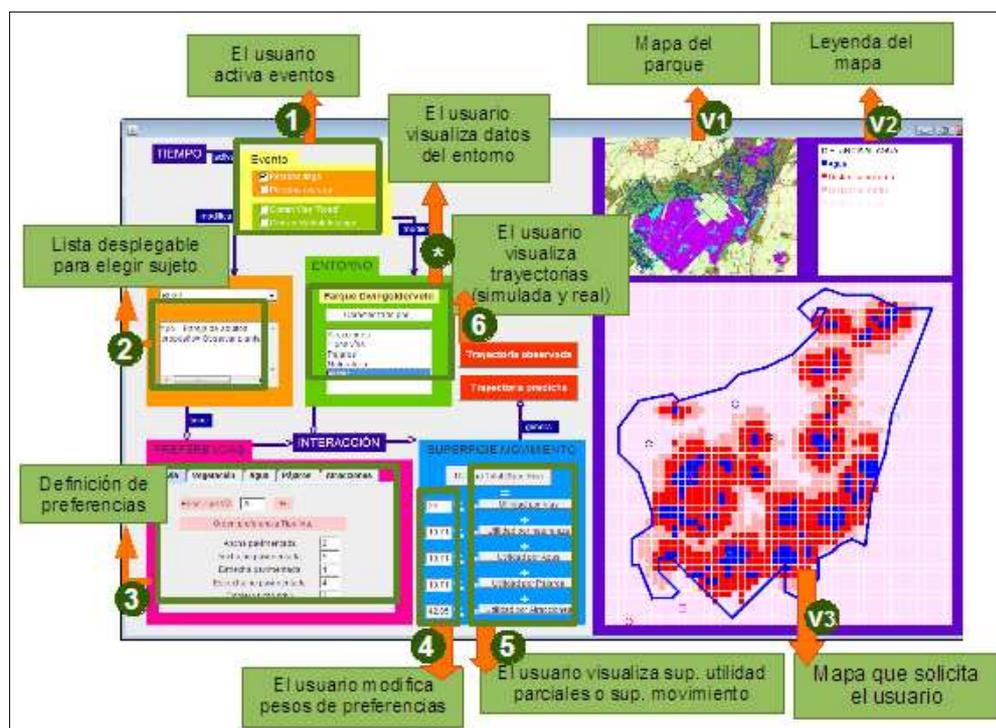


Figura 48: Ejemplo de uso de la interfaz por el usuario

---

## 4.4 Implementación del modelo sobre un escenario real

El desarrollo de la aplicación Java que materializa el funcionamiento teórico del modelo nos ha permitido integrar datos de un escenario real para realizar simulaciones, que como veremos en el capítulo 5, nos permitirá discutir la validación de nuestro modelo.

El escenario elegido para la implementación y posterior validación de este modelo son los desplazamientos realizados por los visitantes al parque de Dwingelderveld, situado en el NE de Holanda. Este parque es frecuentemente utilizado en investigaciones debido a su alta calidad medioambiental, unido con las numerosas visitas recibidas (Terlouw, 2008), ( Elands & Van Marwijk, 2005), (Van Marwijk et al., 2007), ( Ligtenberg, 2008).

La implementación se ha realizado a partir de los datos obtenidos en un experimento incluido en el proyecto GEOPKDD<sup>5</sup> realizado en el parque Dwingelderveld. En este experimento se han obtenido los datos de casi 400 visitantes al parque consistentes en encuestas realizadas sobre sus preferencias de paseo por el parque, además de sus trayectorias registradas mediante un dispositivo GPS.

Este escenario de desplazamientos ha sido integrado en la aplicación Java orientada a objetos desarrollada a partir de las clases obtenidas en la fase de abstracción del proceso de modelado. La aplicación aplica sobre el entorno correspondiente al parque y a los visitantes y preferencias extraídas de la encuesta, las fases de razonamiento y predicción, obteniendo la superficie de movimiento y la trayectoria predicha para cada visitante.

---

<sup>5</sup> Proyecto financiado por FP6-IST-C (Future and Emerging Technologies – Open domain) y coordinado por Instituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione de Italia, cuyas principales actividades están relacionadas con trayectorias, datos espacio-temporales y visualización.

#### 4.4.1 Clase Entorno

La información sobre el entorno se ha obtenido a partir de una serie de mapas del parque (como el de la figura 49) que contienen los tipos de vía del parque, naturaleza, ubicación de las atracciones visitadas, etc.

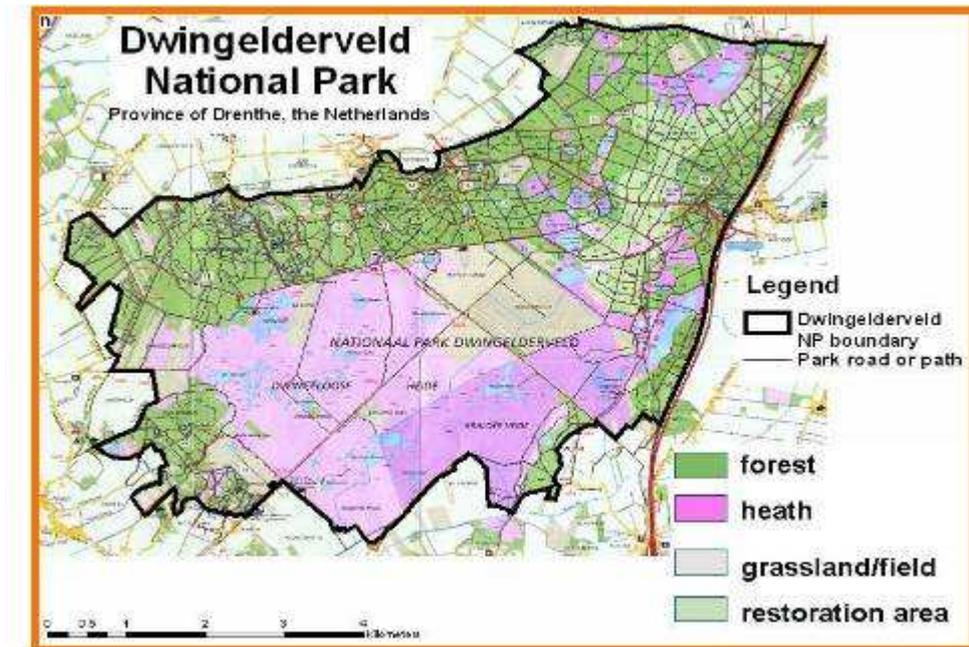


Figura 49. Mapa de usos del suelo en el parque Dwingelderveld

Fuente: (Terlow, 2008)

La siguiente imagen satelital obtenida de Google Earth muestra una panorámica del parque (figura 50).



Figura 50: Panorámica del parque

Fuente: Google Earth.

La siguiente imagen (figura 51) muestra otro mapa del parque que se ha utilizado para la implementación del escenario real en la aplicación Java.

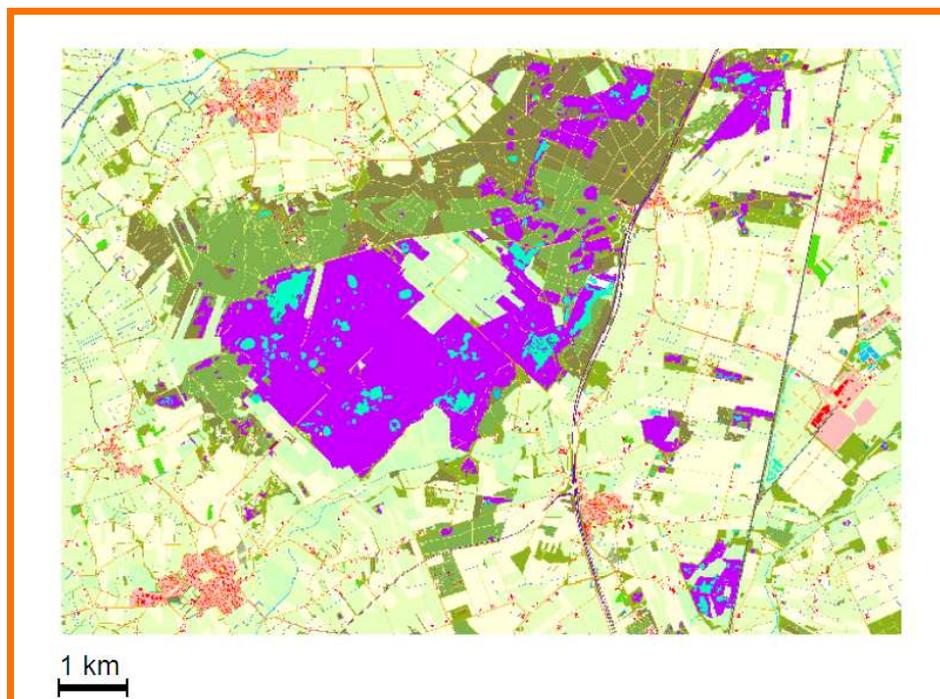


Figura 51: Mapa topográfico del parque

Fuente: Top Dienit Nederland, 2005

Uno de los motivos por los cuales los visitantes van al parque es la posibilidad de estar en contacto con la naturaleza. El parque se caracteriza por una abundante vegetación que es uno de los grandes atractivos para las visitas, figuras 52 y 53. También hay numerosos lagos que tienen un gran atractivo paisajístico. La elevada presencia de animales, especialmente la gran diversidad de pájaros, hace que muchos visitantes se acerquen al parque para observarlos. Además el parque cuenta con numerosos puntos de atracción que de igual manera son motivo de muchas vistas al parque, como el establo de ovejas, un radiotelescopio, casas de té, zonas de oración, puntos de información sobre la Naturaleza, etc. Los acondicionamientos realizados en el parque, como los parkings, las vías y caminos por los que los pasear son igualmente decisivos en la presencia de visitantes.



Figura 52: Foto del parque Dwingelderveld<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> <http://www.brennyonline.nl/?page=dwingelderveld-pictures>



Figura 53. Foto del parque Dwingelderveld

Fuente: (Terlow, 2008)

Se ha definido el entorno en función de estos atractivos comentados de la siguiente forma:

- “Atracciones” (radiotelescopio, ruinas, casas de té,...) y “parkings”.
- “Tipos de vías” (vía ancha pavimentada y no pavimentada, vía estrecha pavimentada y no pavimentada, vía semipavimentada)
- “Vegetación”, caracterizada por el grado de abundancia de enebros
- “Agua”, caracterizada por la proximidad a masas de agua (lagos).
- “Pájaros”, caracterizada por el grado de abundancia de pájaros.

#### 4.4.2 Clase Persona

La clase persona representa los visitantes al parque y la información se ha obtenido a partir de una encuesta, de la cual se ha extraído la tipología del visitante (adulto solo, pareja de adultos, con perro, con niños) y su propósito (andar, pasear al perro, ver la naturaleza, etc.). Esta clase está relacionada con la de Preferencias, ya que cada tipología de visitante y de propósito tiene sus preferencias.

#### 4.4.3 Clase Preferencias

La información sobre las preferencias también se ha obtenido a partir de la encuesta mencionada, extrayendo las preferencias en función de la tipología y propósito del visitante. Estas preferencias queda definida por:

- (a) un peso que representa la importancia del criterio a evaluar,
- y (b) una función de utilidad que permite evaluar la correspondiente a cada criterio.

Estos criterios (como en cualquier evolución Multicriterio) son evaluados mediante atributos heterogéneos, tales como distancias a ciertos sitios o cantidades de ciertos elementos, ya que durante dicha evaluación se transforman en valores de utilidad mediante sus correspondientes funciones de utilidad, obteniéndose así una homogenización de medidas. La figura 54 muestra esquemáticamente la transformación mediante evaluación Multicriterio hasta obtener medidas de utilidad para cada uno.

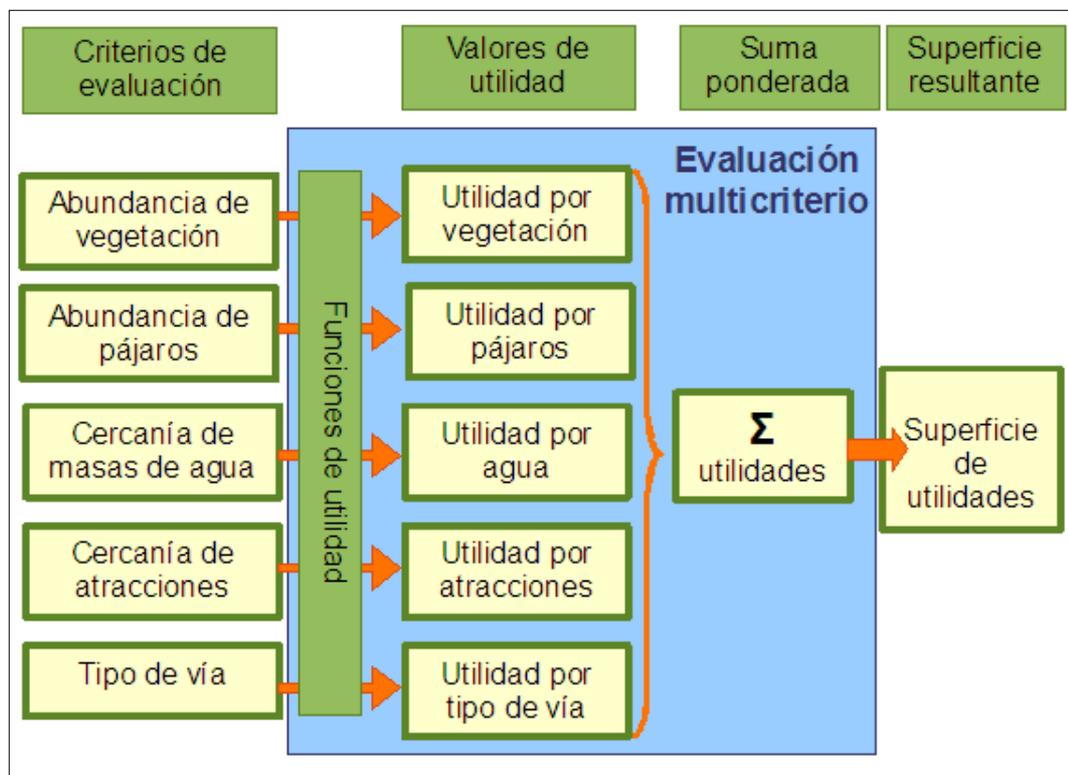


Figura 54: Unificación de las distintas medidas en una única medida de utilidad.

Las preferencias de desplazamiento de los visitantes al parque quedan descritas de la siguiente manera:

#### 4.4.3.1 Preferencia por tipo de Vía

##### (a) Peso Preferencia Tipo Vía

Se corresponde con la importancia que tiene para el visitante la elección del tipo de vía. Un peso bajo significa que al visitante no le es muy importante poder ir por las vías que más le gustan según su orden de preferencias de vías. Un peso alto significa que para el visitante es muy importante poder elegir la vía que más le interesa según su orden de preferencias de vías.

##### (b) Función de Utilidad por Tipo de Vía

Representa la utilidad que ofrece cada tipo de vía a un determinado visitante. Cada visitante tiene un orden de preferencias por los tipos de vías, obteniendo mayor utilidad al ir por las de mayor orden de preferencia y menor utilidad por las de menor orden de preferencia. Así habrá un valor de utilidad para cada tipo de vía (vía ancha pavimentada y no pavimentada, vía estrecha pavimentada y no pavimentada, vía semipavimentada)

La figura 55 muestra un ejemplo de utilidades por tipos de vías según la tipología de visitante “Pareja de adultos” con el propósito “Observar la naturaleza”, cuyo orden de preferencia es el siguiente: Estrecha pavimentada, Ancha pavimentada, Semipavimentada, Estrecha no pavimentada y Ancha no pavimentada:

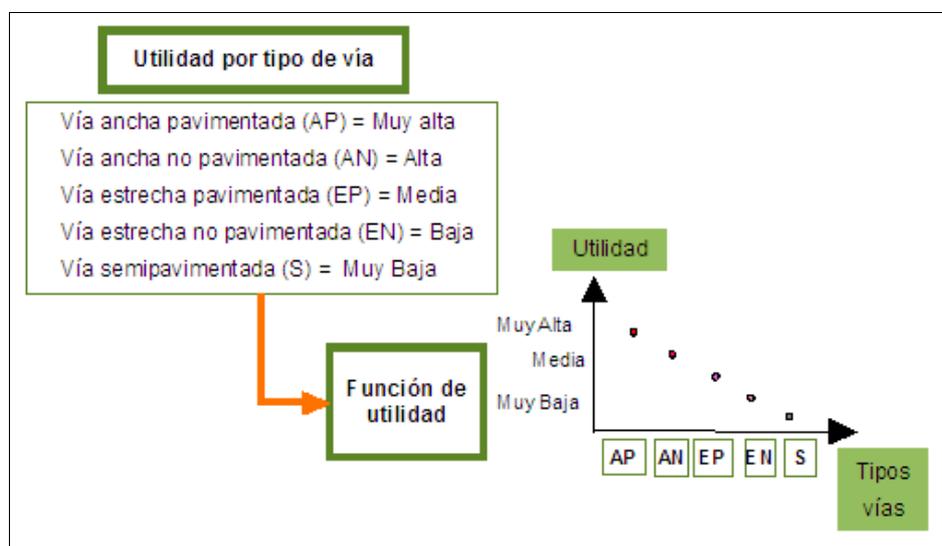


Figura 55: Ejemplo de función de utilidad por tipo de vía

#### 4.4.3.2 Preferencia por presencia de Vegetación

##### (a) Peso Preferencia Vegetación

Representa la importancia que tiene para el visitante la presencia de vegetación en el entorno. Un peso bajo significa que para el visitante no es muy importante la presencia de vegetación. Un peso alto significa que para el visitante es muy importante la presencia de vegetación.

##### (b) Función de Utilidad por Vegetación

Es la utilidad que ofrecen las zonas según su grado de presencia de vegetación. La figura 56 muestra un ejemplo de función de utilidad para un visitante que desea contemplar la diversidad de vegetación.

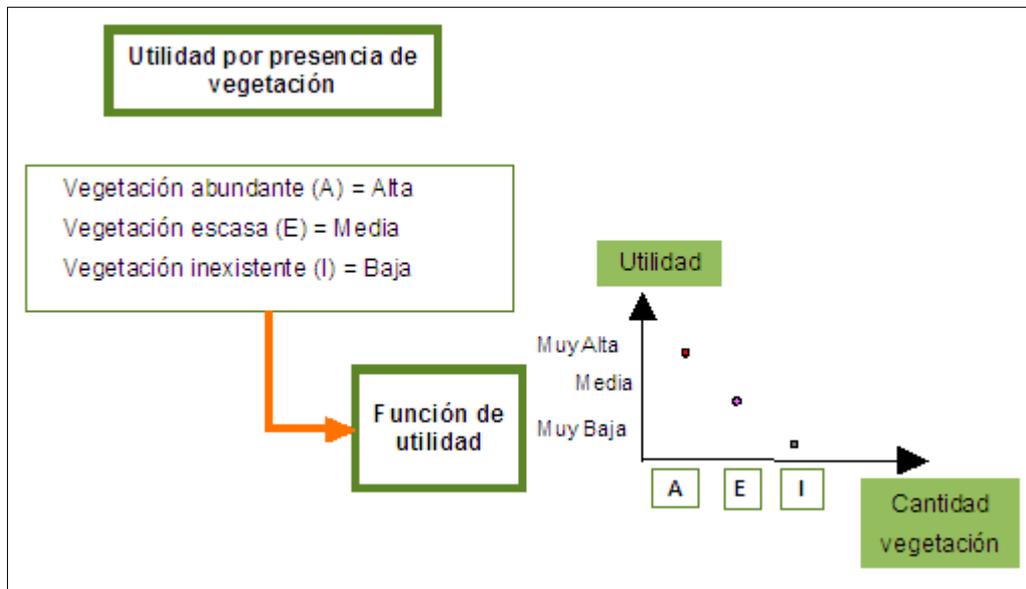


Figura 56: Ejemplo de función de utilidad por vegetación

#### 4.4.3.3 Preferencia por proximidad a Agua

##### (a) Peso Preferencia Agua

Es la importancia que tiene para el visitante la presencia de agua en el entorno. Mientras que un peso bajo significa que para el visitante no es muy importante la presencia de masas de agua, uno alto significaría que sí lo es.

### (b) Función de Utilidad por Agua

Es la utilidad que ofrecen las zonas según su grado de proximidad a los lagos. La figura 57 muestra un ejemplo de función de utilidad por preferencia de proximidad a agua. En ella vemos como al acercarnos al agua la utilidad aumenta por ser zona de atracción, hasta llegar a un punto interior al lago en la que la utilidad desaparece por ser intransitable.

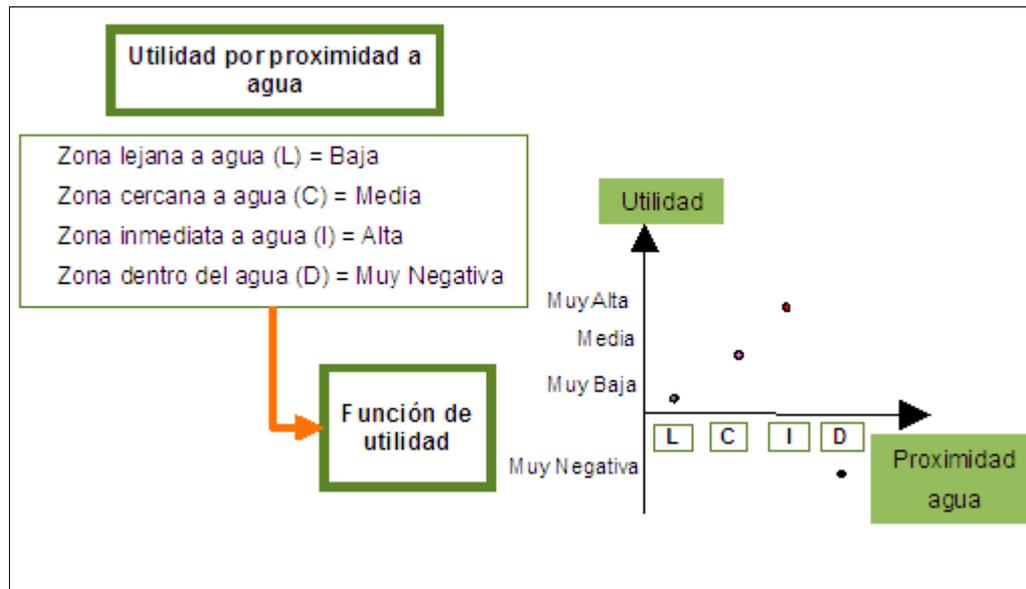


Figura 57: Función de utilidad por proximidad a masas de agua

#### 4.4.3.4 Preferencia por cercanía de Pájaros

##### (a) Peso Preferencia Pájaros

Es la importancia que tiene para el visitante la presencia de pájaros en el entorno. Mientras que un peso bajo significa que para el visitante no es muy importante la presencia de pájaros, uno alto indica que para el visitante sí es muy importante.

##### (b) Función de Utilidad por Pájaros

Es la utilidad que ofrecen las zonas según su grado de abundancia de pájaros. La figura 58 muestra un ejemplo de función de utilidad para un visitante que va al parque a observar pájaros.

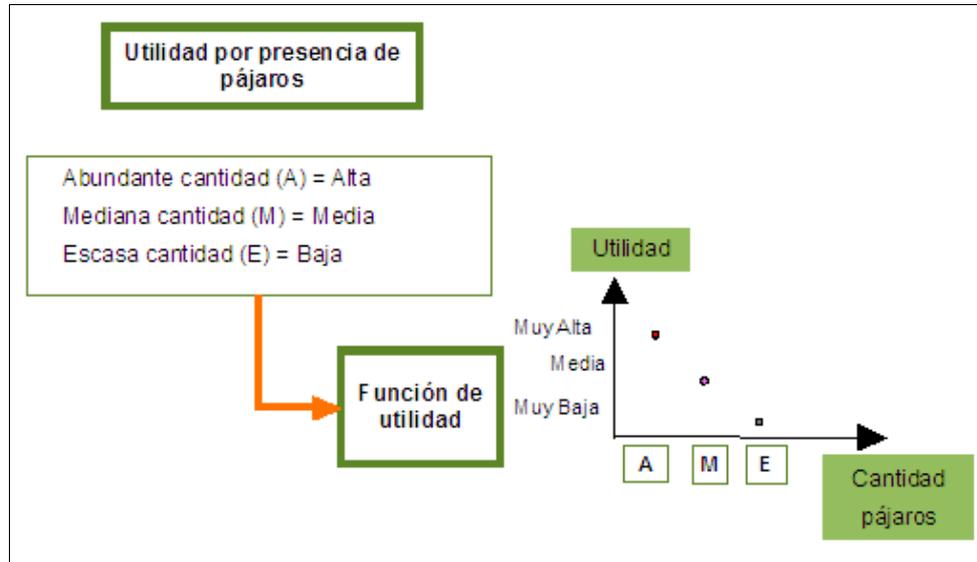


Figura 58: Ejemplo de función de utilidad para un visitante que desea ver pájaros

#### 4.4.3.5 Preferencia por existencia de Atracciones

##### (a) Peso Preferencia Atracciones

Es la importancia que tiene para el visitante las atracciones del entorno. Un peso bajo significa que para el visitante no son muy importantes las atracciones del entorno. Si un peso bajo significa que para el visitante no son muy importantes las atracciones, para aquellos cuyo propósito sea visitar determinadas atracciones este peso será muy alto.

##### (b) Función de Utilidad por Atracciones

Como se explicó en el capítulo de metodología, las atracciones actúan como puntos de paso del visitante, por lo tanto su correspondiente función de utilidad proporciona los valores de utilidad que ofrecen los puntos del entorno debido a su proximidad a las atracciones visitadas. La siguiente imagen (figura 59) muestra un ejemplo de función de utilidad por cercanía a una atracción del parque que se desea visitar.

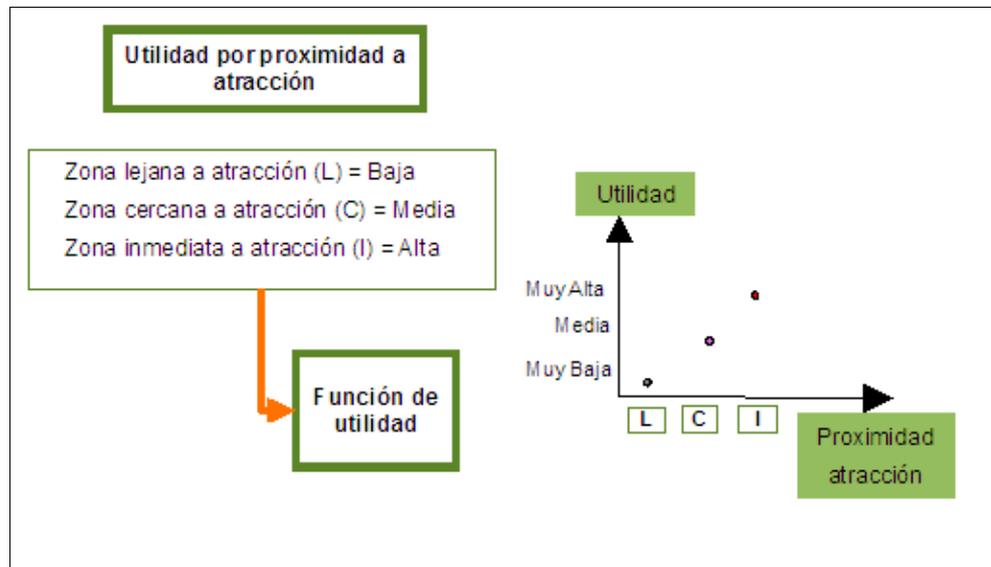


Figura 59: Ejemplo de función de utilidad para un visitante que desea visitar una atracción

#### 4.4.4 Clase Interacción

La clase Interacción representa el fenómeno de interacción entre las preferencias del visitante y el entorno. Contiene la “función de interacción”, que proporciona la utilidad total para cada punto del entorno para ser punto de la trayectoria según el conjunto de preferencias o criterios.

Está compuesta por la suma de todas las utilidades parciales que se producen con el cumplimiento de cada una de las preferencias. Según la fórmula de interacción explicada en la fase de razonamiento (5) del capítulo de metodología quedaría de la siguiente manera:

$$U_i = \sum_j U_j = \sum_j P_j \cdot G_{i,j}$$

Donde,

- $U_i$  = utilidad total para cada punto  $i$  del entorno
- $U_j$  = utilidad parcial según la preferencia  $j$

- $j$  = número de preferencias asociadas a la finalidad de la accesibilidad en el momento  $t$
- $P_j$  = peso de la preferencia  $j$  para la finalidad  $F$
- $G_{(i,j)}$  = grado de cumplimiento del requisito  $j$  en el punto  $i$  del entorno (es la función de utilidad).

El desarrollo de la fórmula de cálculo de utilidad para el caso de este escenario sería la siguiente:

$$U_{total} = \sum_j U_{parcial\ de\ cada\ preferencia} = \sum_j P_j \cdot G_{i,j}$$

$$U_{total} = U_{vía} + U_{agua} + U_{vegetación} + U_{pájaros} + U_{atracciones}$$

$$U_{total} = (P_{vía} \cdot G_{vía}) + (P_{agua} \cdot G_{agua}) + (P_{veget.} \cdot G_{veget.}) + (P_{pájaros} \cdot G_{pájaros}) + (P_{atrac.} \cdot G_{atrac.})$$

Recordamos que según expusimos en el capítulo de metodología, cada punto  $i$  del entorno está materializado por una celda, de manera que la aplicación calcula para cada celda del entorno el valor de su utilidad total produciéndose así la superficie de movimiento.

#### 4.4.5 Clase Superficie de Movimiento

La Superficie de Movimiento es el resultado de calcular la función de interacción para cada celda del entorno del parque según las preferencias de cada visitante, por tanto es una superficie definida por celdas que contienen el atributo de utilidad total. El valor de utilidad asociado a las celdas se corresponde a una escala numérica, cuyo rango va de 0, como valor mínimo de utilidad, a 10, como valor máximo de utilidad. Sin embargo la visualización de estos valores calculados sobre las celdas se hará mediante un rango reducido de tres valores (utilidad baja, media y alta)

Como se verá más adelante, esta superficie de movimiento varía para cada tipo de visitante y también varía con la aparición de eventos.

#### 4.4.6 Clase Trayectoria

Representa el desplazamiento simulado para un tipo de visitante determinado sobre el entorno definido. Se calcula a partir de la superficie de

---

movimiento buscando desde el punto de inicio los mayores gradientes de utilidad tal y cómo se explica en la fase de predicción correspondiente al capítulo de metodología.

#### **4.4.7 Clases Tiempo y Evento**

La clase Tiempo activa la clase Evento. La clase Evento produce modificaciones en las clases Persona y Entorno. Las modificaciones en la clase Persona repercuten también en sus preferencias, por lo que afecta también a la clase Preferencias.

Como la superficie de movimiento es la resultante de la interacción entre Preferencia y Entorno, los eventos también modificarán las superficies de movimiento.

Distinguimos los eventos usados para este escenario en los que afectan al entorno y los que afectan a la persona (correspondientes respectivamente a la subclase “Eventos relacionados con entorno” y “Eventos relacionados con actividades humanas”):

##### *4.4.7.1 Eventos que modifican a la clase Persona*

Como se hizo referencia en el capítulo 1, los eventos que atañen a las personas son aquellos basados en las actividades que éstas realizan. En nuestro escenario, dichos eventos que afectan a la clase persona, modificando su comportamiento, son los siguientes:

- evento “persona llega al parque”
- evento “persona se va del parque”

Cuando está activado el evento “persona llega al parque”, se genera una superficie de movimiento que provoca un desplazamiento en sentido opuesto a cuando está activado el evento “persona se va del parque”. Mientras que durante el primer evento las fuerzas de atracción que actúan sobre la persona son causadas por las atracciones destino y demás elementos del entorno, durante el segundo evento aparecen las generadas por los parkings.

##### *4.4.7.2 Eventos que modifican a la clase Entorno*

Se han introducido los dos siguientes eventos para simular cómo cambiarían las superficies de movimiento en el caso de producirse:

- evento “Cortan las vías de tipo anchas”
- evento “Cierran radiotelescopio”

Cuando cierran las vías de tipo “anchas”, (por obras o por un accidente) dejan de ser posibles puntos de paso, ya no son elementos atractivos para los visitantes y por lo tanto cambia la superficie de movimiento. Cuando cierran una atracción del parque (por horario de cierre o por reparación), por ejemplo el radiotelescopio, esta atracción deja de ser un atractivo para el visitante y también cambiaría la superficie de movimiento.

## 4.5 Conclusiones

En esta etapa de implementación hemos partido del diseño del modelo resultante del capítulo de metodología, consistente en una descripción puramente teórica, para obtener una aplicación tangible que nos permita experimentar y comprobar su funcionamiento de manera práctica. Como veremos con más detenimiento en el capítulo 5, esta fase será crucial para la validación del modelo.

El primer paso realizado es la materialización de la estructura de clases y de reglas y funciones de comportamiento llevada a cabo mediante Protégé, que nos proporciona una descripción formal de dicha estructura. A partir de esta descripción formal hemos sido capaces de integrar sus reglas de comportamiento sobre un sistema experto para realizar razonamientos y detectar incongruencias en el modelo.

La obtención de correctos resultados de cálculo de utilidades de superficie de movimiento a partir de las reglas definidas en el sistema experto Jess nos lleva a una validación del diseño de reglas que describen el funcionamiento del modelo. Además al igual que “*Time Geography*”, las consultas aplicables al sistema experto implementado permiten obtener las previsiones más probables sobre interacciones entre localizaciones espaciales y personas y sobre posibles intersecciones de recorridos de personas. De este modo proporciona las posiciones más probables de una persona en un determinado momento, entendiendo como posiciones más probables aquellas de mayor valor de utilidad en superficie de movimiento:

- ¿En qué localización de entorno E es más probable encontrar a una cierta persona A en un cierto momento T?

- ¿A qué hora pasa una cierta persona A por una cierta situación de entorno E?
- ¿Es probable que dos personas A y B se encuentren en un cierto momento T?

Sin embargo esta capacidad de previsión en nuestro modelo se ve aumentada en el sentido de que es capaz de considerar tanto las preferencias de personas en diferentes momentos como los atributos de entorno en esos momentos.

Posteriormente a esta implementación formal en Protégé, se ha realizado una aplicación en Java que permite simular predicciones de desplazamiento partiendo de la anterior definición de clases. Para ello ha sido de gran ayuda haber utilizado un modelo orientado a objetos, ya que sus clases y relaciones son las mismas que se han empleado en la construcción de la aplicación, e incluso en el diseño de la interfaz.

Una vez hemos obtenido esta aplicación práctica, hemos sido capaces de integrar en ésta los datos de un escenario real, permitiéndonos hacer simulaciones cuyos resultados se discuten en el siguiente capítulo.

## **Capítulo 5. Resultados**

---

El capítulo anterior mostraba la implementación del modelo mediante una aplicación desarrollada en un escenario real, consistente en los desplazamientos de los visitantes en el parque Dwingelderveld. En este capítulo mostraremos la obtención en dicho escenario de las superficies de movimiento y sus correspondientes trayectorias simuladas. La superposición de estas trayectorias simuladas con las reales observadas a través del seguimiento mediante GPS, nos permitirá realizar evaluaciones del modelo.

---

## 5.1 Introducción

Este capítulo muestra tres casos de los resultados obtenidos con la aplicación desarrollada para el escenario real según se mostró en el anterior capítulo, los visitantes al parque Dwingelderveld. Cada uno de estos casos contempla una clase distinta de visitante caracterizado con diferentes propósitos de visita al parque y por lo tanto diferentes preferencias de desplazamiento. Las preferencias y trayectorias reales observadas de cada uno se han obtenido del experimento realizado durante el proyecto de investigación GEOPKDD, mediante las encuestas realizadas a los visitantes y los registros GPS de sus rutas.

En este capítulo se muestran tanto los resultados parciales (superficies de utilidad parcial atendiendo a cada preferencia) como los resultados finales, superficie de movimiento con valores de utilidad total, y su correspondiente trayectoria. Asimismo se muestra la trayectoria real observada para cada una de las situaciones del escenario real por medio de los dispositivos GPS. Tras la superposición de ambas trayectorias (simulada y observada) realizaremos una discusión de los resultados y finalizaremos el capítulo con un apartado referente a la evaluación del modelo (validación).

Este capítulo está estructurado en los siguientes epígrafes:

- Resultados obtenidos
- Discusión de los resultados
- Evaluación del modelo.

Al final de este capítulo habremos obtenido la respuesta a las siguientes interrogantes de investigación:

- ¿Cómo validar el modelo planteado?
- En vista de los resultados ¿en qué tipo de modelos se encuentra el nuestro?
- ¿A qué se debe la incertidumbre en la simulación?

Este capítulo se estructura en tres secciones principales en las que se muestran los resultados obtenidos en la simulación aplicada a tres tipos distintos de visitantes al parque. En cada una de las secciones se exponen cada uno de los casos, describiendo para cada uno de ellos su tipología de visitante, su propósito y sus preferencias y posteriormente se muestran los resultados obtenidos tras la implementación (superficies de utilidad parciales, superficies de movimiento, y superposición de trayectorias simulada y real observada).

Las preferencias han sido definidas como se explicó en el capítulo 4 de implementación, es decir mediante la definición del peso y la función de utilidad de cada una de las siguientes:

- Preferencia por tipo de vía
- Preferencia por vegetación
- Preferencia por pájaros
- Preferencia por atracciones
- Preferencia por masas de agua

La tabla 10 contiene un esquema en el que se muestra cada uno de los casos de visitantes que se van a mostrar a continuación indicando su tipología y propósito de visita al parque.

Tabla 10: Esquema resumen de visitantes estudiados

<b>Número Caso</b>	<b>Tipología</b>	<b>Propósito</b>
Caso 1	Pareja de adultos	Observar naturaleza
Caso 2	Una persona adulta	Pasear por el parque
Caso 3	Familia con niños	Sacar fotos

## 5.2. Primer Caso

La tipología de visitante en este primer caso se corresponde con una pareja de adultos cuyo propósito de visita al parque es el de observar la naturaleza. A este tipo de visitante con semejante propósito le corresponden las preferencias que se describen a continuación.

Esta tipología de visitante se caracteriza por una mayor tendencia a desplazarse sobre vías pavimentadas frente a las no pavimentadas y, debido a su propósito de observar la naturaleza, sus preferencias se corresponden con zonas de abundante vegetación, masas de agua (lagos) y zonas donde se puedan observar pájaros. Las preferencias son descritas, según las pautas explicadas en el capítulo de metodología, mediante las funciones de utilidad y factores de ponderación que además fueron detalladas para cada una de estas preferencias en el capítulo de implementación. Posteriormente se mostrará cómo se calculan las superficies de utilidad parciales correspondientes a cada una de estas preferencias y las obtenidas por la aplicación tras dicho cálculo.

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos para este primer caso estructurados mediante los siguientes pasos:

- en primer lugar trataremos la obtención de las superficies de utilidad parciales correspondientes a las preferencias consideradas,

- posteriormente se mostrará la superficie de movimiento obtenida mediante la suma ponderada de estas superficies de utilidad parcial y
- la superposición de trayectoria simulada con la real observada,
- y para finalizar se mostrará cómo varía la superficie de movimiento debido a la activación de eventos

### 5.2.1 Superficie de utilidad parcial por tipo de vía

La superficie de utilidad parcial por tipo de vía se obtiene evaluando las vías existentes en el parque según las preferencias que tiene este visitante por el tipo de vía (pavimentadas frente a las no pavimentadas). La aplicación realiza esta evaluación comparando cada tipo de vía con las preferencias del visitante y calculando el valor de utilidad correspondiente. Para ello aplica condiciones como las mostradas en la figura 60, asignando los valores de utilidad más altos en las vías de mayor orden de preferencia del visitante.

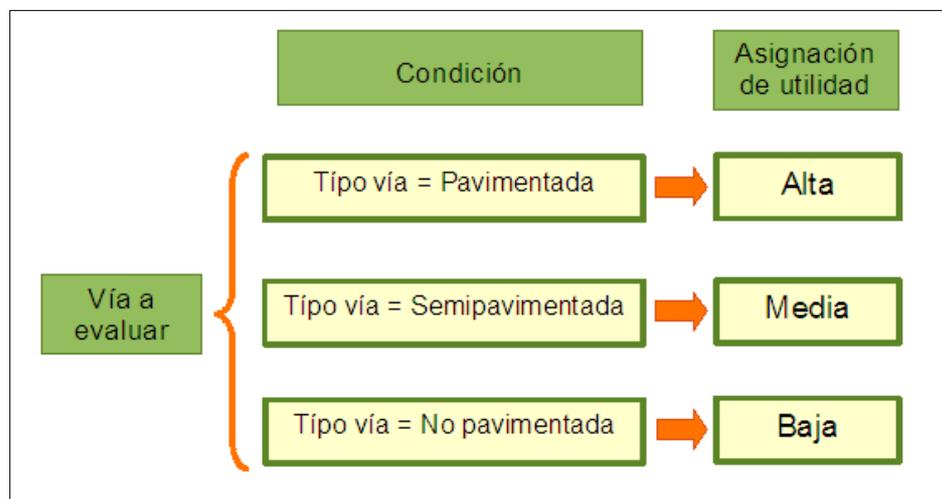


Figura 60: Condiciones para el cálculo de utilidad por tipo de vía para el caso 1

En lo sucesivo los valores altos de utilidad obtenidos en los cálculos se simbolizarán con color rojo, a diferencia de los valores de utilidad medios y bajos que se simbolizarán con colores rosa oscuro y claro respectivamente tal y como muestra la figura 61.

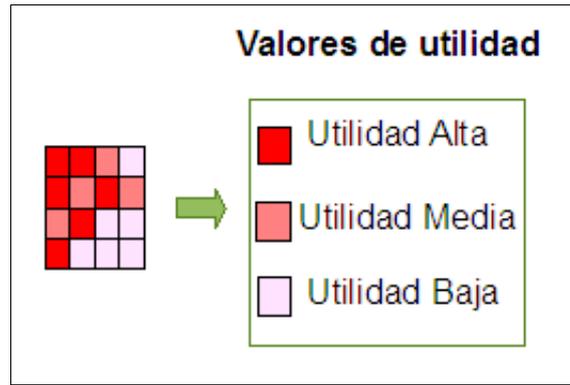


Figura 61: Simbolización del valor de utilidad utilizado en lo sucesivo

La figura 62 ilustra la evaluación de vías realizada, de modo que las que coinciden con las de mayor orden de preferencia de este visitante obtendrán un valor alto de utilidad.

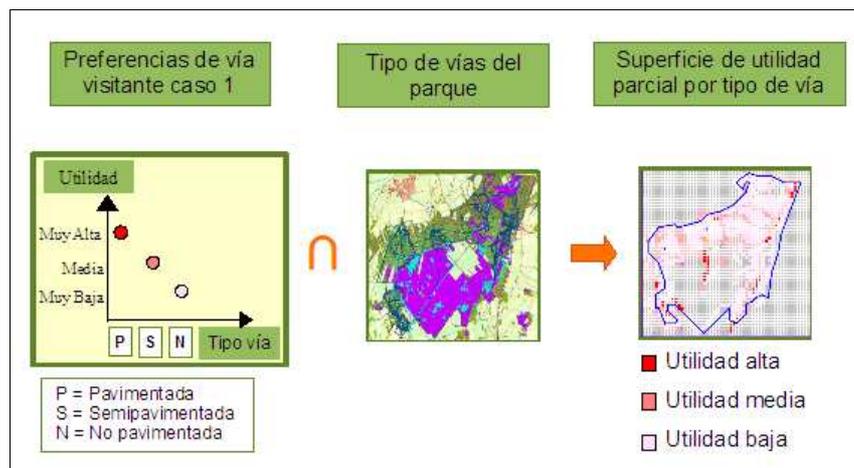


Figura 62: Evaluación por tipo de vía

Este mismo proceso es el que realiza la aplicación desarrollada: cuando el usuario selecciona el visitante correspondiente al caso 1 y solicita su superficie de utilidad parcial por tipo de vía (véase “uso de la aplicación por el usuario” en capítulo 4) se obtiene el esquema mostrado en la figura 63, acorde con la anterior simbología definida y calculada según lo anteriormente expuesto.

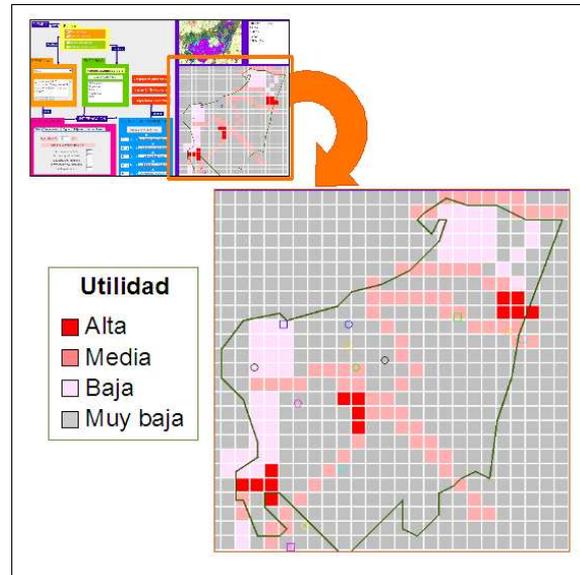


Figura 63: Superficie de utilidad por tipo de vía calculada para el caso 1

### 5.2.2 Superficie de utilidad parcial por vegetación

Análogamente a como hemos calculado la superficie de utilidad parcial por tipo de vía procedemos a calcular la correspondiente a la de vegetación. El visitante relativo a este caso, que tiene como propósito observar la naturaleza, prefiere pasear por zonas de abundante vegetación. Por lo tanto esta superficie se obtendrá evaluando las distintas zonas del parque según su grado de abundancia en vegetación.

La aplicación calcula la superficie de utilidad parcial correspondiente a vegetación del mismo modo que como fue explicado en la correspondiente al tipo de vías, tras lo cual proporciona el esquema que muestra la figura 64.

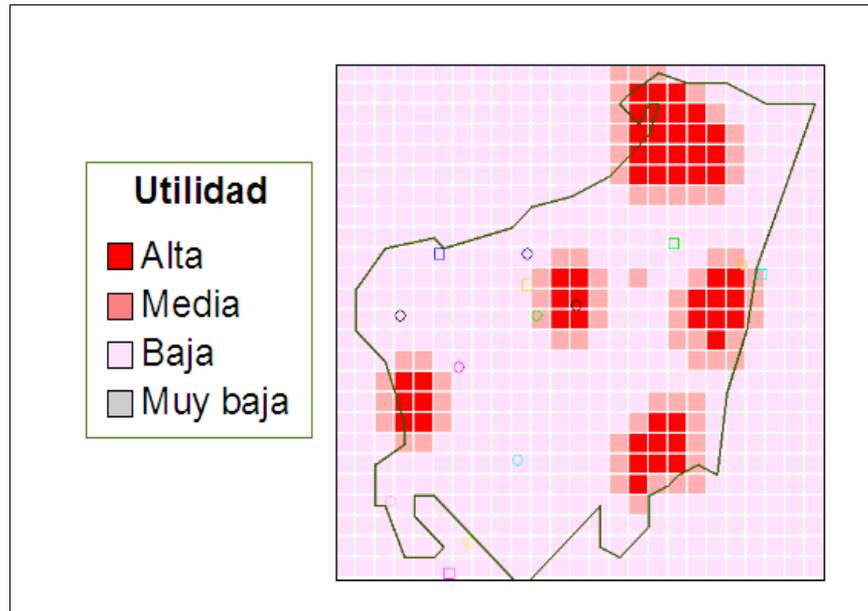


Figura 64: Superficie de utilidad por vegetación calculada para el caso 1

### 5.2.3 Superficie de utilidad parcial por agua

Se procede de igual modo al cálculo de utilidad parcial por presencia de agua. Este visitante que tiene preferencia por visitar lagos obtendrá los mayores valores de utilidad en aquellas zonas del parque inmediatas a los lagos. Por ello podemos ver, en la figura 65, que la superficie de utilidad por agua que ha calculado la aplicación tiene valores más altos en las zonas que rodean los lagos.

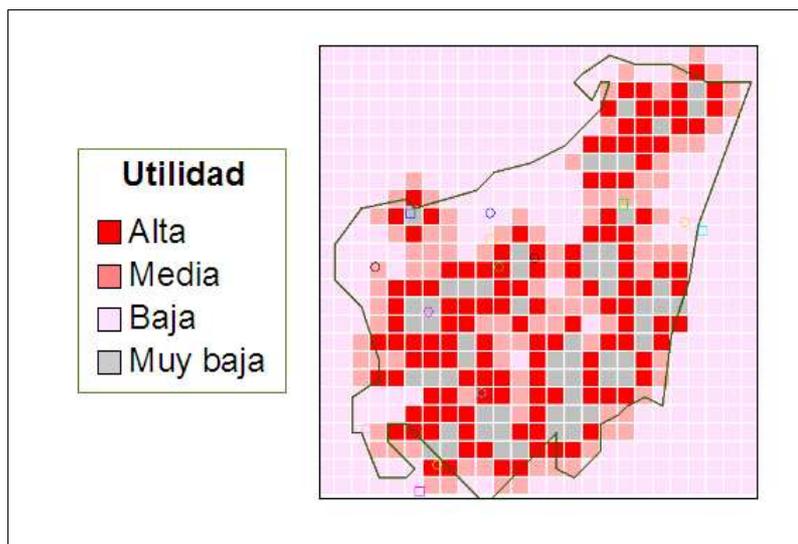


Figura 65: Superficie de utilidad por agua calculada para el caso 1

### 5.2.4 Superficie de utilidad parcial por presencia de pájaros

Continuando con el mismo procedimiento de cálculo, procedemos a obtener la superficie de utilidad por presencia de pájaros. Este visitante que tiene preferencia por zonas con alta presencia de pájaros, obtiene mayores utilidades en las zonas donde puede observar pájaros. La figura 66 muestra la correspondiente superficie de utilidad por pájaros calculada por la aplicación.

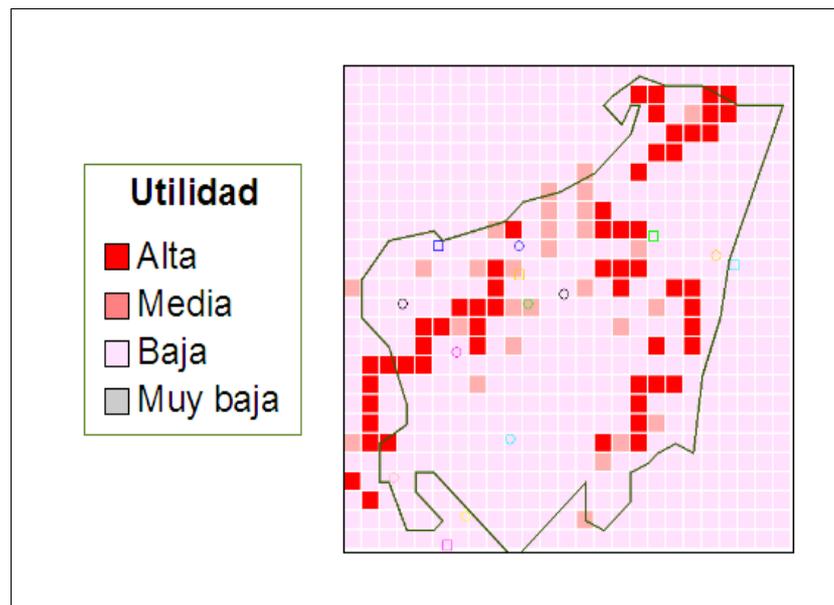


Figura 66: Superficie de utilidad por pájaros calculada para el caso 1

### 5.2.5 Superficie de utilidad parcial por atracciones

También de manera análoga procedemos a calcular la superficie de utilidad por atracciones. Las preferencias por atracciones que tiene este visitante se corresponden con aquellas que desea visitar durante su paseo por el parque (casa de té, radiotelescopio, ruinas arqueológicas), siendo una de ellas el punto destino del visitante. De modo que las zonas más cercanas a estas atracciones le proporcionarán una mayor utilidad que aquéllas más alejadas. En consiguiente con lo expuesto, la aplicación ha calculado la superficie de utilidad parcial por atracciones que muestra la figura 67.

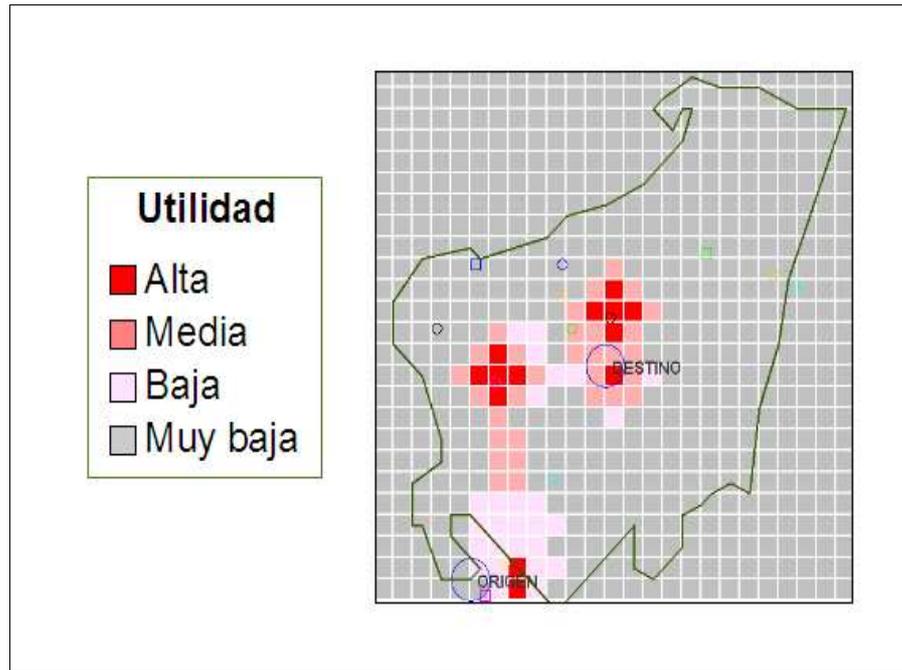


Figura 67: Superficie de utilidad por atracciones calculada para el caso 1

### 5.2.6 Obtención de la superficie de movimiento

Una vez se tienen las utilidades parciales por cada preferencia, la aplicación calcula la utilidad total mediante la suma ponderada de todas ellas como muestra esquemáticamente la figura 68.

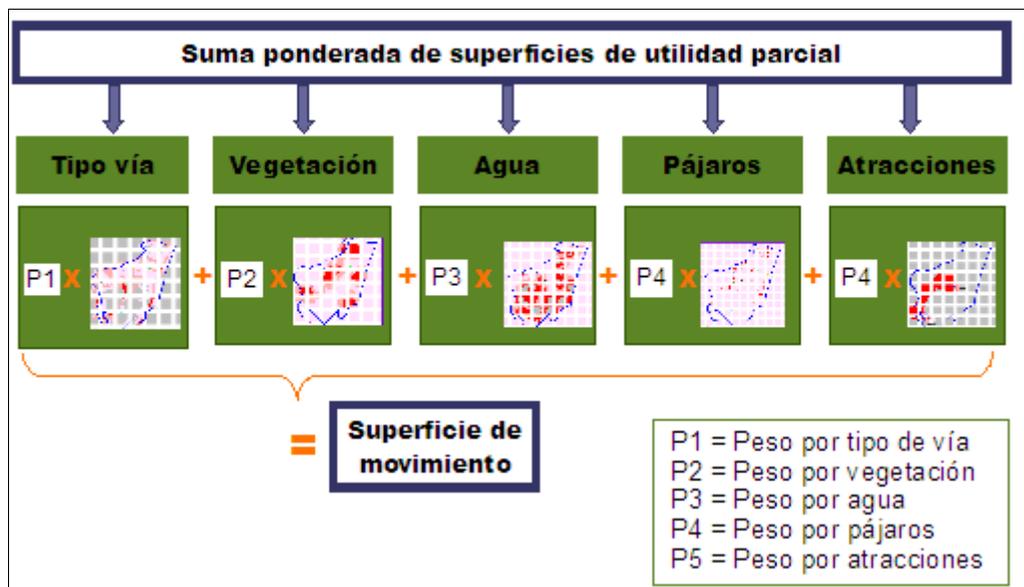


Figura 68: Cálculo de la superficie de movimiento como suma ponderada de las superficies de utilidad parcial

---

Observando este cálculo realizado para la obtención de la superficie de movimiento, podemos comprobar que es el mismo realizado por la función de interacción obtenida en el capítulo de metodología. Una vez que hemos obtenido las superficies de utilidad parcial correspondientes a cada preferencia, procedemos a calcular la superficie de movimiento correspondiente. Para ello previamente necesitamos obtener los pesos que ponderan cada una de las preferencias, por tanto, llegado a este punto vamos a considerar la obtención de dichos pesos.

#### *5.2.6.1 Obtención de los pesos asociados a cada preferencia*

Como ya hemos explicado a lo largo de este trabajo, los pesos asignados a las distintas preferencias representan la relevancia con la que cada persona considera cada una de estas preferencias en la elección de su camino, en este caso un visitante al parque.

En la encuesta realizada por GEOPKDD no se recogieron datos de los que se pudiesen inferir dichos pesos, por lo que nos hemos referido a otras fuentes para obtenerlos. Concretamente nos hemos apoyado en el trabajo de Elands y Van Marwijk (2007) en el que conceptualizan el balance de la calidad de recreación con el impacto ecológico producido, aplicándola también al parque Dwingelderveld.

En una parte de dicho estudio han establecido la influencia de varios parámetros en la elección de las rutas escogidas durante una experiencia recreacional, de entre los que hemos encontrado dos de interés para nuestra implementación:

- influencia provocada al visitante debida al tipo de vía, y
- influencia provocada al visitante debida a elementos de interés en el entorno.

De entre las valoraciones extraídas en dicho estudio asociadas a estos dos parámetros nos hemos fijado en las asignadas al visitante que sido categorizado como “caminante en compañía” (así traducido de su terminación “social walkers”) y “buscadores de atracciones” (así traducido de su terminación “browse entry”, para referirse a aquellos para los que visitar una serie de atracciones está entre sus expectativas) por ser éste el tipo de visitante que hemos considerado nosotros en nuestro estudio.

La valoración asignada a estos dos parámetros en su estudio para dicha categoría de visitante es de:

- (1) una importancia de 3 sobre 10 para la influencia del tipo de vía, y
- (2) una importancia de 10 sobre 10 para influencia de los elementos de interés en el entorno,

de donde deducimos que la influencia por elementos existentes en el entorno es aproximadamente tres veces mayor que la relativa al tipo de vía a seguir. Por lo tanto la ponderación que aplicamos a las preferencias por los diversos elementos que se encuentran en el entorno será el triple que la preferencia por tipo de vía.

En nuestro modelo los pesos son introducidos en porcentajes, por lo que establecemos los siguientes valores en tanto por ciento que mantienen esa relación de tres a uno:

- (1) una importancia del 25% para el tipo de vía
- (2) una importancia del 75% para los elementos del entorno.

Según las preferencias del visitante representado en este caso, los elementos del entorno considerados son las masas de agua, de vegetación, los pájaros y las atracciones, y su ponderación se ha repartido equitativamente entre ellos obteniéndose el siguiente reparto de pesos:

- peso de la preferencia por tipo de vía = 25%
- peso de la preferencia por abundancia de vegetación = 18.75%
- peso de la preferencia por proximidad a lagos = 18.75%
- peso de la preferencia por abundancia de pájaros = 18.75%
- peso de la preferencia por proximidad a atracciones = 18.75%

En anejo 3 se comparan las superficies de movimiento y las trayectorias simuladas obtenidas con esta definición de preferencias, con las obtenidas con otras definiciones de preferencias distintas.

### 5.2.6.2 Superficie de movimiento simulada

Una vez obtenidos los pesos, se puede obtener la superficie de movimiento como la suma ponderada de las distintas superficies de utilidad parciales como fue anteriormente explicado y esquematizado en la figura 68. La figura 69 muestra la superficie de movimiento así calculada para el desplazamiento correspondiente a la llegada del visitante al parque, durante el cual se desplaza desde el punto origen (parking utilizado por este visitante) al punto destino (punto más alejado del punto origen o punto final del recorrido). Como veremos a continuación, estos puntos origen y destino serán permutados durante el desplazamiento de regreso al parking desde el punto final del recorrido.

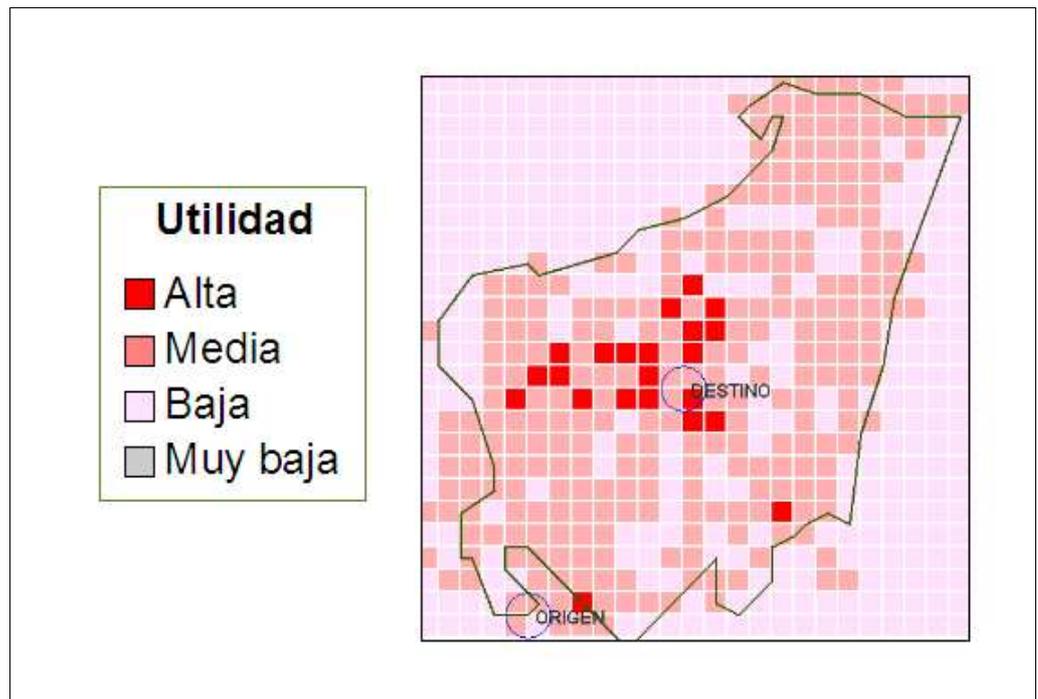


Figura 69: Superficie de movimiento obtenida para el caso 1

Con el fin de resaltar el concepto de superficie de movimiento como una superficie teórica virtual construida por los valores de utilidad asignados al entorno, se ha obtenido la vista tridimensional mediante el programa *Surfer* (ver figura 70).

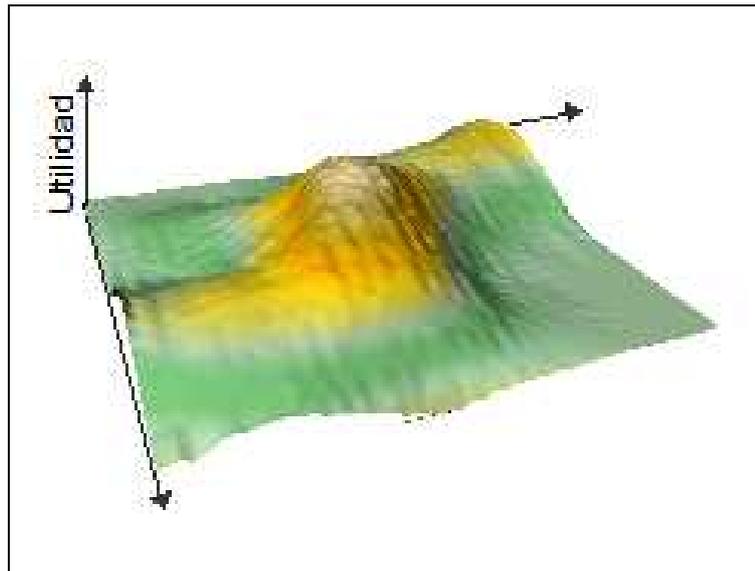


Figura 70: Superficie virtual obtenida con Surfer a partir de valores de utilidad (Superficie de movimiento)

### 5.2.7 Predicción de la trayectoria

A partir de esta superficie de movimiento la aplicación calcula la trayectoria correspondiente mediante el cálculo explicado en el capítulo 3 de metodología, en el apartado “Cálculo de trayectoria”, consistente en la búsqueda sucesiva de los mayores valores de utilidad partiendo del punto origen (parking) hasta llegar al punto destino (punto final del recorrido). La trayectoria resultante se muestra en la figura 71.

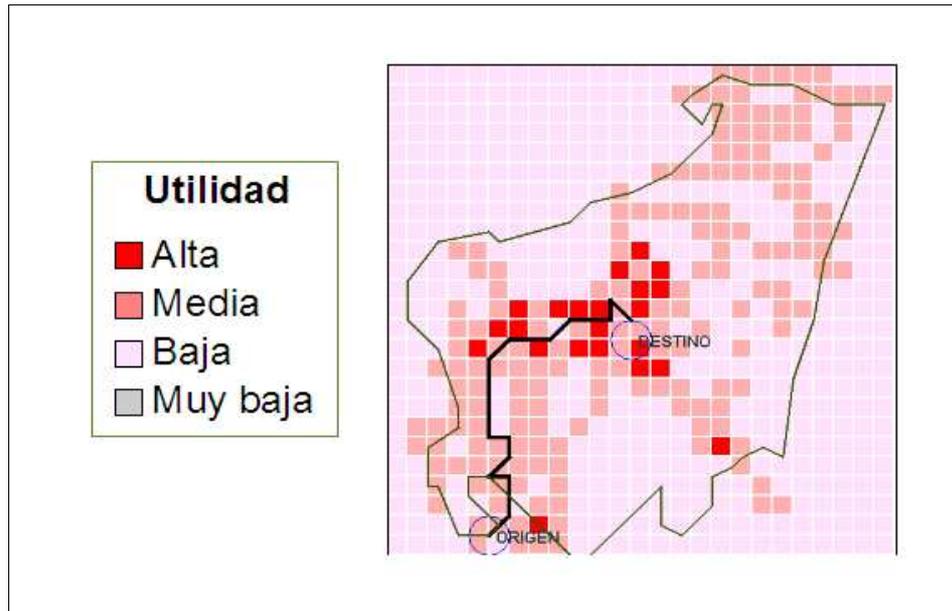


Figura 71: Trayectoria simulada para el caso 1

Esta trayectoria prevista representa el recorrido realizado por la persona desde su punto origen hasta alcanzar el punto destino que se había marcado antes de empezar el recorrido. Se puede observar como dicho recorrido, efectuado entre el punto inicial y el final, recorre las áreas de mayor utilidad. La aplicación nos permite superponer la trayectoria real observada con la prevista mediante el modelo, obteniendo el esquema mostrado en la figura 72 (siendo la observada la línea azul y la prevista la línea continua negra).

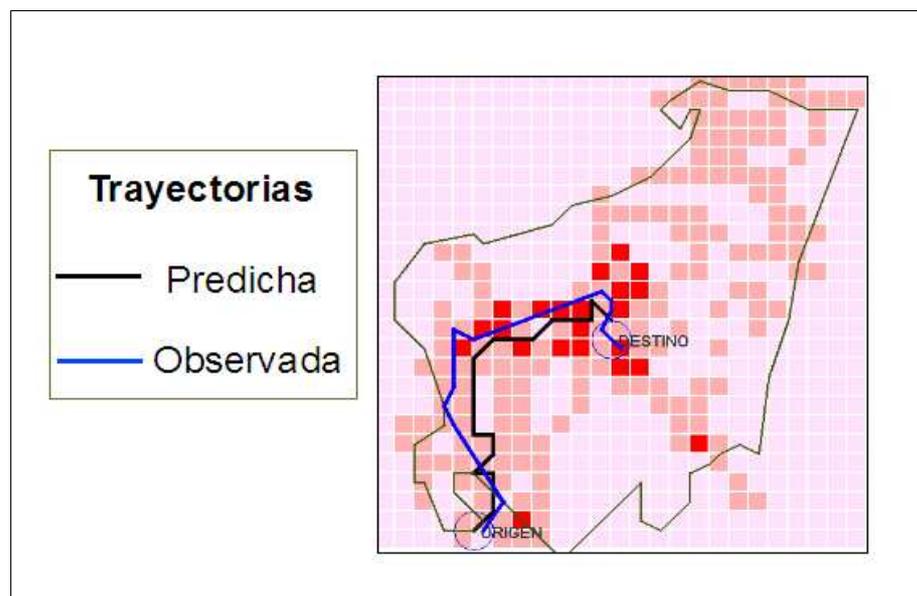


Figura 72: Superposición trayectorias prevista y observada para el caso 1

---

### 5.2.8 Modificación de superficie de movimiento por activación de eventos

Como hemos explicado en el capítulo de metodología cualquier evento que afecte a la persona sujeto del desplazamiento o a su entorno, originará variaciones en su correspondiente superficie de movimiento. Para comprobar dichas variaciones originadas sobre la superficie de movimiento por la aparición de eventos, la aplicación permite al usuario interactuar en el cálculo de la superficie de movimiento seleccionando y activando la aparición de distintos eventos.

Los posibles eventos a activar, tal y como fueron descritos en el anterior capítulo de implementación, pueden ser de dos tipos:

- Eventos que modifican el comportamiento de las personas (subclase “Actividad humana”)
- Eventos que actúan sobre las características del entorno (subclase “Evento sobre entorno”)

#### 5.2.8.1 Eventos que modifican el comportamiento de las personas

Como ya fue explicado en el capítulo de Metodología, este tipo de eventos está relacionado con las actividades realizadas por las personas (son los denominados “*eventos basados en actividades*”), que para este escenario son los siguientes:

- Persona llega al parque
- Persona se va del parque

Durante el primer evento la persona se encuentra en el punto origen (parking) y se dispone a pasear por el parque, y su correspondiente superficie de movimiento se corresponde con la anterior figura 68 representada. Sin embargo, durante el segundo evento, la persona se encuentra en el punto final de su recorrido, que pasa a ser el punto origen, y se dispone a llegar al parking que pasa a ser su punto destino. Como muestra la figura 73, mientras que en el primero la persona sentía atracción hacia su punto de destino en el final del recorrido, durante este segundo evento sufre atracción hacia el parking, por lo que obtenemos una superficie de movimiento distinta a la anterior, es decir, ambas superficies de movimiento representan movimientos en direcciones opuestas.

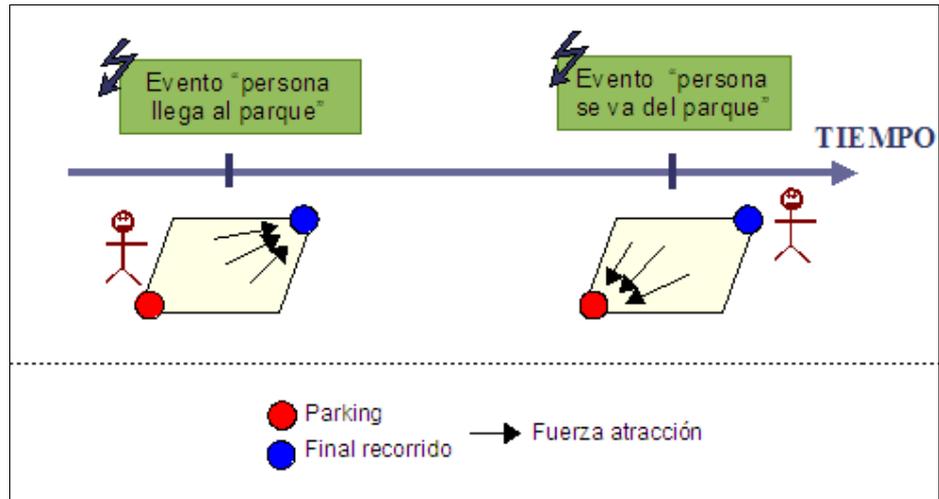


Figura 73: Variación de puntos de atracción en diferentes eventos basados en actividades humanas

La figura 74 muestra la superficie de movimiento obtenida por la aplicación tras la activación del evento “persona se va del parque”, junto con sus correspondientes trayectorias superpuestas, simulada y observada (línea de color negro y línea azul respectivamente).

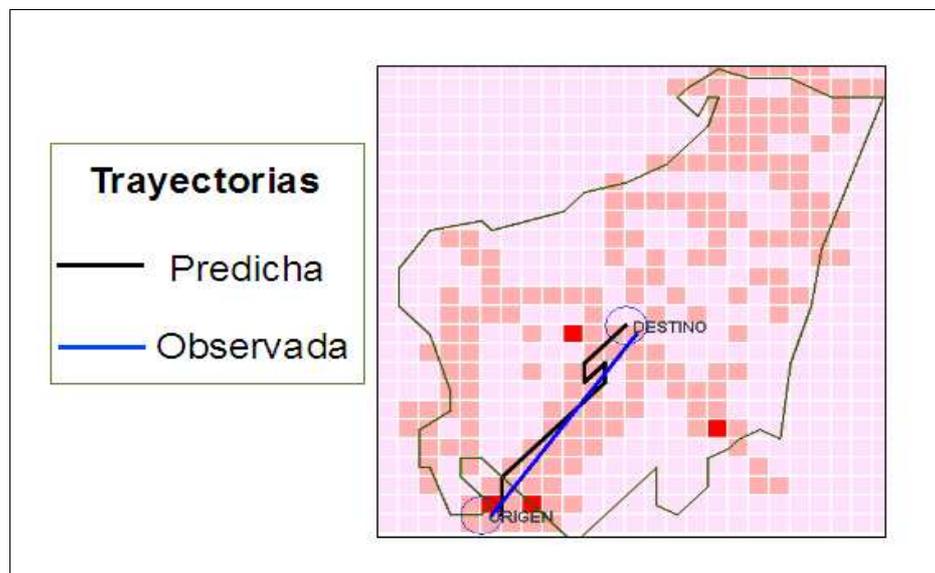


Figura 74: Superficie de movimiento correspondiente al evento “persona se va del parque” para el caso 1

#### 5.2.8.2 Eventos que actúan sobre las características del entorno

Este otro tipo de eventos está relacionado con los cambios producidos sobre el entorno. Como en el experimento realizado por GEOPKDD no hay constancia de ningún cambio producido y registrado sobre el parque, hemos

simulado la aparición de algunos eventos para comprobar como repercuten sobre la superficie de movimiento.

En este primer caso hemos simulado el posible evento de “cierre de vías tipo ancha” como consecuencia de un posible accidente o una posible reparación sobre la vía. Como muestra la figura 75, tras este evento, este tipo de vías dejarán de estar operativas, pudiendo ser utilizadas solamente las restantes tipos de vías.

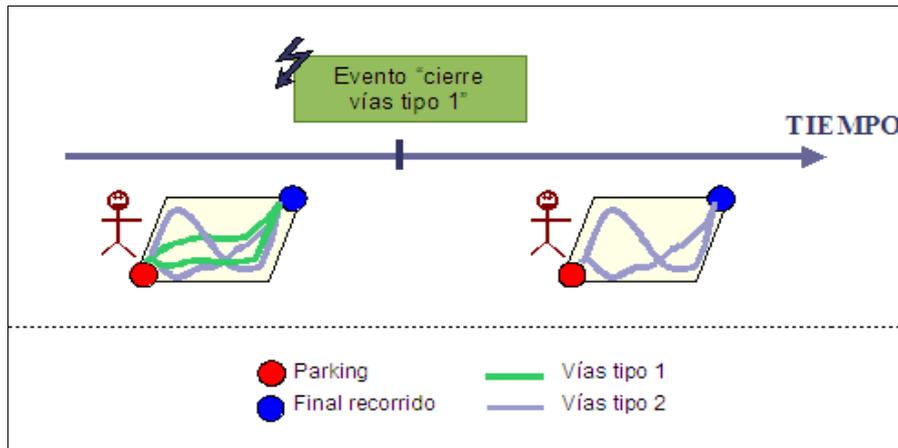


Figura 75: Activación del evento “cierre vía tipo 1”

Activando dicho evento en la aplicación obtendremos la superficie de movimiento mostrada en la figura 76 y, efectivamente, comprobamos que ha variado respecto la superficie de movimiento inicial.

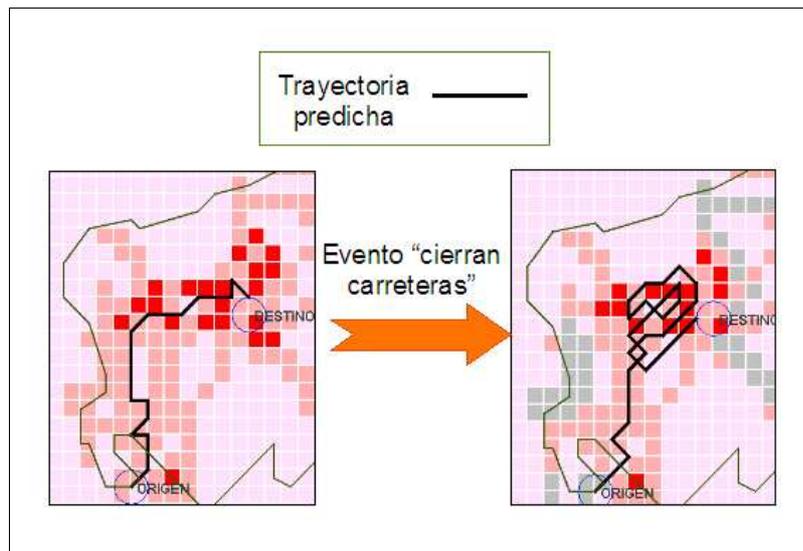


Figura 76: Superficie de movimiento correspondiente al evento “Cierran vías tipo anchas” calculada para el caso 1

## 5.3 Segundo Caso

La tipología de visitante en este segundo caso se corresponde con una persona de edad adulta cuyo propósito de visita al parque es el de pasear. A este visitante con semejante propósito le corresponden las preferencias que se describen a continuación. Esta tipología de visitante tiene como preferencia pasear por los caminos estrechos pavimentados, por zonas donde se puedan contemplar lagos y áreas de vegetación (la preferencia por pájaros ahora ha desaparecido). A continuación se muestran las superficies de utilidad parciales obtenidas por la aplicación, correspondientes a cada una de sus preferencias.

### 5.3.1 Superficie de utilidad parcial por tipo de vía

La superficie de utilidad parcial por tipo de vía se obtiene igual que en el caso anterior, evaluando las vías existentes en el parque según las preferencias que tiene este visitante por el tipo de vía (tras los datos proporcionados por GEOPKDD comprobamos su preferencia por caminos estrechos pavimentados frente a los más anchos y no pavimentados). La aplicación realiza esta evaluación de utilidad comparando cada tipo de vía con las preferencias del visitante, asignando los valores de utilidad más altos en las vías de mayor orden de preferencia del visitante (figura 77).

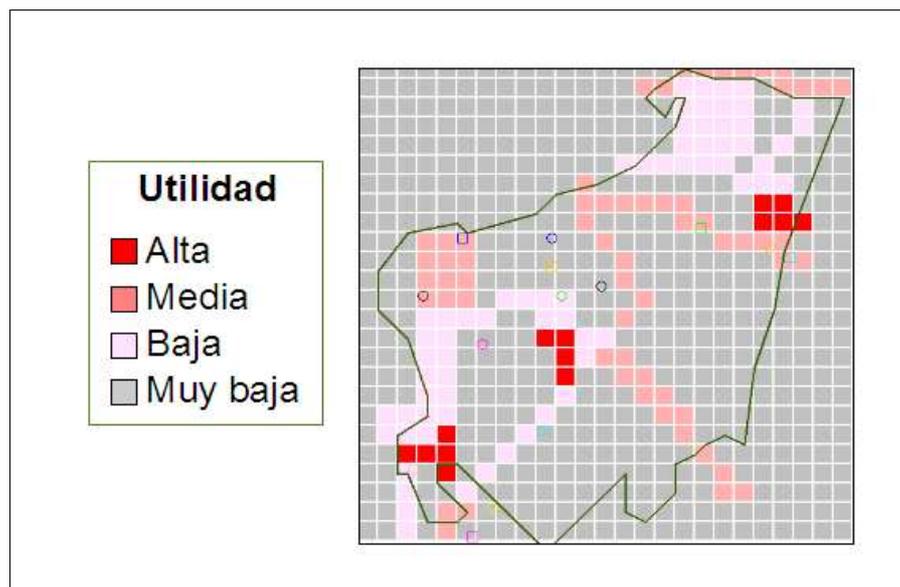


Figura 77: Utilidad parcial por tipo de vías calculada para el caso 2

### 5.3.2 Superficie de utilidad parcial por vegetación y agua

Se procede de igual modo al cálculo de utilidad parcial por presencia de agua y de vegetación. Este visitante que tiene preferencia por ver lagos y vegetación, obtendrá los mayores valores de utilidad en aquellas zonas del parque inmediatas a los lagos y a zonas de alta vegetación. Estas dos preferencias están presentes del mismo modo que en el caso 1, ya que comparten estas preferencias, por lo tanto sus correspondientes superficies de utilidad parcial por vegetación y por agua serán las mismas que en el anterior caso, las mostradas en las figuras 64 y 65.

### 5.3.3 Superficie de utilidad parcial por atracciones

Las superficies de utilidad parcial por atracciones se calculan de manera análoga a partir de su definición de preferencias por atracciones, que se corresponden con aquéllas que desea visitar el visitante durante su paseo por el parque (establo de ovejas y radiotelescopio). De modo que las zonas más cercanas a estas atracciones le proporcionarán una mayor utilidad que aquellas más alejadas. En consiguiente con lo expuesto, la aplicación ha calculado la superficie de utilidad parcial por atracciones que muestra la figura 78.

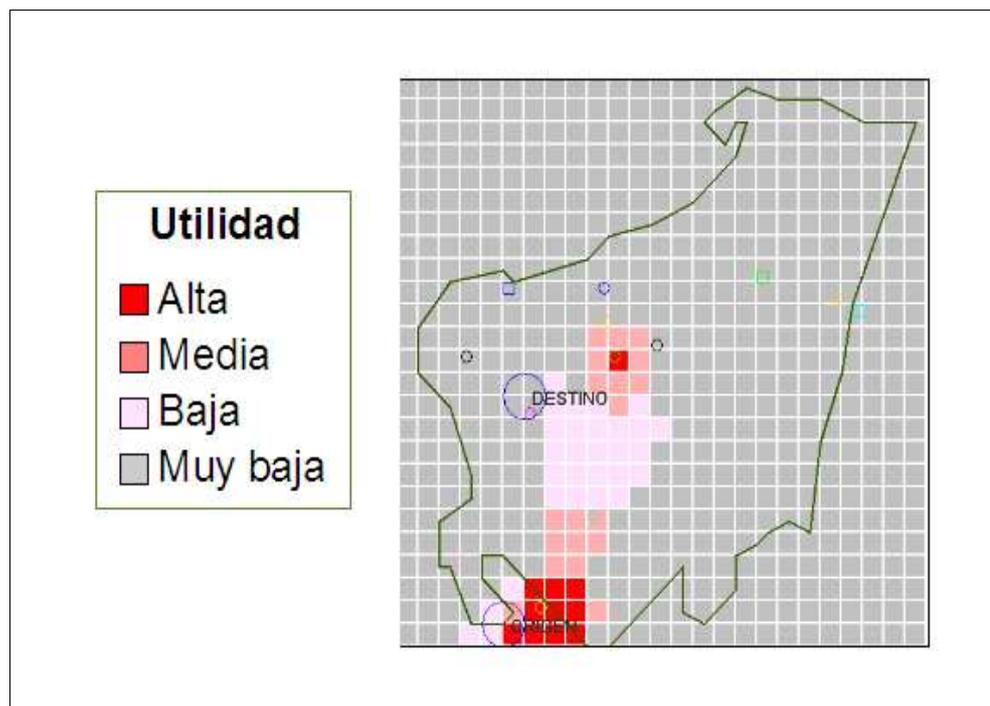


Figura 78: Utilidad parcial por atracciones visitadas en el caso 2.

### 5.3.4 Superficie de movimiento simulada

Una vez se tienen las utilidades parciales por cada preferencia, la aplicación calcula la utilidad total mediante la suma ponderada de todas ellas, obteniendo la superficie de movimiento mostrada en la figura 79.

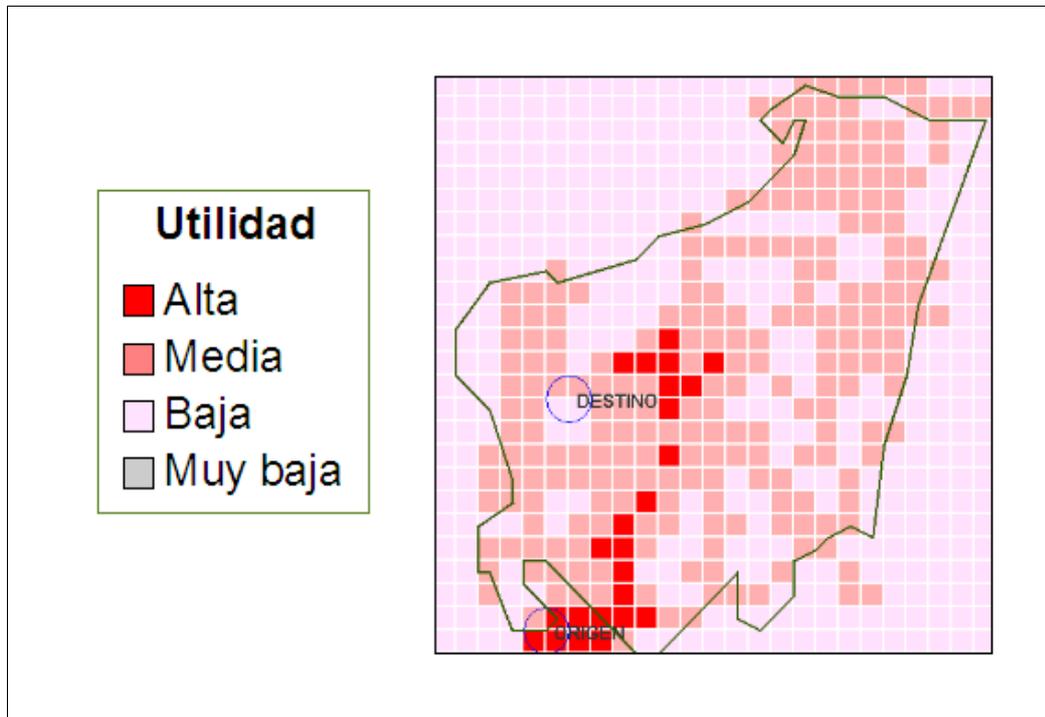


Figura 79: Superficie de movimiento calculada para el caso 2

También en este caso de visitante se ha obtenido la vista tridimensional de la superficie de movimiento mediante el programa *Surfer*, que es mostrada en la figura 80.

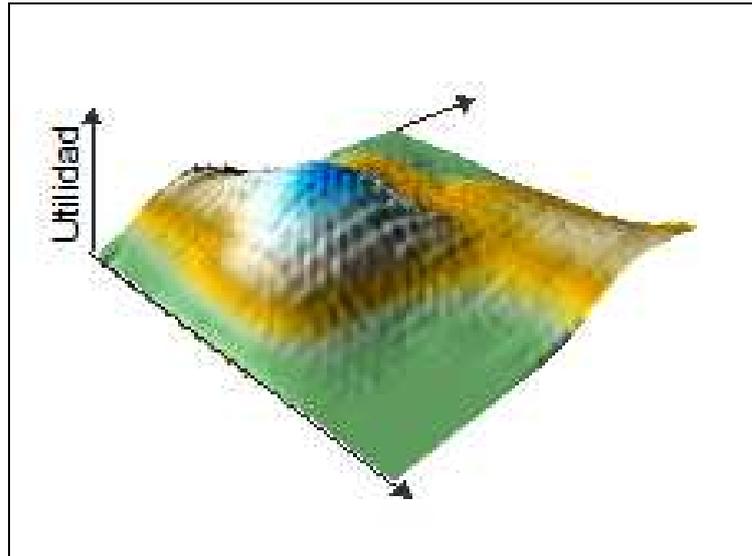


Figura 80: Superficie virtual obtenida con Surfer a partir de valores de utilidad

### 5.3.5 Predicción de la trayectoria

A partir de esta superficie de movimiento la aplicación calcula la trayectoria correspondiente buscando los mayores valores de utilidad, como ya fue explicado, partiendo del punto origen (parking) hasta llegar al punto destino (punto final de recorrido). A partir de esta superficie de movimiento obtenida se ha calculado su correspondiente trayectoria simulada, la cual se muestra en la siguiente imagen (línea negra), superpuesta a la observada (línea azul) (figura 81).

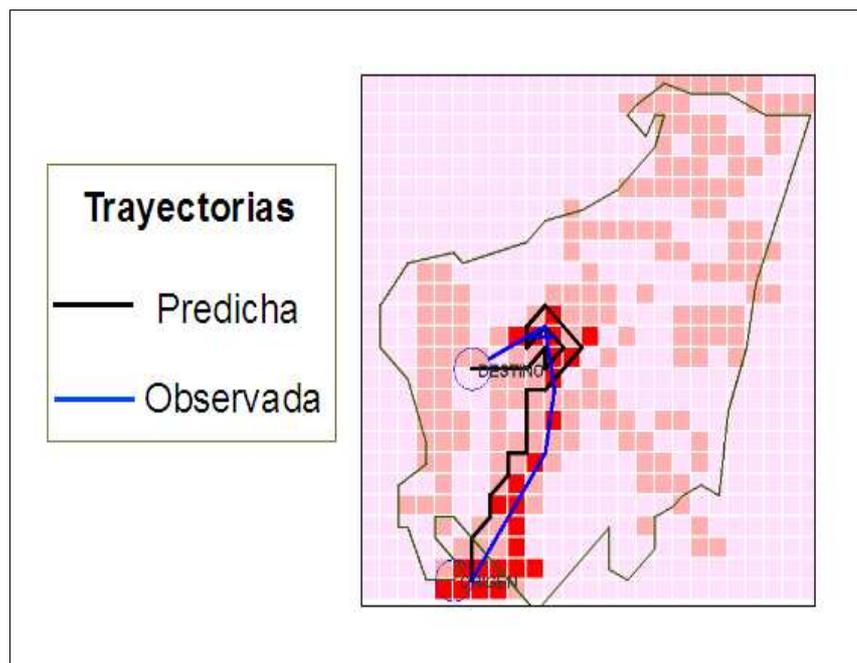


Figura 81: Trayectoria simulada y observada para el caso 2.

### 5.3.6 Modificación de superficie de movimiento por activación de eventos

Al igual que en el anterior caso, en éste también vamos a comprobar cómo cualquier evento que afecte a la persona sujeto del desplazamiento o a su entorno, originará variaciones en su correspondiente superficie de movimiento. Como se explica a continuación, en este segundo caso nos centraremos en la repercusión de eventos que actúan sobre el entorno.

#### 5.3.6.1 Eventos que actúan sobre las características del entorno

Para este caso hemos simulado el posible evento “cierre de radiotelescopio” como consecuencia de una posible avería o debido a la finalización del horario de visita establecido.

Como muestra la figura 82, tras la activación de este evento el radiotelescopio dejaría de ejercer la fuerza de atracción que ejercía antes, y por lo tanto desaparecería el incremento de valores de utilidad en su entorno.

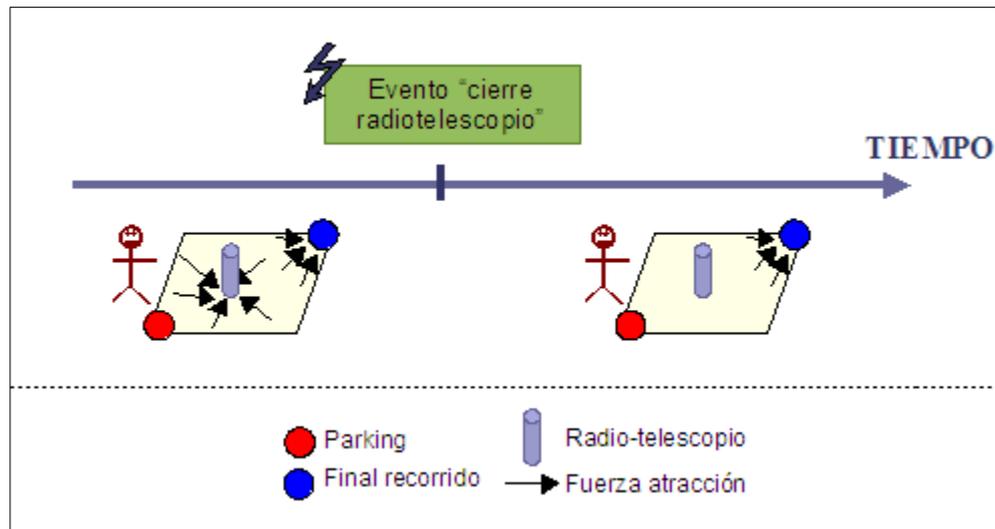


Figura 82: Desaparición de fuerzas de atracción provocadas por el radiotelescopio tras su cierre

La figura 83 muestra la superficie de movimiento resultante tras dicho evento (cierre de radiotelescopio) y efectivamente podemos comprobar cómo ha variado respecto de la superficie de movimiento inicial.

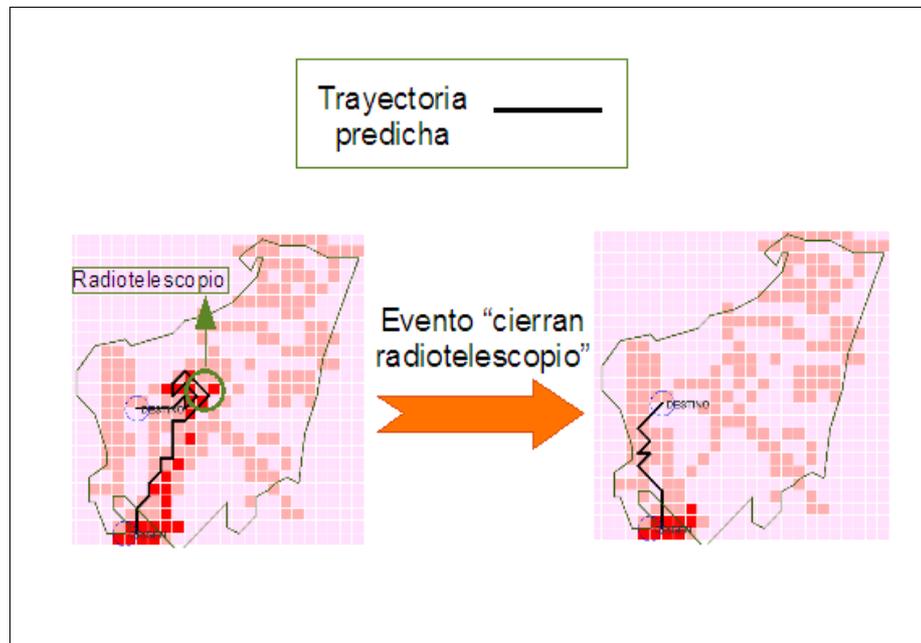


Figura 83: Superficie de movimiento y trayectoria correspondientes al evento "Cierran radiotelescopio" calculada para el caso 2

## 5.4 Tercer Caso

La tipología de visitante en este tercer caso se corresponde a una familia con niños cuyo propósito de visita al parque es el de sacar fotos en él. Este visitante tiene como preferencia pasear por los caminos anchos pavimentados frente a los estrechos para visitar diversas atracciones. En este caso las preferencias por vegetación pájaros y lagos han desaparecido. A continuación se muestran las superficies de utilidad parciales obtenidas por la aplicación, correspondientes a cada una de sus preferencias.

### 5.4.1 Superficie de utilidad parcial por tipo de vía

Al igual que en los dos casos anteriores, se calcula para este caso la superficie de utilidad parcial por tipo de vía, evaluando las vías existentes en el parque según las preferencias que tiene este visitante por el tipo de vía (caminos anchos pavimentados frente a los más estrechos no pavimentadas). La aplicación realiza esta evaluación de utilidad comparando cada tipo de vía con las preferencias del visitante, asignando los valores de utilidad más altos en las vías de mayor orden de preferencia del visitante. La superficie de utilidad parcial por tipo de vía calculada para este tercer caso se muestra en la figura 84.

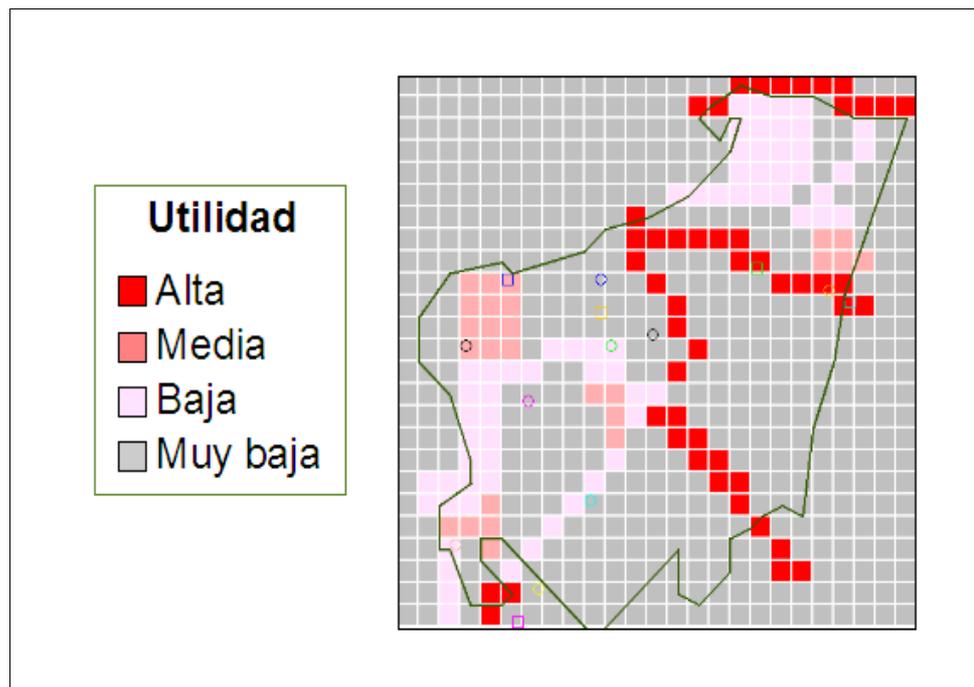


Figura 84: Superficie de utilidad por tipo de vía calculada para el caso 3

### 5.4.2 Superficie de utilidad parcial por atracciones

Las preferencias por atracciones que tiene este visitante se corresponden con aquellas que desea visitar durante su paseo por el parque (radiotelescopio y zona de humedales), de modo que las zonas más cercanas a estas atracciones le proporcionarán una mayor utilidad que aquellas más alejadas. La superficie de utilidad calculada considerando estas preferencias es la que se corresponde con la obtenida en la figura 85 por la aplicación.

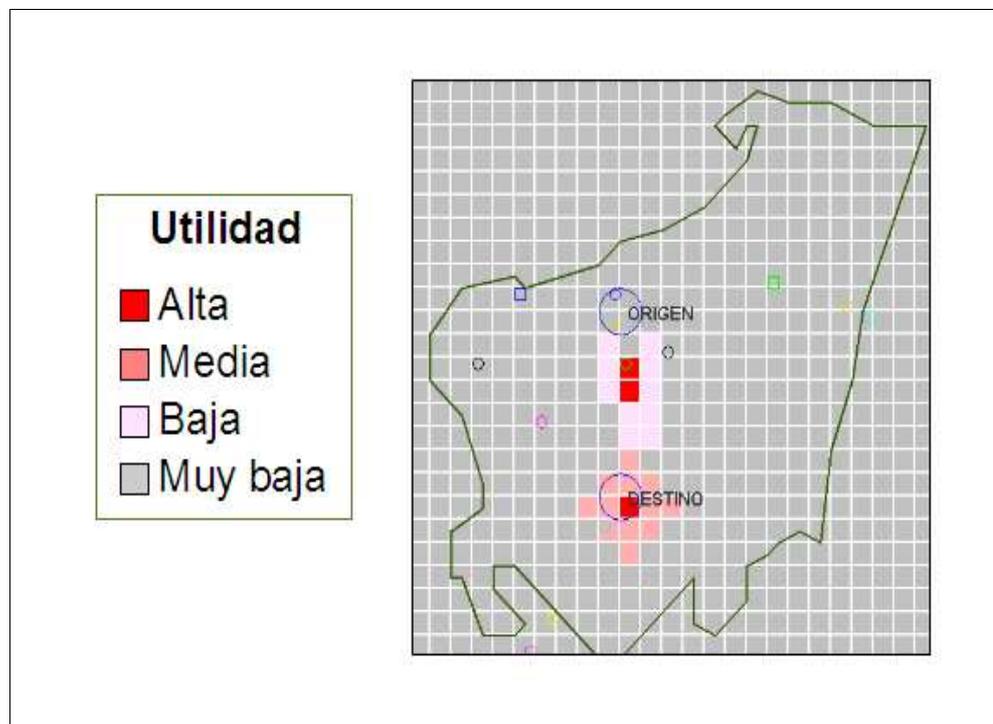


Figura 85: Superficie de utilidad por atracciones visitadas para el caso 3

### 5.4.3 Superficie de movimiento simulada

Una vez se tienen las utilidades parciales por cada preferencia, la aplicación calcula la utilidad total mediante la suma ponderada de todas ellas. La superficie de movimiento simulada para este caso se muestra en la siguiente imagen, figura 86.

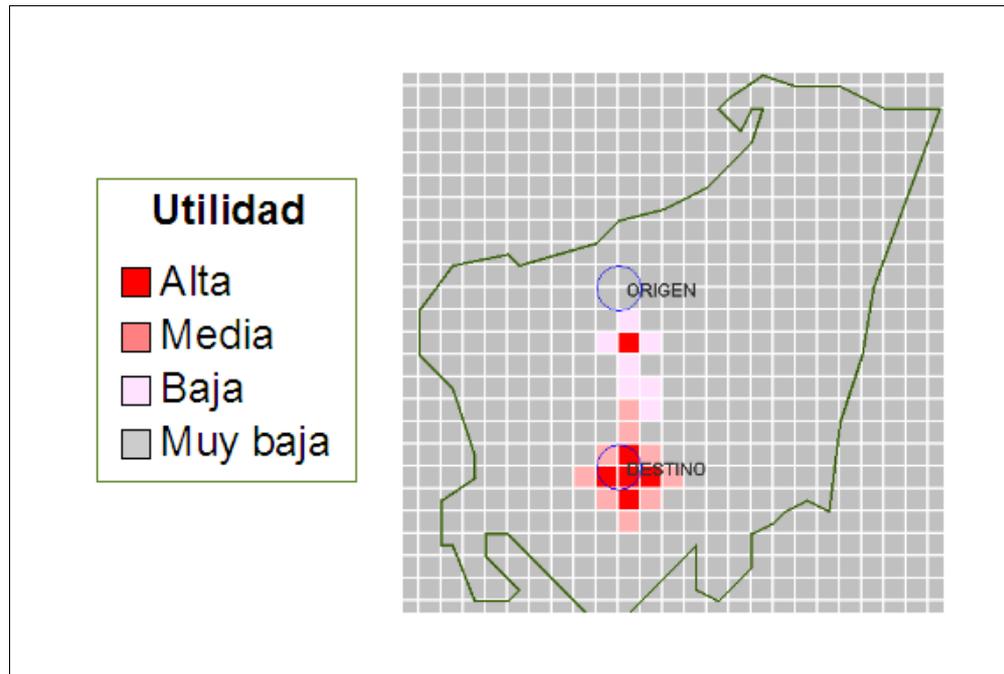


Figura 86: Superficie de movimiento calculada para el caso 3

Igualmente se ha obtenido la vista tridimensional de la superficie de movimiento mediante el programa *Surfer*, que es mostrada en la figura 87.

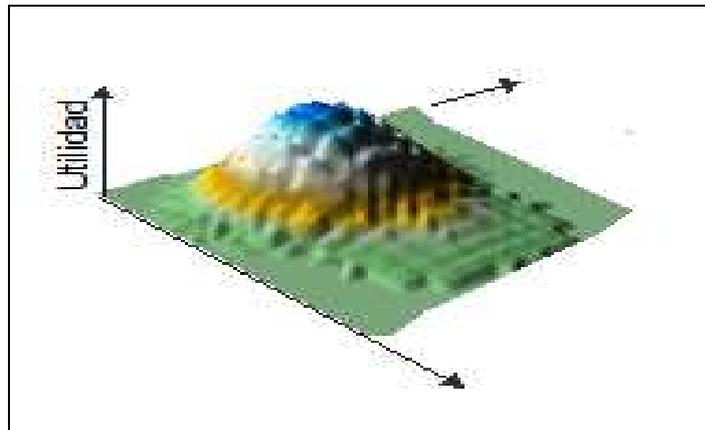


Figura 87: Superficie virtual obtenida con Surfer a partir de valores de utilidad

### 5.4.5 Predicción de la trayectoria

A partir de esta superficie de movimiento obtenida se ha calculado su correspondiente trayectoria simulada, la cual se muestra en la siguiente imagen 88 superpuesta a la trayectoria observada (línea negra y azul respectivamente).

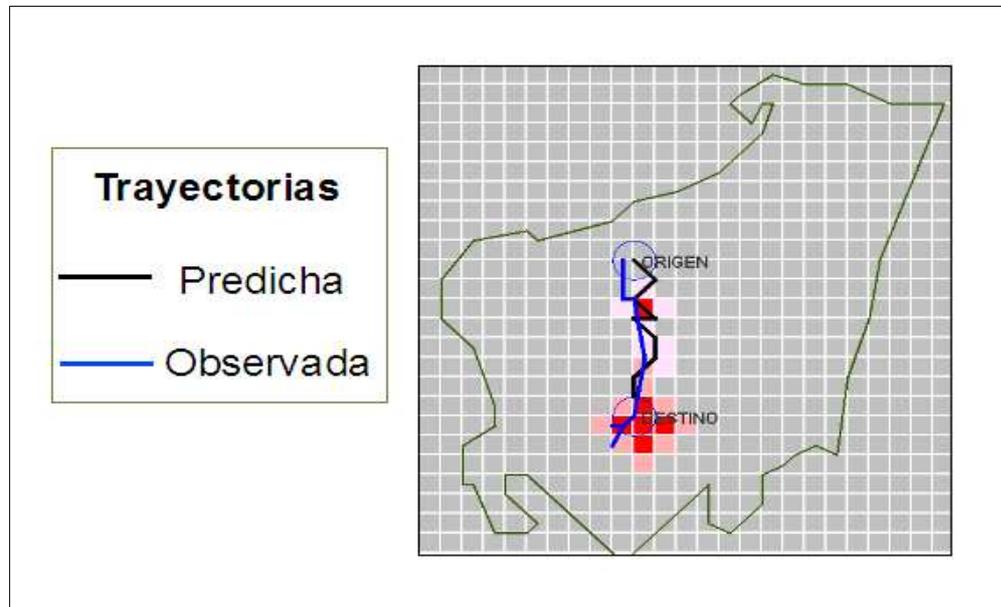


Figura 88: Superposición de trayectorias simulada y observada para el caso 3

### 5.4.6 Modificación de superficie de movimiento por activación de eventos

Al igual que en el caso anterior vamos a comprobar cómo un evento que afecta al entorno (cierre del radiotelescopio), originará variaciones en la correspondiente superficie de movimiento.

#### 5.4.6.1 Eventos que actúan sobre las características del entorno

En la figura 89 comprobamos una vez más como si activamos el evento “Cierran radiotelescopio” varían la superficie de movimiento inicial y su correspondiente trayectoria simulada.

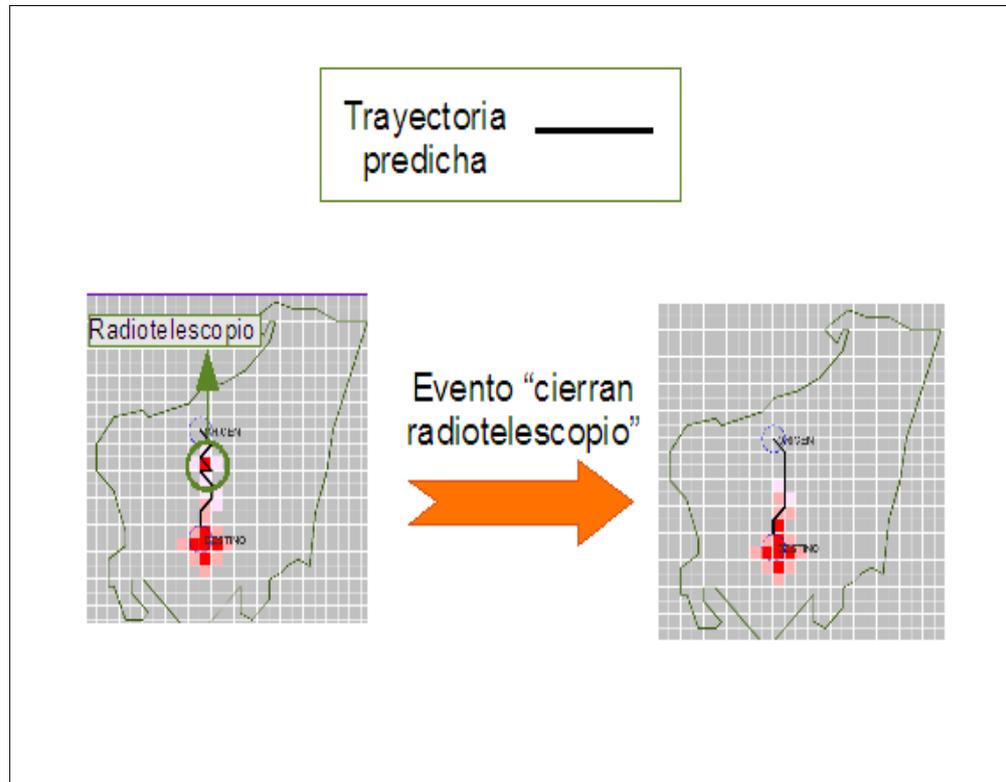


Figura 89: Superficie de movimiento tras activar el evento "Cierran radiotelescopio" en el caso 3

## 5.5 Discusión de los resultados

### 5.5.1 Comparación de las trayectorias

El proceso de evaluación del modelo que se realiza posteriormente, parte de las discrepancias encontradas en las superposiciones de las trayectorias obtenidas mediante el modelo con las reales observadas para un mismo escenario (figura 90).

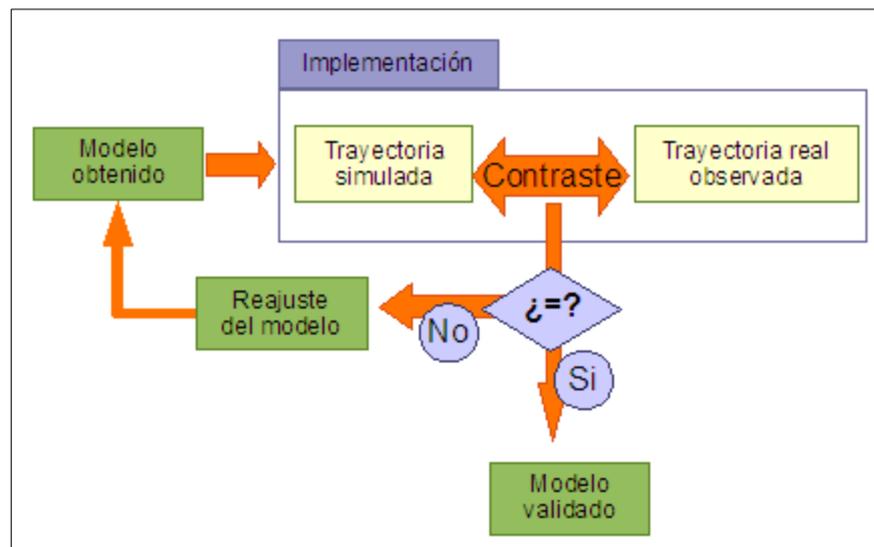


Figura 90: Proceso de evaluación del modelo

Por ello procedemos a hacer un análisis de dicha superposición de trayectorias, en la que detectamos dos aspectos en el patrón de comportamiento simulado:

- Por un lado comprobamos la coincidencia de formas de las trayectorias real y simulada a escala macroscópica, es decir a bajo nivel de detalle, lo que denota la existencia de un patrón general en el desplazamiento de las personas en la manera que una persona se mueve con la finalidad de incrementar su nivel de utilidad.
- Por otro lado, analizando con un nivel de mayor detalle, detectamos ciertas discrepancias cuantificadas en las desviaciones máximas mostradas en la tabla 11. Estas discrepancias denotan la existencia de una componente errónea en el modelo que hace que obtengamos trayectorias simuladas dentro de un margen de exactitud, cuyas causas que serán discutidas en el epígrafe de evaluación del modelo.

Tabla 11: Desviaciones obtenidas para cada visitante

Caso visitante	Longitud Total (km)	Desviación máxima (m)
1	9	200
2	10	400
3	5	200

### 5.5.2 Contraste de trayectoria real sobre superficie de movimiento

Una vez comparadas las trayectorias simulada y real, procedemos a hacer lo mismo con las superficies de movimiento obtenidas por el modelo y las trayectorias reales observadas (figura 91). En dicho contraste observamos que la trayectoria observada coincide con los puntos de mayor utilidad de la superficie de movimiento, lo que nos conduce a pensar que aunque la trayectoria predicha no coincide exactamente con la real, sí hemos obtenido un pronóstico de los puntos del entorno más probables de paso de dicha trayectoria.

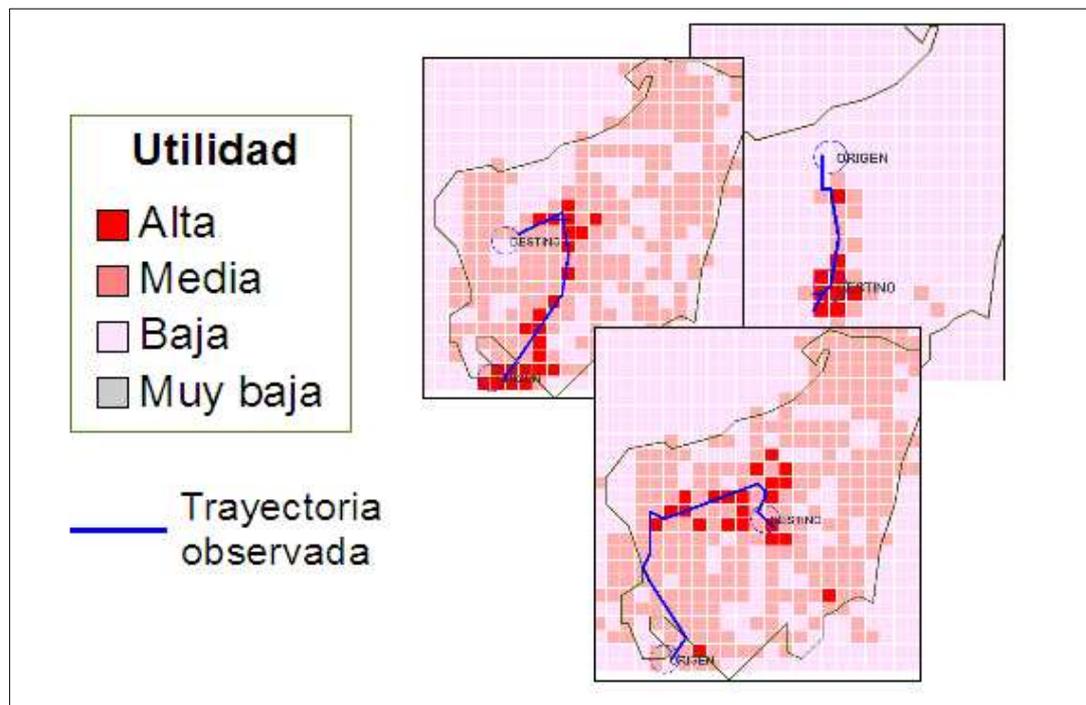


Figura 91: Contraste entre superficie de movimiento obtenida y trayectoria real

Por lo tanto la superficie de movimiento nos está dando los puntos más probables de paso de una trayectoria, y sin embargo encontramos pequeñas discrepancias entre la trayectoria simulada asociada a esa superficie y la real observada. Esto nos indica que dentro del patrón general de comportamiento pueden existir pequeñas variaciones, lo que nos ha motivado a analizar, en el siguiente epígrafe, las posibles variaciones que puede sufrir una trayectoria.

### 5.5.3 Variabilidad de la trayectoria: difluencias

Vamos a considerar que aunque una persona obtenga la máxima utilidad a lo largo de una trayectoria, es frecuente que no siga siempre esa misma trayectoria y experimente variaciones. Por lo tanto el modelo estaría calculando la trayectoria elegida por una persona en la mayoría de los casos, o en aquellos en que se busque la mayor utilidad, pero no podemos olvidar que puede haber factores que alteren dicha trayectoria.

En este epígrafe vamos a discutir sobre las variaciones que sufren las trayectorias de las personas y como son interpretadas por el modelo. Para ello vamos a comprobar que pasaría al introducir una pequeña componente aleatoria que altere ligeramente los valores de la superficie de movimiento. Como veremos a continuación, esta pequeña componente aleatoria provoca pequeñas discrepancias en las trayectorias a nivel microscópico (a alto nivel de detalle) mientras que a nivel macroscópico (a bajo nivel de detalle) no alteran la forma general de las trayectorias, es decir, se respeta el patrón general de comportamiento.

Si las anteriores trayectorias están calculadas a partir de los valores de una determinada superficie de movimiento, ahora se calculan sobre una superficie de movimiento a la que se le ha sumado a sus distintas celdas un pequeño valor aleatorio de utilidad (entre un 0 y un 1% del mayor valor de utilidad). Analizando la superposición de dichas variaciones de trayectorias así calculadas, volvemos a encontrarnos con la analogía entre flujo y desplazamiento en la que se basa la superficie de movimiento (figura 92).

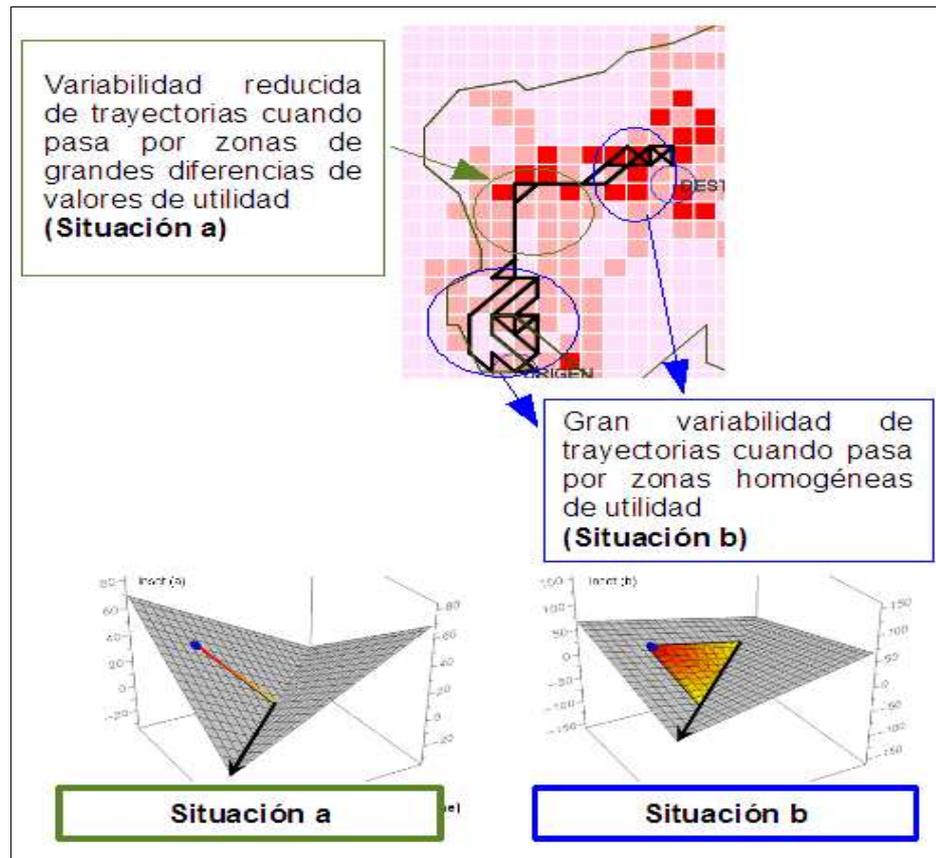


Figura 92: Trayectoria versus flujo en situaciones de grandes y pequeñas variaciones de superficie.  
Imágenes de flujo obtenidas de Berry, (2007)

En zonas de la superficie de movimiento con mayores incrementos de utilidad, nos encontramos con una variabilidad de trayectorias más reducida (situación a de la figura 92) que en zonas con incrementos menos pronunciados (situación b de la figura 88). Teniendo en cuenta que la trayectoria se calcula buscando el gradiente máximo de utilidad en la superficie de movimiento, encontramos este mismo comportamiento en la manera en que los flujos discurren por una superficie buscando la máxima pendiente. El flujo abarca más superficie al discurrir por zonas de menor pendiente (situación b figura 92) que al discurrir por grandes pendientes (situación a figura 92). En la analogía con el flujo de agua esto lo que ocurre en la naturaleza, tanto en áreas deltaicas tanto litorales (Nilo, Níger, Ganges-Brahamaputra) como en los llamados deltas internos (Paraná, Guadalquivir), en los que el curso se divide en brazos sucesivos para posteriormente volver a confluir. Este fenómeno es el considerado como “trenzado”: la falta de pendiente se traduce en la presencia de difluencias.

Aplicando este concepto al desplazamiento de las personas, como ilustra la figura 93, encontramos más incertidumbre (mayor número de posibles difluencias) en las trayectorias que pasan por zonas homogéneas de valores de utilidad, ya que no hay ningún camino que ofrezca más ventajas frente los demás.

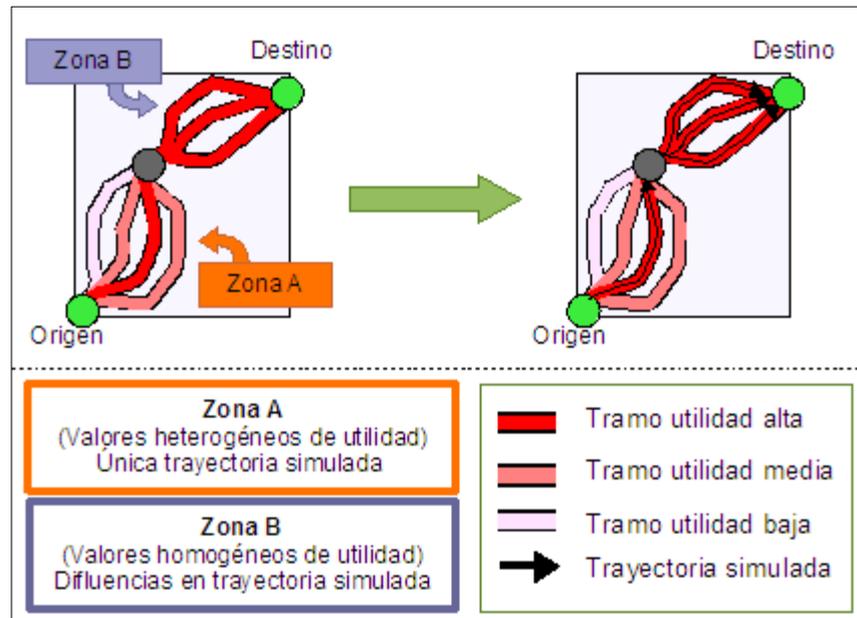


Figura 93: Difluencias en la trayectoria simulada en zonas de valores homogéneos de densidad

## 5.6 Evaluación del modelo

Una vez vistos y discutidos los resultados obtenidos, procedemos a realizar una evaluación de los mismos que nos permitirán considerar la validación del modelo propuesto. En el contraste obtenido por la superposición de trayectorias hemos detectado dos aspectos en el patrón de comportamiento simulado:

- Por un lado comprobamos la existencia de un patrón general en el desplazamiento de las personas en la manera que una persona se mueve con la finalidad de incrementar su nivel de utilidad.
- Por otro lado detectamos una componente errónea, que hace que obtengamos trayectorias simuladas dentro de un margen de exactitud.

Atribuimos las posibles discrepancias entre trayectorias a la posibilidad de ocurrencia de eventos imprevisibles a los que son susceptibles las personas (desviarse tras recibir una llamada telefónica, por encontrarse con un conocido o un elemento inesperado, o incluso por una picadura de avispa, etc.). En

consonancia con Cziko (1989), que argumenta que en la modelización del comportamiento humano, caracterizado por su susceptibilidad frente a una infinidad de factores, siempre va a haber algunos eventos que se tengan en cuenta en el modelo (que en nuestro caso serían los posibles eventos imprevisibles anteriormente mencionados, como llamadas, encuentros, ...). Recuérdese que un modelo es una simplificación de la realidad y por tanto no puede contemplar un número ilimitado de factores, ya que necesitaríamos a su vez de un segundo modelo para simplificar y entender el modelo obtenido. Además de eventos inesperados, también incluimos entre las causas de estas posibles discrepancias una mala determinación de las preferencias de los visitantes, debido a una posible falta de rigor en las respuestas de las encuestas o a una mala interpretación de las mismas.

Por lo tanto puede haber discrepancias entre la predicción obtenida y la realidad, cuyas causas resumimos de la siguiente manera:

- Áreas de valores homogéneos de utilidad: provocan difluencias de recorrido por no haber una alternativa mejor que otra.
- Existencia de posibles factores no contemplados (recibir una llamada, encontrarse con un conocido): provocan discrepancias de trayectoria de la persona.
- Mala determinación de las preferencias de los visitantes: provocan simulaciones erróneas por haber partido de información equivocada.

## 5.7 Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en este capítulo se pueden esquematizar mediante las siguientes cuestiones:

- La validación del modelo se ha llevado a cabo mediante el contraste entre comportamientos simulados y observados para una misma definición de escenario, para lo que ha sido imprescindible pasar previamente por la etapa de implementación del modelo.
- En vista de los resultados, el modelo propuesto en un principio se encontraría dentro del marco de modelos de tipo probabilístico (frente a los deterministas) puesto que las trayectorias simuladas están afectadas de un factor de probabilidad que provoca la aparición de cierta incertidumbre

en la determinación del comportamiento. La incertidumbre obtenida en la simulación se achaca a los siguientes factores:

- Las áreas de valores homogéneos de utilidad provocan difluencias de recorrido por no haber una alternativa mejor que otra.
- La existencia de posibles factores no contemplados provocan discrepancias en la trayectoria de la persona.
- La mala determinación de las preferencias de los visitantes provocan simulaciones erróneas por haber partido de información equivocada.

Decimos que el modelo propuesto se encontraría clasificado dentro de los modelos de tipo probabilístico sólo en un principio, porque para demostrarlo se requiere un estudio estadístico exhaustivo, que proporcione el modelo de probabilidad de los desvíos de las trayectorias, que nos permitiría calcular un nivel de confianza para las estimaciones. Por ello clasificamos al modelo como un modelo aproximado que proporciona trayectorias más exactas cuanto menor es el nivel de detalle (a escalas macro). Para aumentar el nivel de exactitud a bajo nivel de detalle (escalas micro) deberíamos aumentar el número de factores considerados (prever un mayor número de eventos que pueden afectar a la persona) y afinar al máximo la definición de preferencias de la persona.

- Resumiendo, la trayectoria que calcula el modelo es la trayectoria que elegiría una persona en la mayoría de los casos, o en aquellos en que se busque la mayor utilidad, pero siempre estaría sometida a pequeñas variaciones producto de factores aleatorios.

## **Capítulo 6. Descripción geométrica del movimiento resultante**

Este capítulo propone la descripción geométrica de movimiento que nos permitirá inferir las relaciones existentes entre el movimiento de un cuerpo con sus contextos espacial y temporal, y también con los movimientos de otros cuerpos. Para representar el movimiento del cuerpo propone formalizar el movimiento mediante una función espacio-temporal. Y para representar los contextos espacio-temporales con los que interactúa el cuerpo en movimiento introduce unas primitivas espaciotemporales, definidas geoméricamente. A partir de la función espacio-temporal y las primitivas espacio-temporales podremos calcular las relaciones existentes entre el movimiento del cuerpo y su contexto espacio-temporal y movimiento de otros cuerpos mediante operaciones geométricas. Esta metodología será aplicada al movimiento de una persona andando por el parque obtenido en las superficies de movimiento.

---

## 6.1 Introducción

Este capítulo trata por un lado la formalización del movimiento de un cuerpo en base a los eventos que lo originan y modifican sus características (velocidad, dirección), de manera que estos eventos representen los puntos de inflexión donde cambian dichas características del movimiento (ej. cambios de velocidad o aceleraciones, paradas, giros). Y por otro lado trata la formalización de contextos espacio-temporales con los que interactúa el movimiento mediante la introducción de una serie de primitivas espacio-temporales. Esto nos ha permitido diseñar un mecanismo que proporciona la descripción geométrica del movimiento de un cuerpo permitiendo hacer consultas sobre aspectos derivados de dicho movimiento (ej: en qué posición se encuentra un cuerpo en un momento dado, o si dos cuerpos en movimiento se han cruzado en un algún momento). Este mecanismo diseñado, que constituye otra de las principales aportaciones de la tesis, ha sido aplicado a la descripción topológica del movimiento de personas simulado a partir de las superficies de movimiento.

Esta descripción geométrica nos proporcionaría la posibilidad de formalizar las relaciones topológicas relativas al movimiento de un cuerpo. Si combinamos la topología espacial y topología temporal en un mismo mecanismo podremos inferir relaciones del movimiento de un cuerpo con ambos contextos, espacial y temporal, e incluso con el movimiento de otros cuerpos. Referente a relaciones combinadas espaciales y temporales de dos cuerpos, encontramos en Claramunt & Jiang (2000) una representación visual de dichas relaciones espaciales y temporales entre dos cuerpos dinámicos de una manera cualitativa (iguales, se tocan, coinciden, etc.), ver figura 94. O en Noyon et al. (2007), donde proponen una representación relativa de trayectorias espacio-temporales también en términos cualitativos.

TR SR	equals	before/ after	meets/ met	overlaps/ overlapped	during/ contain	starts/ started	finishes/ finished
equals	 EQUAL	 DISJ	 TOUCH	 OVL	 CVRD/CVR	 CVRD/CVR	 CVRD/CVR
touch	 TOUCH	 DISJ	 TOUCH	 TOUCH	 TOUCH	 TOUCH	 TOUCH
in	 CVRD	 DISJ	 TOUCH	 OVL	 IN/OVL	 CVRD/OVL	 CVRD/OVL
contain	 CVR	 DISJ	 TOUCH	 OVL	 OVL/CON	 OVL/CVR	 OVL/CVR
cover	 CVR	 DISJ	 TOUCH	 OVL	 OVL/CVR	 OVL/CVR	 OVL/CVR
covered	 CVRD	 DISJ	 TOUCH	 OVL	 CVRD/OVL	 CVRD/OVL	 CVRD/OVL
overlap	 OVL	 DISJ	 TOUCH	 OVL	 OVL	 OVL	 OVL
disjoint	 DISJ	 DISJ	 DISJ	 DISJ	 DISJ	 DISJ	 DISJ

Figura 94: Representación de relaciones espacio-temporales.  
Fuente: Claramunt & Jiang (2000)

Sin embargo, la representación del movimiento propuesto en esta tesis ofrece la novedad de dar respuestas cuantitativas sobre aspectos relacionados con dicho movimiento. Por un lado permitirá consultas sobre relaciones de un cuerpo con su contexto espacial o temporal (coordenadas concretas  $x,y$  del cuerpo en un momento concreto  $t$ ), y por otro lado también permitirá consultas sobre relaciones de varios cuerpos en movimiento (en qué momento  $t$  y en qué coordenadas  $x,y$  se cruzan, o qué distancia o ángulo forman sus trayectorias en  $t$ , determinar si hay convergencia/divergencia de trayectorias, etc.). Para ello responde las posibles

---

consultas mediante operaciones propias de álgebra espacial aplicadas sobre funciones espaciotemporales que describen el movimiento.

La representación del movimiento en base a eventos ya ha sido estudiada con anterioridad, los eventos al representar las variaciones que sufren las entidades representadas por objetos permiten definir el dinamismo en un modelado. En Andrienko et al. (2007) se estudian las variaciones de movimientos de tropas en la marcha napoleónica producidas por eventos climatológicos. Relativo a la formalización de eventos, encontramos en Zhang (2005) jerarquías para modelos basados en eventos donde se demuestra la gran versatilidad del empleo de eventos para el modelado de procesos. Concretamente nos basamos en la que permite representar la composición de eventos (técnica llamada con el término anglosajón de *'event partonomy'*) mediante agregación de varios eventos de menor jerarquía. Por ejemplo, para la definición de un evento consistente en el movimiento de una persona que va al trabajo, se realizaría mediante la agregación de varios eventos que lo componen: persona sale de casa, persona arranca el coche, persona conduce, acelera, para en un semáforo, gira, vuelve a arrancar, persona aparca. Esta sucesión de eventos (aceleraciones, paradas, reanudaciones de marcha, giros), que componen el evento más general del movimiento de la persona al trabajo van variando las características del movimiento (velocidad, dirección), y el movimiento a su vez modifica la posición de un cuerpo en el espacio.

Por un lado vamos a considerar el movimiento como una agregación de otros eventos de menor jerarquía que varían las características de dicho movimiento (dirección, velocidad) (ej, el evento “cambia dirección del viento” modificaría el movimiento de un barco ya que cambiaría su atributo dirección, o el “evento semáforo en rojo” modificaría el movimiento de un coche ya que cambia su atributo velocidad). Por lo tanto, se trata de obtener una descripción de las configuraciones del movimiento en base a los eventos que lo forman, descripción basada en *'event partonomy'*.

Por otro lado, el movimiento es un evento que modifica la posición de un objeto, es decir, varía su estado definido por su atributo posición. Por tanto, a partir de la posición inicial de un objeto, si aplicamos un movimiento de velocidad y dirección conocido, podremos calcular la posición final de dicho objeto.

Una vez que hayamos representado el movimiento mediante eventos, y sus modificaciones también por distintos tipos de eventos podremos formalizar el movimiento mediante una función equivalente a las trayectorias espaciotemporales “*Time Geography*”, que representan situaciones espaciales en función del tiempo (Forer, 1998), (Kwan & Hong 1998), (Miller, 1991; 2004).

En este trabajo propuesto, estas funciones espaciotemporales que representan el movimiento, son rectas 3d que tienen puntos de inflexión en los eventos que modifican las características del movimiento. La geometría computacional aplicada al análisis de rectas representa los puntos de inflexión de una recta (o puntos extremos de sus segmento), a partir de los cuales cambia la pendiente de esta recta (cambia su estado o configuración), y los puntos de intersección con otras rectas mediante punto-eventos (de Berg et al, 2008). La figura 95 muestra la correspondencia entre punto-eventos empleados en geometría computacional con los eventos temporales en el modelo propuesto que provocan cambios de dirección y velocidad en el movimiento de una persona.

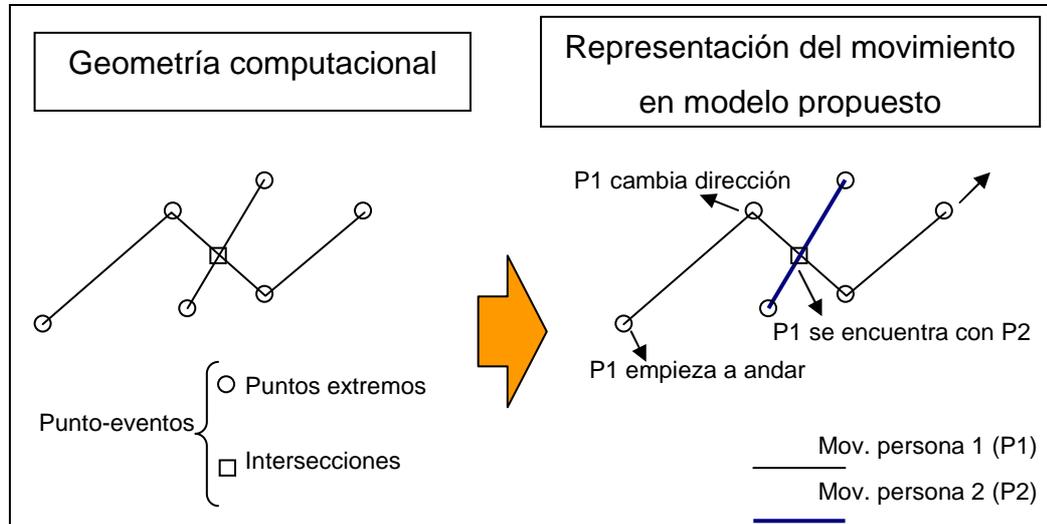


Figura 95: Correspondencia de punto-eventos en análisis de rectas y eventos temporales durante el movimiento de una persona

Una vez definidas las funciones que definen el movimiento de un cuerpo, mediante operaciones de álgebra lineal aplicadas a estas funciones, podemos hacer consultas sobre dicho movimiento y sus relaciones con otros movimientos, como por ejemplo las siguientes:

- situación de un cuerpo en un momento  $t$

- momentos en los que un cuerpo pasa por una situación  $x,y$
- velocidad de un cuerpo en un determinado momento
- determinar si dos cuerpos se cruzan y donde y cuando se cruzan
- ángulo que forman dos cuerpos en un determinado momento

Por lo tanto se ha construido una metodología que permita representar el movimiento de un cuerpo móvil respecto un contexto espacio-temporal, permitiendo hacer consultas sobre sus relaciones espacio-temporales y relaciones con otro cuerpo en movimiento. Para ello se ha realizado una formalización del movimiento mediante una función tridimensional que representa la trayectoria espacio-temporal y una definición de las primitivas espacio-temporales que representan contextos espacio-temporales. A partir de lo cual se han definido algunas de las relaciones inherentes al movimiento utilizando operaciones geométricas.

## 6.2 Metodología

Se ha construido una metodología que permita representar y analizar el movimiento de uno o más cuerpos, basada en la construcción de funciones espacio-temporales y su manejo mediante operaciones básicas de algebra lineal. En esta tesis esta metodología ha sido aplicada al movimiento de personas obtenido de superficies de movimiento, pero podría ser usada para cualquier otro tipo de movimiento realizado por un cuerpo móvil.

A continuación expondremos esta metodología que se encuentra dividida en las tres siguientes tres fases:

- (1) formalización del movimiento mediante una función tridimensional que representa la trayectoria espacio-temporal,
- (2) definición de primitivas espacio-temporales que representan contextos espacio-temporales,
- (3) definición de relaciones de inherentes al movimiento.

## 6.2.1 Formalización del movimiento mediante una función tridimensional que representa la trayectoria espacio-temporal

En este trabajo proponemos la construcción de esta función mediante la agregación de los cambios de dirección y velocidad que componen el movimiento, de manera que estos cambios se corresponden con los puntos de inflexión de la función que vamos a obtener. Por tanto podemos calcular matemáticamente esta función que representa el movimiento mediante el cálculo de las ecuaciones de cada uno de los tramos que hay entre cada punto de inflexión de dicha función (cada cambio de dirección o velocidad). Para ello usamos el cálculo geométrico de “ecuación de la recta que pasa por dos puntos”, siendo cada pareja de puntos la pareja de eventos temporales consecutivos que hacen cambiar las características del movimiento (velocidad y dirección). Por lo tanto estamos calculando el movimiento como un evento resultado de la agregación de otros eventos de menor jerarquía que lo forman. En esta fase veremos en primer lugar la reconstrucción del movimiento en base a eventos y en segundo lugar la definición del movimiento como una función temporal que tiene sus puntos de inflexión en dichos eventos.

### 6.2.1.1 Reconstrucción del movimiento en base a eventos

La posición final de un cuerpo se puede determinar a partir de su posición inicial, si se conocen las características velocidad y dirección del movimiento, y durante cuánto tiempo ha actuado dicho movimiento (Figura 96).

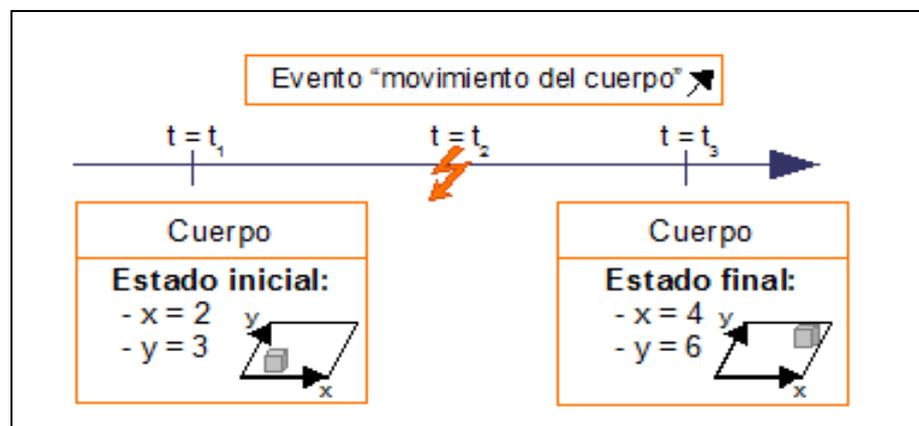


Figura 96: Variación de la posición de un cuerpo debida a un movimiento

A continuación se exponen dos ejemplos que muestran como calcular la posición final de un cuerpo a partir de un movimiento con una velocidad y

dirección determinados, que ha sido aplicado un determinado periodo de tiempo sobre dicho cuerpo.

**Ejemplo 1:** Un cuerpo en una posición de origen  $x=0$ ,  $y=0$  (en metros), sobre el que actúa, durante 2 segundos, un movimiento de velocidad = 3 m/s y dirección = Este, pasaría a ocupar la posición  $x=6$ ,  $y=0$ . (Figura 97)

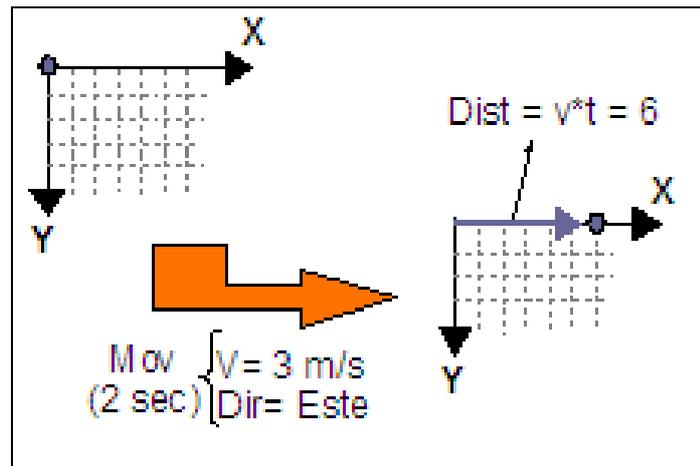


Figura 97: Posición final después del movimiento

**Ejemplo 2:** Un cuerpo de posición inicial  $x = 0$ ,  $y=0$ , sobre el que actúa, durante 3 segundos, un movimiento de velocidad = 2 m/s y dirección Sureste, pasaría a ocupar la posición  $x = 3$ ,  $y=3$ . (Figura 98)

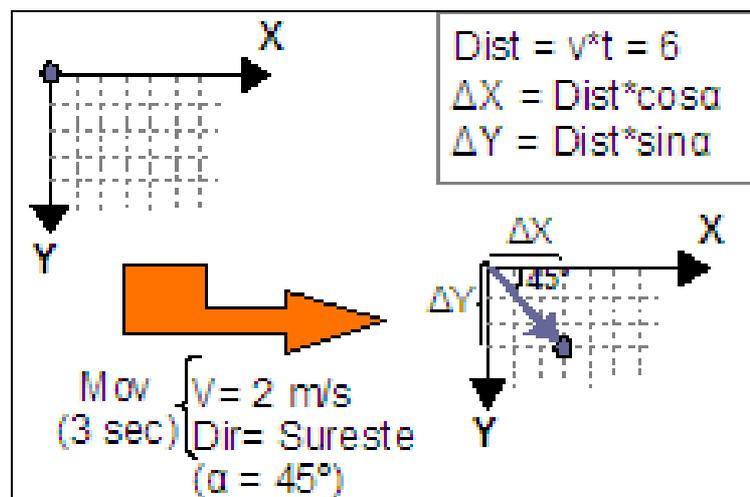


Figura 98: Posición final después del movimiento.

---

Según decíamos en la introducción de este capítulo, mediante “*event partonomy*” (Zhang, 2005), podemos descomponer los eventos mediante la agregación de varios eventos de menor jerarquía (les llamaremos subeventos). Por tanto el evento movimiento se compone de una serie de subeventos que agregados forman el movimiento total al que se somete un cuerpo. Dichos subeventos modifican las características (velocidad y dirección) del movimiento que componen en el momento en que aparecen. Por ejemplo, el evento “movimiento de un coche”, se puede realizar mediante la agregación secuencial de los subeventos como los siguientes:

- a. “coche arranca”
- b. “coche acelera” o “cambia de velocidad” (ej. aumenta la velocidad a 30 km/h, o reduce a 10 km/h)
- c. “coche cambia de dirección” (ej: gira a la derecha, gira a la izquierda)
- d. “coche aparca”:  $v = 0$  km/h.

En definitiva, la suma o agregación de todos los subeventos definen las características del movimiento de cuerpo en cada momento. Es decir, un movimiento está caracterizado por la velocidad y dirección que ha generado un subevento en un momento dado, manteniéndose constante sus características velocidad y dirección hasta que no aparezca otro subevento que vuelva a modificarlas. Por lo tanto, como veremos en la representación del movimiento mediante funciones, los subeventos actúan como puntos de inflexión en dicha representación.

Estos subeventos que hacen modificar las características del movimiento pueden haber sido generados por diversos eventos externos al movimiento, ya sean naturales (sopla viento, nieva,...) o artificiales (semáforo en rojo, cortan calle,...). Por ejemplo la aparición del evento “sopla viento” provoca la aparición del subevento “barco cambia de dirección” durante el evento del movimiento “barco navega” (figura 99).

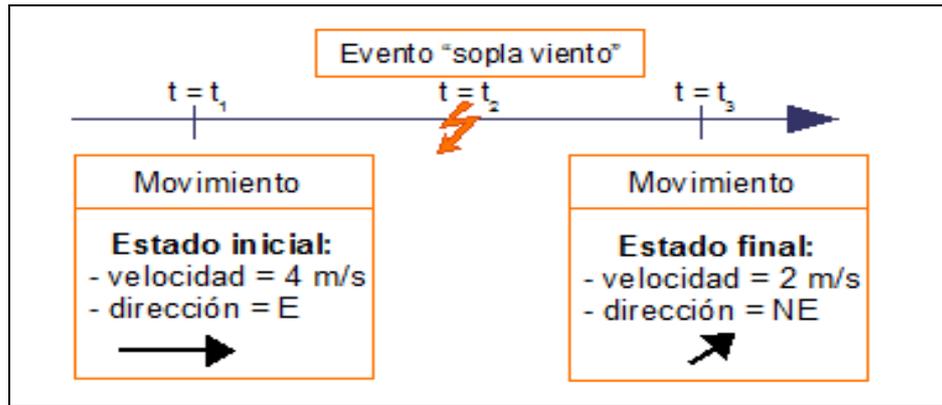


Figura 99: Eventos modificando estado del movimiento

En definitiva, la posición de un cuerpo varía a lo largo del tiempo debido a movimientos que actúan sobre él (eventos propios del movimiento), y a su vez estos movimientos son generados y modificados por la activación de otros eventos que actúan sobre ellos (eventos externos al movimiento). La figura 100 ilustra la conexión de todos estos eventos.

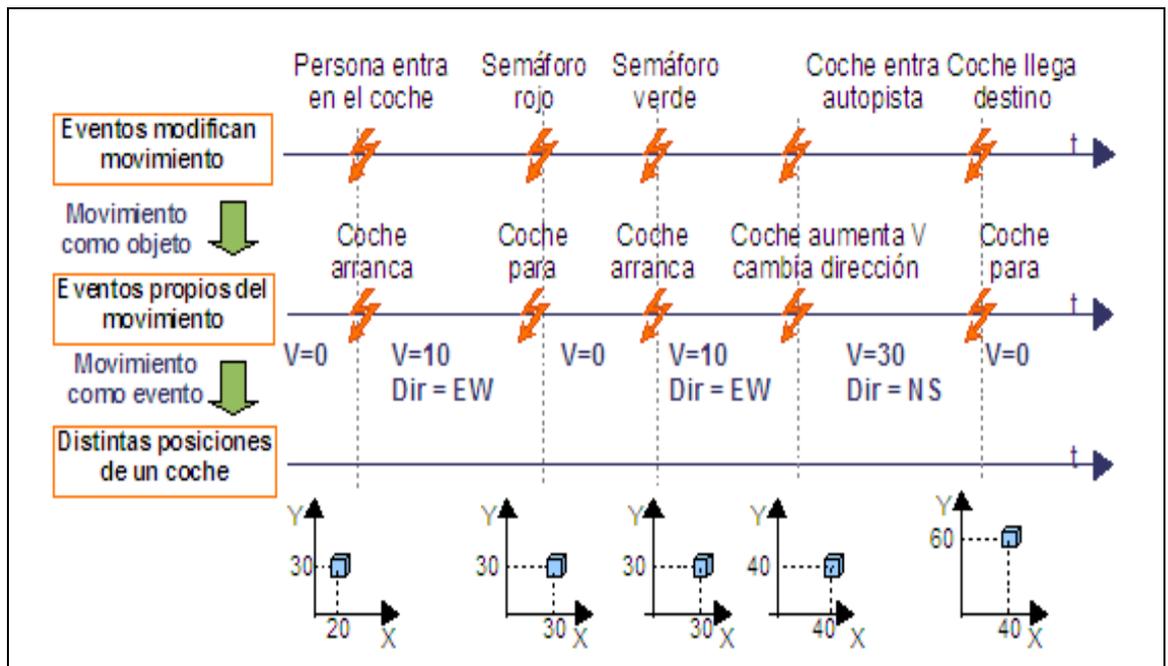


Figura 100: Agregación de eventos que generan y modifican el movimiento de un cuerpo

Como conclusión de este paso de la metodología, cuando se produce un evento que modifica el movimiento de un cuerpo, nos encontramos con un punto de inflexión en las características de dicho movimiento que produce una variación en la función espaciotemporal que lo representa (punto-evento).

### 6.2.1.2 Definición del movimiento como una función temporal

Una vez definido el movimiento de un cuerpo en base a todos los subeventos que lo generan o modifican, podemos representar dicho movimiento como una función temporal tridimensional que asocia a cada momento ( $t$ ) la posición espacial ( $x, y$ ) del cuerpo ( $x=f_x(t)$ ;  $y=f_y(t)$ ). Esta función es equivalente a las trayectorias espacio-temporales de “*Time Geography*”, que trazan el movimiento de un individuo en el espacio y en el tiempo como se muestra en la figura 101:

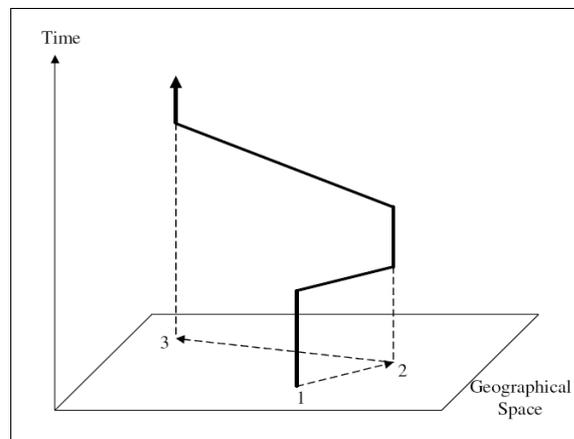


Figura 101: Trayectoria espacio-temporal (Miller, 2004)

Esta metodología trata esta trayectoria espacio-temporal como una función tridimensional que relaciona cada momento  $t$  con la posición espacial (en  $x, y$ ) donde se encuentra el cuerpo en ese momento, es decir la posición espacial es función del tiempo:  $x, y = f(t)$ . Para representar esta función recurrimos al cálculo algebraico de la ecuación de una recta tridimensional que pasa por dos puntos de coordenadas  $(x, y, t)$ . Cada subevento que modifica el movimiento actúa como un punto de inflexión en la función que lo representa, por tanto se calculará la recta que pasa por dos puntos, correspondiendo estos dos puntos a una pareja de subeventos consecutivos. La figura 102 muestra la función espacio-temporal para el movimiento de un coche del anterior ejemplo mediante ecuaciones de rectas que pasan por cada par de subeventos consecutivos. En dicho ejemplo hay 5 subeventos (A, B, C, D, E) que modifican el movimiento de un cuerpo, y por tanto habría 4 rectas que representan el movimiento entre estos puntos:

- tramo AB: El coche va a la velocidad y dirección generadas en el subevento A.
- tramo BC: Como en B ha habido un aumento de velocidad, observamos como la recta es más inclinada que la del anterior tramo, ya que recorre mayor distancia en menor tiempo.
- Tramo CD: Representa un giro en el plano xy, pero mantiene la velocidad.
- Tramo DE: Es una recta vertical, ya que el coche está parado y aunque avanza el tiempo (t varía) no hay desplazamiento en el plano xy.

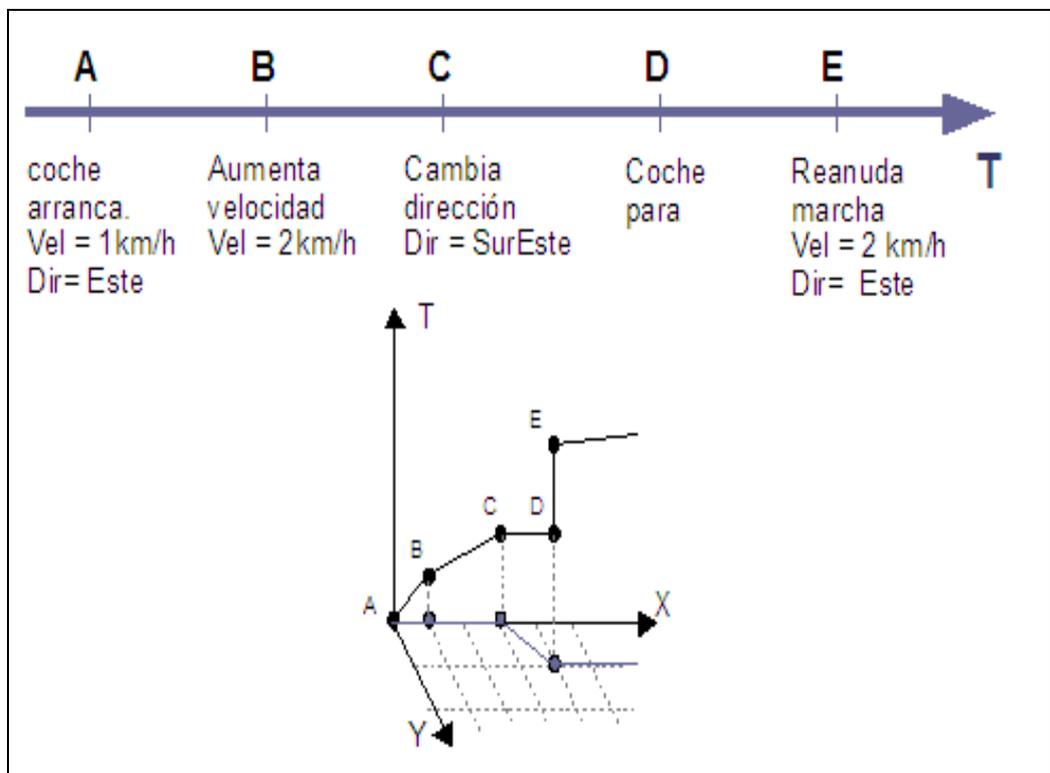


Figura 102: Función temporal para el movimiento de un coche mediante ecuaciones de rectas que pasan por parejas de sub-eventos consecutivos

Una vez definidas estas funciones que representan el movimiento de un cuerpo, podremos aplicar sobre ellas operaciones de álgebra lineal para resolver consultas sobre movimiento de un cuerpo, como por ejemplo calcular posición o velocidad de un cuerpo en un momento dado, calcular el momento en el que un cuerpo ocupó una determinada posición. Además, si definimos las funciones de varios cuerpos, podremos inferir relaciones espaciales y temporales entre sus movimientos, como por ejemplo calcular dónde y cuándo se cruzan, o a qué

---

distancia estaban en un momento determinado. Por lo tanto, la definición de movimientos de cuerpos mediante funciones y de sus relaciones mediante operaciones de álgebra lineal nos permiten definir una formalización de relaciones inherentes al movimiento, que expondremos en el siguiente epígrafe.

A continuación se exponen las características más importantes de estas funciones:

1. Es una función de 3 dimensiones, con los siguientes ejes: 2 ejes para las coordenadas espaciales (ejes  $x$ ,  $y$ ), y un eje para la coordenada temporal  $t$  sobre el que se levanta el momento en el que el cuerpo pasó por cada posición  $x,y$ .
2. Es una función continua para intervalos de tiempo donde no hay ningún evento que modifique velocidad o dirección, por lo tanto en estos tramos el movimiento es constante, pues mantiene la velocidad y dirección. En cambio en los instantes de tiempo donde ocurre un evento se producen puntos de inflexión de la función ya que el movimiento deja de ser constante debido a variaciones de velocidad o de orientación.
3. Para un instante de tiempo  $t$  existe una y solo una posición espacial  $x,y$ . Es decir, un cuerpo solo puede estar en una posición en un determinado momento (no existe la ubicuidad).
4. Una sola posición espacial puede tener asociado más de un instante de tiempo. Es decir, un cuerpo puede haber pasado por una misma posición en dos o más momentos distintos.

### **6.2.2 Definición de primitivas espacio-temporales que representan contextos espacio-temporales**

La descripción geométrica de movimiento propuesta en este trabajo permitirá inferir relaciones entre el movimiento de un cuerpo con los contextos espacial y temporal, e incluso con el movimiento de otros cuerpos. Por tanto, de igual manera que la topología espacial necesita de una serie de primitivas espaciales, o la topología temporal necesita de una serie de primitivas temporales, para definir una relaciones topológicas, que combinen ambas topologías, necesitaremos previamente definir las **primitivas espacio-temporales**.

Las primitivas espacio-temporales que proponemos en este trabajo permiten formalizar los posibles contextos espacio-temporales por los que se mueve un cuerpo en movimiento y su formalización nos permitirá inferir relaciones entre el movimiento y sus contextos espacio temporales. Para la formalización de estas primitivas proponemos distintas formas geométricas tridimensionales donde la tercera dimensión es la coordenada tiempo.

Para diseñar las primitivas espacio-temporales, hemos combinado, como muestra la figura 103, las siguientes primitivas ya existentes:

- (1) las primitivas espaciales (nodo, arco, cara) y
- (2) de las primitivas temporales (instante, duración).

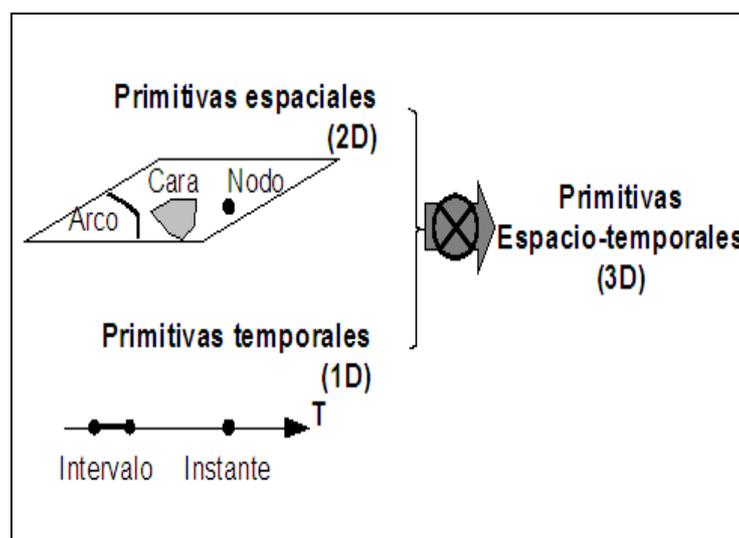


Figura 103: Primitivas de partida para la construcción de primitivas espacio-temporales

Por tanto, mediante la combinación de las primitivas espaciales y las temporales hemos obtenido las primitivas espacio-temporales que se muestran en la figura 104, que en función de los límites temporales de la representación de entidades espaciales, las hemos clasificado en (1) **instantáneas**, si representan una entidad espacial en un momento instantáneo de tiempo, y (2) **temporales**, si representan una entidad espacial durante un intervalo definido de tiempo:

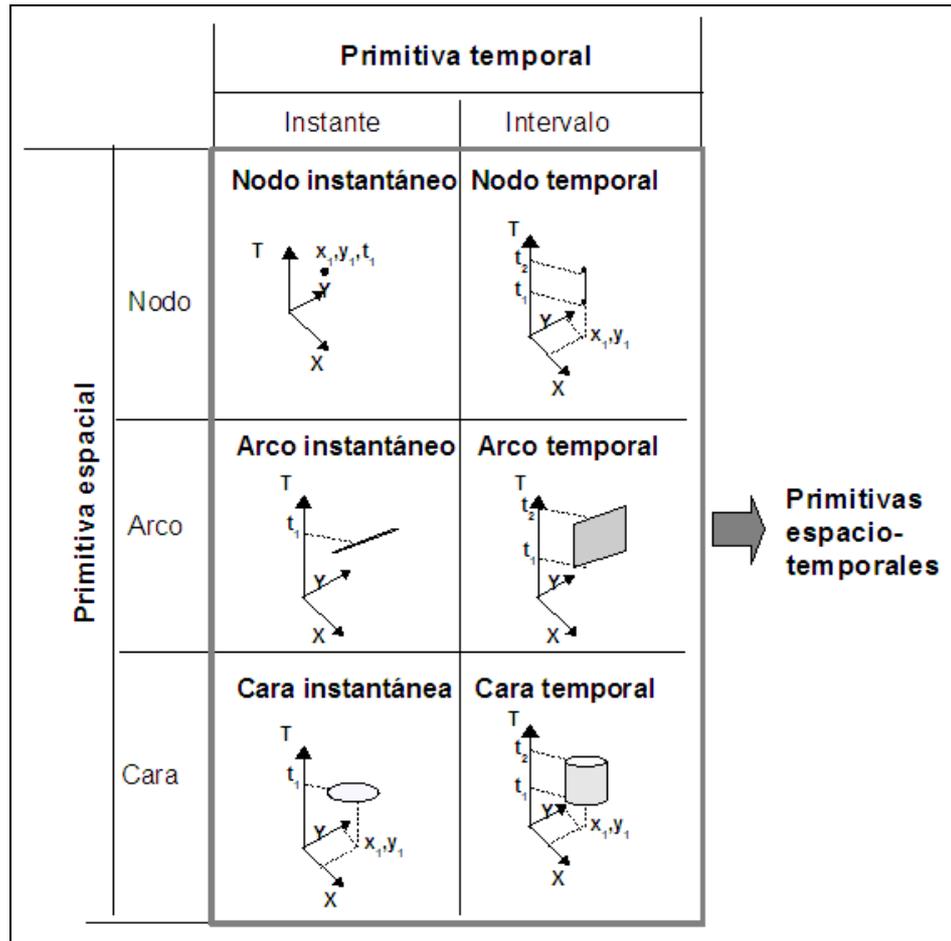


Figura 104: Primitivas espacio-temporales propuestas

- **Nodo instantáneo:** Posición en dimensión espacio temporal que ocupa un punto  $x, y$  en un determinado momento de tiempo  $t$ . Se representa mediante un punto de coordenadas tridimensionales  $(x, y, z)$
- **Nodo temporal:** Distintas posiciones en dimensión espacio temporal que ocupa un punto de posición  $x, y$  en un intervalo de tiempo  $[t_1, t_2]$ . Se representa geoméricamente mediante el segmento de la recta vertical que pasa por ese punto comprendido entre las coordenadas de tiempo  $t_1$  y  $t_2$ .
- **Cara instantánea:** Conjunto de posiciones en dimensión espacio temporal, que ocupa una cara en un determinado momento  $t=t_1$ . Se representa mediante el conjunto de puntos  $x, y, t$  que delimitan su perímetro, siendo  $t=t_1=\text{constante}$  en todos ellos. Un ejemplo simplificado sería una cara circular, que quedaría representada

---

mediante la ecuación del círculo donde  $t=t_1$ .

- **Cara temporal:** Conjunto de posiciones en dimensión espacio temporal, que ocupa una cara en un intervalo de tiempo  $[t_1, t_2]$ . Se representa mediante el prisma cuya base está definida por el conjunto de puntos  $x,y$  que delimitan su perímetro, y cuya altura está comprendida entre las coordenadas de tiempo  $t_1$  y  $t_2$ . Un ejemplo simplificado sería una cara circular en un intervalo de tiempo  $[t_1, t_2]$ , que quedaría representada mediante el cilindro que tiene como base la ecuación del círculo y alturas comprendidas entre  $t=t_1$  y  $t=t_2$ .
- **Arco instantáneo:** Conjunto de posiciones en dimensión espacio temporal, que ocupa un arco en un determinado momento  $t=t_1$ . Se representa mediante la ecuación del arco en coordenadas  $x,y,t$ , siendo  $t=t_1=$ constante en todos los puntos que forman el arco.
- **Arco temporal:** Conjunto de posiciones en dimensión espacio temporal, que ocupa un arco en un intervalo de tiempo  $[t_1, t_2]$ . Se representa mediante la superficie vertical cuya base está definida por el conjunto de puntos  $x,y$  que delimitan la forma del arco, y cuya altura está comprendida entre las coordenadas de tiempo  $t_1$  y  $t_2$ .

### 6.2.3 Definición de relaciones inherentes al movimiento

Esta fase de la metodología introduce una descripción geométrica del movimiento de un cuerpo, lo que permite inferir una serie de relaciones entre el movimiento de un cuerpo y sus contextos espacio-temporales e incluso con el movimiento de otros cuerpos. Una vez que tenemos formalizado el movimiento mediante una función matemática y el contexto espacio temporal mediante las ecuaciones de las formas geométricas que representan las primitivas espacio-temporales, podremos formalizar dichas relaciones mediante una serie de operaciones geométricas (figura 105).

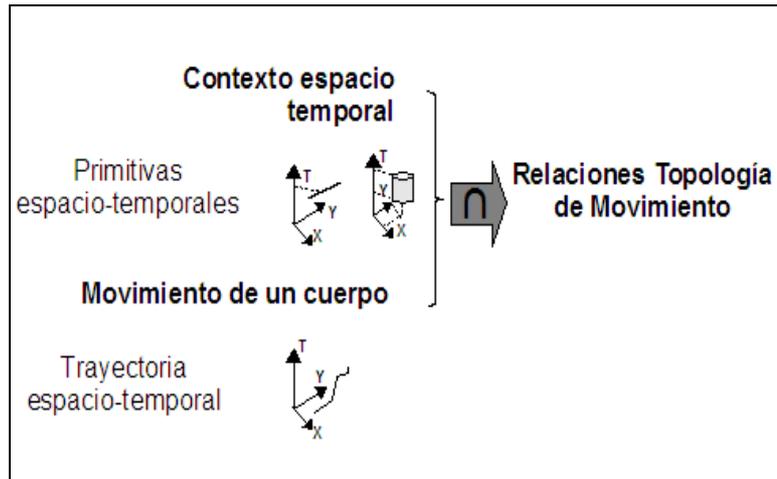


Figura 105: Relaciones inherentes al movimiento a partir de primitivas espacio-temporales y trayectoria espacio-temporal

Estas operaciones nos permitirán sistematizar consultas para calcular posiciones o velocidades de un cuerpo en unos momentos dados, o calcular el momento en el que un cuerpo ocupó una determinada posición. Además, si definimos funciones de varios cuerpos, podremos inferir relaciones espaciales y temporales entre sus movimientos, como por ejemplo calcular dónde y cuándo se cruzan o calcular a qué distancia estaban en un momento determinado. La Tabla 12 muestra distintos tipos de relaciones que puede haber entre movimiento de cuerpos y sus contextos espacio-temporales acompañados de distintos ejemplos de consultas solucionables mediante cada relación. Estas relaciones son explicadas a continuación.

Tabla 12: Tipos de relaciones y posibles consultas

Relación	Ejemplos de consultas
1. Función de Movimiento $\Leftrightarrow$ Contexto temporal	¿Dónde está el cuerpo en un determinado momento?
2. Función de Movimiento $\Leftrightarrow$ Contexto espacial	¿Pasa el cuerpo por un determinado lugar? ¿Cuándo?
3. Función de Movimiento $\Leftrightarrow$ Contexto espacio-temporal	¿Pasa el cuerpo por un determinado lugar y en un determinado momento?
4. Función de movimiento cuerpo 1 $\Leftrightarrow$ Función de movimiento cuerpo 2	¿Se encuentran el cuerpo 1 y 2? ¿Dónde? ¿Cuándo?

## 1. Función de Movimiento $\Leftrightarrow$ Contexto temporal

Esta relación permitirá calcular la posición  $(x,y)$  que ocupa un cuerpo en un momento  $t$ . Como muestra la figura 106, esta relación está formalizada mediante la intersección de la función espacio-temporal que representa el movimiento con el plano horizontal que pasa por la coordenada  $t$  (cara instantánea), y por lo tanto se podrá resolver calculando dicha intersección.

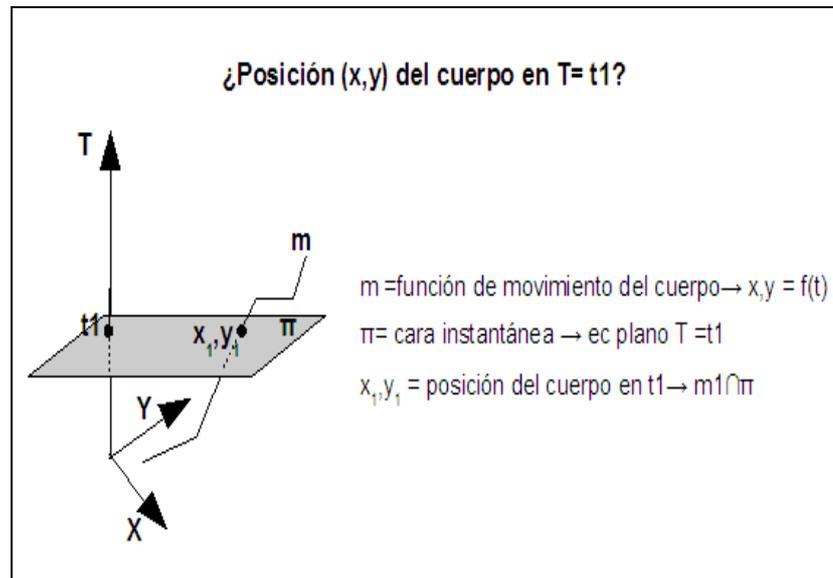


Figura 106: Intersección de cara instantánea y función de movimiento

## 2. Función de Movimiento $\Leftrightarrow$ Contexto espacial

Esta relación permitirá calcular el momento  $t$  en el que un cuerpo pasa por una determinada posición  $(x,y)$ . Como muestra la figura 107, esta relación está formalizada mediante la intersección de la función espacio-temporal que representa el movimiento con la recta vertical que pasa por las coordenadas  $x,y$  (nodo temporal).

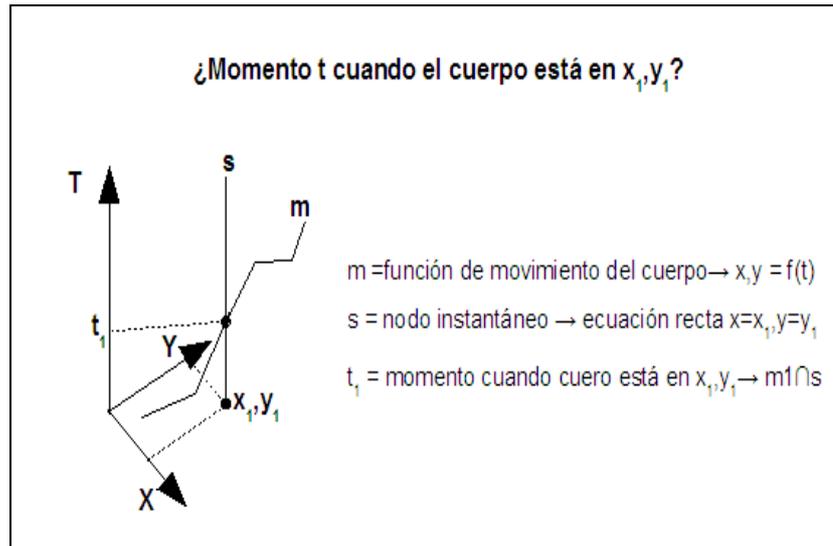


Figura 107: Intersección de nodo instantáneo con función de movimiento

### 3. Función de Movimiento $\Leftrightarrow$ Contexto espacio-temporal

Esta relación permitirá indagar si un cuerpo pasó por una determinada zona en un momento dado. Distinguimos dos tipos de relaciones (figura 108):

(a) Si el cuerpo pasa por una zona en un determinado momento puntual. Como muestra la figura, en este caso se resuelve la intersección de la función de movimiento con el círculo localizado en las coordenadas  $(x, y)$  de la zona en cuestión y coordenada  $(t)$  del momento puntual (cara instantánea).

(b) Si el cuerpo pasa por una zona durante un determinado intervalo de tiempo. Como muestra la figura, en este caso se resuelve la intersección de la función de movimiento con el cilindro localizado en las coordenadas  $(x, y)$  de la zona en cuestión y altura que va de la coordenada  $(t)$  del momento inicio del intervalo a la coordenada  $(t)$  del momento final del intervalo (cara temporal).

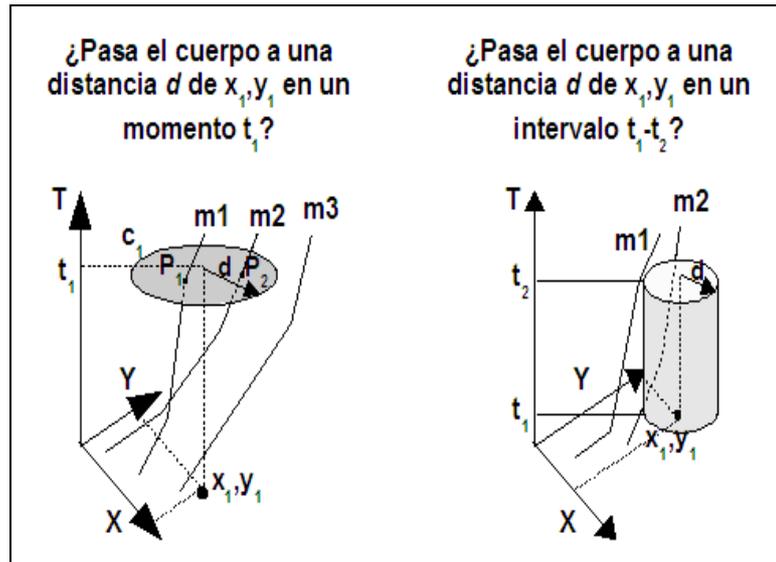


Figura 108: Intersección de funciones de movimiento con cara instantánea y con cara temporal

#### 4. Función de movimiento cuerpo 1 ↔ Función de movimiento cuerpo 2

Esta relación permitirá calcular el momento y la posición donde un cuerpo se cruza con otro cuerpo. Como muestra la figura 109, esta relación está materializada mediante la intersección de las dos funciones espacio temporales que representan ambos movimientos.

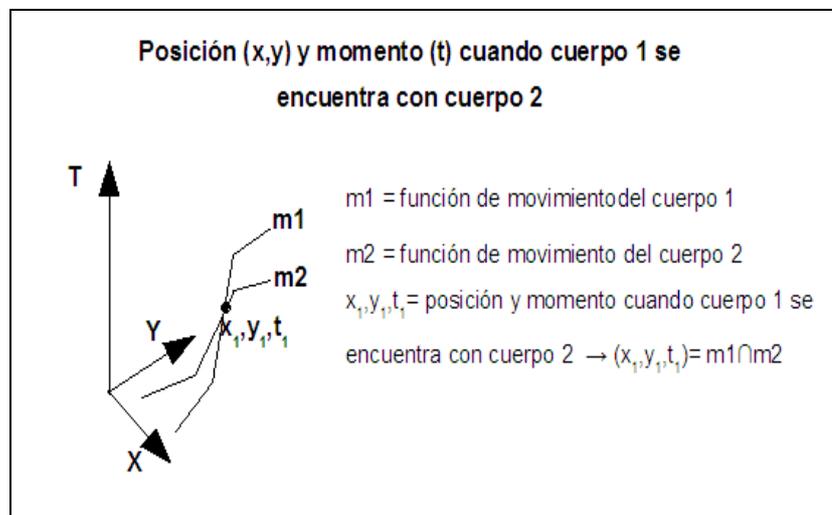


Figura 109: Intersección de dos funciones de movimiento

## 6.3 Ejemplo de cálculo

En este epígrafe se va a mostrar cómo se ha aplicado la definición del movimiento de una persona mediante una función espacio-temporal con puntos de inflexión en los eventos que lo componen y cómo a partir de esta función se han realizado una serie de consultas sobre el movimiento de la persona. Para ello hemos definido un escenario hipotético del movimiento de un cuerpo. En este escenario, el cuerpo de estudio es una persona que se mueve por un parque variando su posición desde una posición de origen  $x=0$ ,  $y=0$ . Su movimiento queda definido por la siguiente agregación de eventos que modifican velocidad y dirección del movimiento de la persona:

- Evento A, a las  $t = 0:00$  horas: La persona parte de su posición de origen, anda en dirección Este a una velocidad de 1 m/s.
- Evento B, a las  $t = 1:00$  horas: Empieza a llover y la persona acelera aumentando su velocidad a 2 m/s en la misma dirección.
- Evento C, a las  $t = 2:00$  horas: La persona ha llegado a una zona empantanada y para esquivarla gira en dirección Sureste manteniendo la velocidad.
- Evento D, a las  $t = 3:00$  horas: La persona ha llegado a una cafetería y para a comer.
- Evento E, a las  $t = 5:00$  horas: La persona vuelve a reanudar su camino en dirección Sureste, con velocidad de 2 m/s.
- Evento F, a las  $t = 6:00$  horas: La persona finaliza el recorrido.

En los siguientes epígrafes vamos a aplicar la metodología expuesta para mostrar la formalización del movimiento en base a eventos, obteniendo una función 3D espacio-temporal sobre la que aplicaremos diversas operaciones de álgebra lineal para realizar consultas sobre el movimiento.

### 6.3.1 Desagregación del movimiento en base a eventos

Los atributos velocidad y dirección que definen cada estado del movimiento entre cada intervalo de eventos son los mostrados en la tabla 13:

Tabla 13: velocidad y dirección para el cuerpo del escenario

<b>Intervalo tiempo</b>	<b>Velocidad</b>	<b>dirección</b>
Hora < 0:00	0 m/s	Ninguna
0:00 - 1:00	1 m/s	Este
1:00 -2:00	2 m/s	Este
2:00 –3:00	2 m/s	Sureste
3:00 – 5:00	0 m/s	Ninguna
5:00 -6:00	2 m/s	Sureste

Por lo tanto se puede calcular la posición que tiene el cuerpo tras cada evento que modifica su velocidad y la dirección, mediante las fórmulas (6) de geometría que permite calcular la posición final :

$$\Delta X = D \cdot \text{sen } \alpha$$

$$\Delta Y = D \cdot \text{cos } \alpha$$

(6)

Donde,

- D = distancia recorrida = velocidad. tiempo
- $\alpha$  = dirección del movimiento
- $\Delta X$  y  $\Delta Y$  son los incrementos en las coordenadas X e Y.

Aplicando el cálculo a cada posición tenemos las coordenadas x, y de cada una para cada momento, tabla 14:

Tabla 14: Coordenadas de la posición del cuerpo en cada evento:

<b>Evento</b>	<b>Tiempo</b>	<b>x</b>	<b>y</b>
A	0:00	0	0
B	0:30	1	0

C	1:00	3	0
D	2:00	4	1
E	2:30	4	1
F	3:00	5	2

La figura 110 representa el conjunto de posiciones espaciales (x,y) que ha recorrido el cuerpo, sin embargo no nos da ninguna información sobre sus situaciones temporales (t), a diferencia de la representación que se muestra en el siguiente paso.

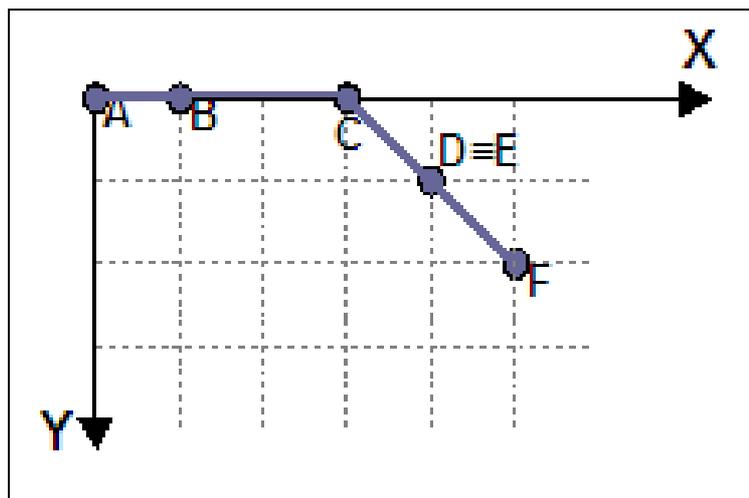


Figura 110: Posiciones recorridas por el cuerpo en movimiento

### 6.3.2 Construcción de la función 3D espacio temporal

A continuación se va a mostrar la función 3D que representa el movimiento anteriormente descrito. Como hemos dicho anteriormente, se corresponde con las trayectorias espacio-temporales de *'Time Geography'*, y se construyen representando en el eje temporal el momento en que el cuerpo ocupa cada posición.

El movimiento se describe mediante una función continua para todos los momentos en los que no sucede un evento que modifique dirección y velocidad

del movimiento del cuerpo. Para obtener esta función se calcula la ecuación de una recta tridimensional que pasa por dos puntos para cada intervalo de eventos (Tabla 15), y dibujados sobre un sistema de coordenadas de tres ejes se obtendría la función que muestra la figura 111.

Tabla 15: Puntos de inflexión en la función espacio-temporal

Evento	X	Y	T
A	0	0	0
B	1	0	1
C	3	0	2
D	4	1	3
E	4	1	5
F	5	2	6

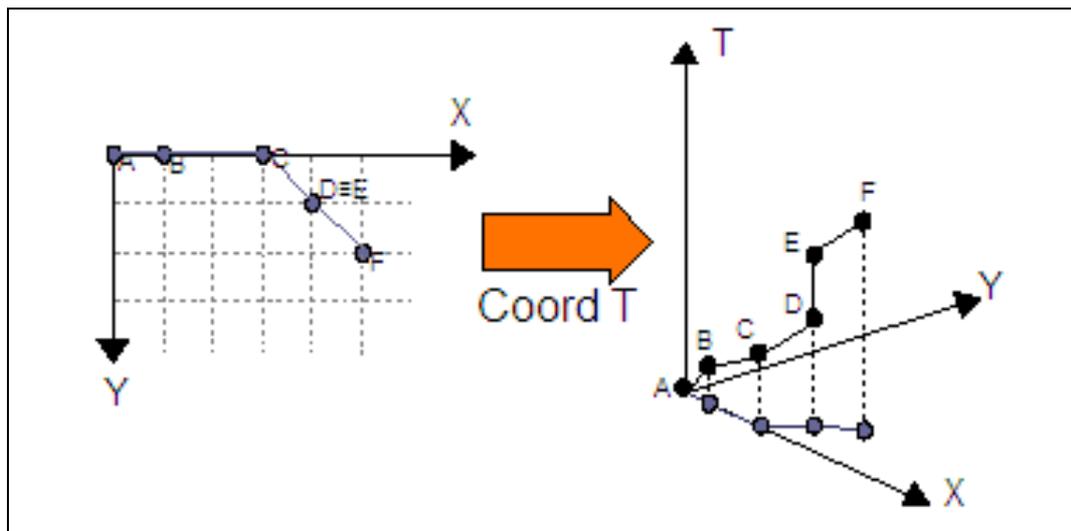


Figura 111: Movimiento del cuerpo expresado como una función en tres dimensiones

Calculamos la función que representa el movimiento para cada intervalo de tiempo existente entre dos eventos (ecuación de una recta que pasa por dos puntos), por lo tanto en cada uno de esos intervalos que el movimiento es

uniforme y por tanto la función es continua dentro de cada intervalo. Se calcula la función temporal para cada intervalo mediante el cálculo de la recta que pasa por dos puntos y se obtiene la función que se expone a continuación y que está representada en la tabla 16 con sus correspondientes eventos.

Tabla 16: Ecuaciones de recta por cada pareja de eventos

Tramo	Intervalo de t	Ec recta
AB	0-1	$y=0; x=z$
BC	1-2	$y=0; x=2z-1$
CD	2-3	$x= z+1; y= z-2$
DE	3-5	$x= 4; y = 1$
EF	5-6	$x= t-1; y= t-4$

### 6.3.3 Consultas sobre el movimiento mediante álgebra lineal

Una vez tenemos definido el movimiento mediante una función 3D de variables espacio-temporal, podemos hacer cálculos sobre relaciones entre esas variables mediante operaciones de álgebra lineal. A continuación se muestran algunas consultas hechas sobre el movimiento definido y su resolución mediante álgebra lineal:

#### 1. ¿Dónde está la persona a la 1.30?

Esta consulta se responde calculando los valores que tienen las coordenadas  $(x, y)$  que toma la función para un valor de  $t = 1.30$ , que pertenece al intervalo del tramo BC, donde la ecuación de la función es  $y=0; x=2t-1$ . Sustituyendo el valor de  $t=1.5$  sobre esta función obtenemos coordenadas donde estuvo la persona en ese momento:  $x= 2; y =0$ . La figura 112 muestra el punto P de la recta situado en la coordenada  $t = 1,5$  que comprobamos coincide en la posición  $(2, 0)$

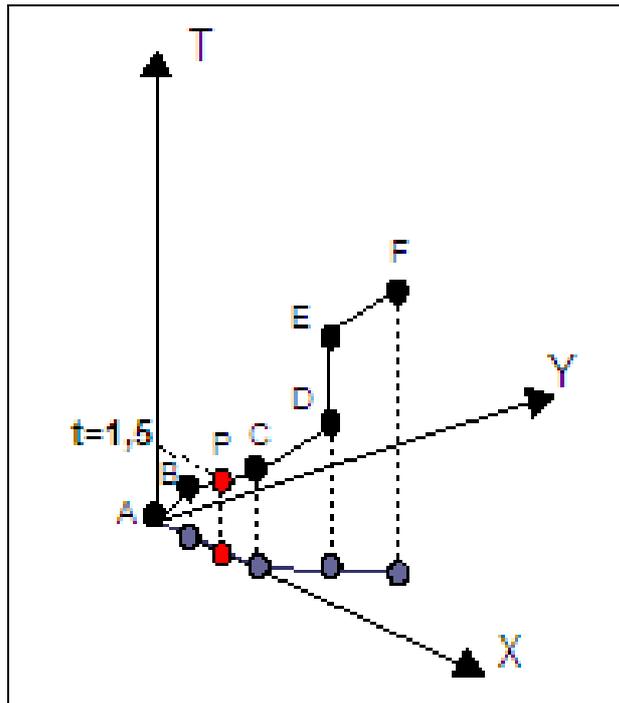


Figura 112: Obtención de posición x,y asociada a un momento t

**2. ¿En qué momento pasa la persona por  $x=2$ ;  $y=0$ ?**

Esta consulta se responde calculando los valores que tiene la coordenada t cuando la persona se encuentra en la posición  $x=2$ ,  $y=0$ . Puede haber múltiples soluciones porque el cuerpo puede haber pasado varias veces por ese punto en varios momentos. Para ello se calcula el valor de t sustituyendo en cada tramo los valores x,y para ver si el sistema tiene solución. Para el tramo BC, cuya función es de  $y=0$ ;  $x=2z-1$ ; la persona habría estado en  $x=2$ ,  $y=0$  en  $t=1.5$ , que comprobamos que es un resultado coherente con el obtenido en la primera consulta.

**3. Supongamos otra persona que realiza un movimiento cuya función espaciotemporal expuesta en la tabla 17, ¿dónde y cuándo se habrían cruzado, en caso de que se haya producido un cruce de ambas?**

Tabla 17: Función de movimiento de persona B

Tramo	Intervalo de t	Ec función
JK	0-6.6	$J=0,0,0;k=5.4,1.8,6.6$
KL	6.6-8	$L=6,3,8$

Esta consulta se responde buscando la intersección entre las 2 funciones y calculando el punto xyt en caso de que exista intersección. Para ello se realiza la intersección para cada tramo para encontrar aquel cuyo sistema de ecuaciones tenga solución. Encontramos intersección de ambas funciones en dos puntos:

(1) en el tramo AB del primer cuerpo con el tramo JK del segundo. Para calcular dicha intersección se igualan las expresiones de ambas funciones:

$$x = t = 0,7t; y = 0 = 0,15t;$$

Resolviendo el sistema se obtienen las coordenadas:  $t = 0; x = 0; y = 0$ , es decir, en los puntos coincidentes A y J.

(2) en el tramo EF del primer cuerpo con el tramo KL del segundo cuerpo. Igualmente se igualan las expresiones de ambas funciones:

$$x = t-1 = t-1; y = t-4 = 0.5t-1.25,$$

Resolviendo el sistema se obtienen las coordenadas:  $t = 5,5; x = 4,5; y = 1,5$ .

Por tanto, ambas personas se han cruzado a la hora  $t = 0$ , en el punto de posición  $x = 0; y = 0$ , y a la hora  $t = 5,5$ , en el punto de posición  $x = 4,5; y = 0,5$ , como muestra la figura 113.

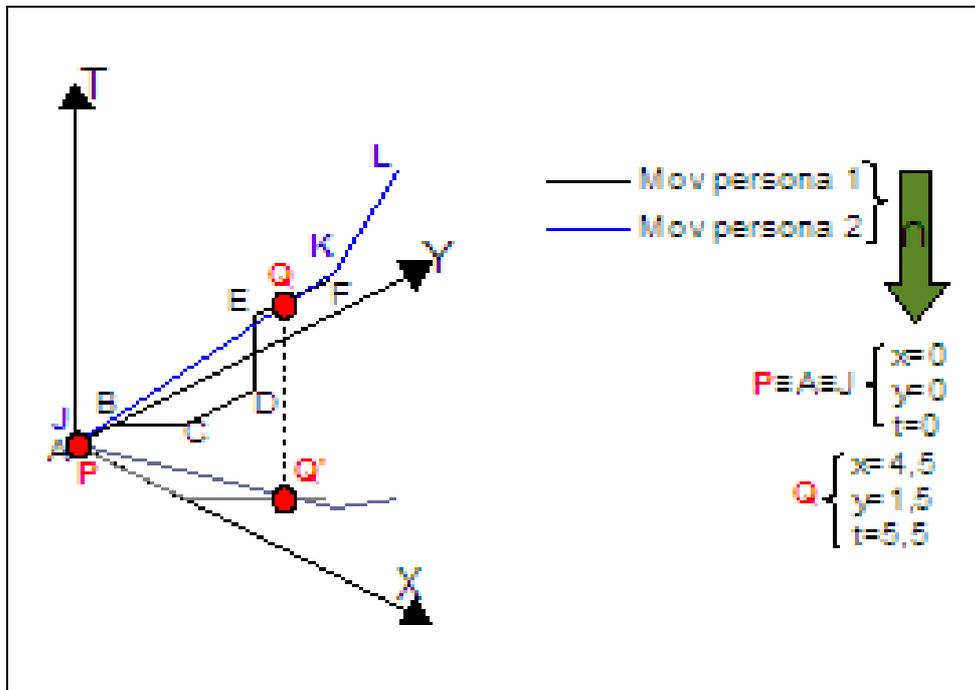


Figura 113: Intersección del movimiento de dos personas

## 6.4 Aplicación al movimiento obtenido de superficies de movimiento

En esta apartado vamos a aplicar la metodología de descripción topológica de movimiento a uno de los simulados mediante las superficies de movimiento obtenidas en el capítulo 5, correspondientes a los desplazamientos sobre el parque Dwingelderveld. Concretamente lo aplicaremos al movimiento del visitante estudiado en el caso 1, donde se obtuvo la trayectoria producida simulada de la figura 114.

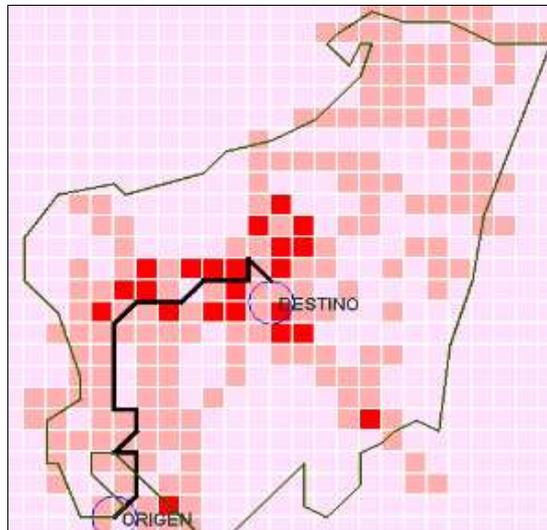


Figura 114: Trayectoria obtenida para el visitante el caso 1.

A partir de esta trayectoria realizada a una determinada velocidad de 1 km/h se ha obtenido su correspondiente función espacio-temporal mediante una aplicación Java que permite construir dichas funciones además de calcular intersecciones entre ellas. La figura 115 muestra el movimiento sobre la superficie de dos dimensiones (línea continua) y su correspondiente función espacio temporal que describe el movimiento (línea discontinua).

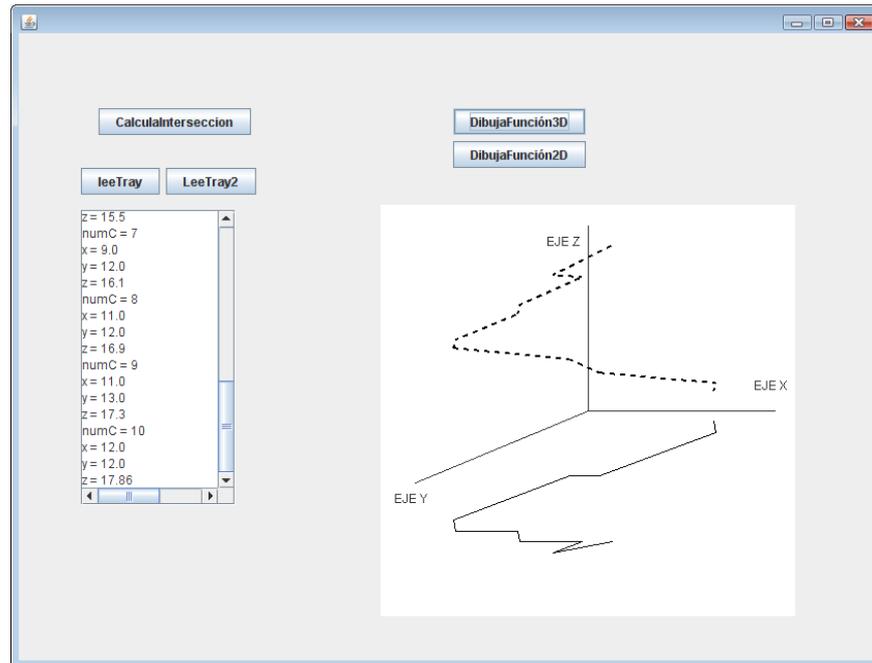


Figura 115: Representación del movimiento en 2 y en 3 dimensiones

Una vez que tenemos definido un movimiento mediante su función espacio-temporal, ya podemos inferir relaciones con su contexto espacio temporal y con otros movimientos. Por ejemplo, se ha calculado la intersección de las funciones correspondiente a un posible encuentro entre dicho visitante y el representado en el caso 2.

La figura 116 muestra las trayectorias de ambos visitantes sobre la superficie de dos dimensiones (línea continua negra para el visitante 1 y azul para el 2) y sus correspondientes funciones espacio temporal que describe el movimiento (línea discontinua negra para el visitante 1 y azul para el 2). En dicha figura vemos que las trayectorias se cortan en algunos puntos (círculo negro), que representan puntos por donde han pasado ambas personas. Pero estos puntos no implican que las personas se hayan encontrado puesto que pueden haber pasado por esos puntos en momentos diferentes. Sin embargo las funciones espacio temporales intersectan en otro punto (círculo rojo), que sí que representa puntos de encuentro entre ambas personas ya que no solo coinciden sus posiciones  $x$ ,  $y$  sino también su coordenada relativa al tiempo.

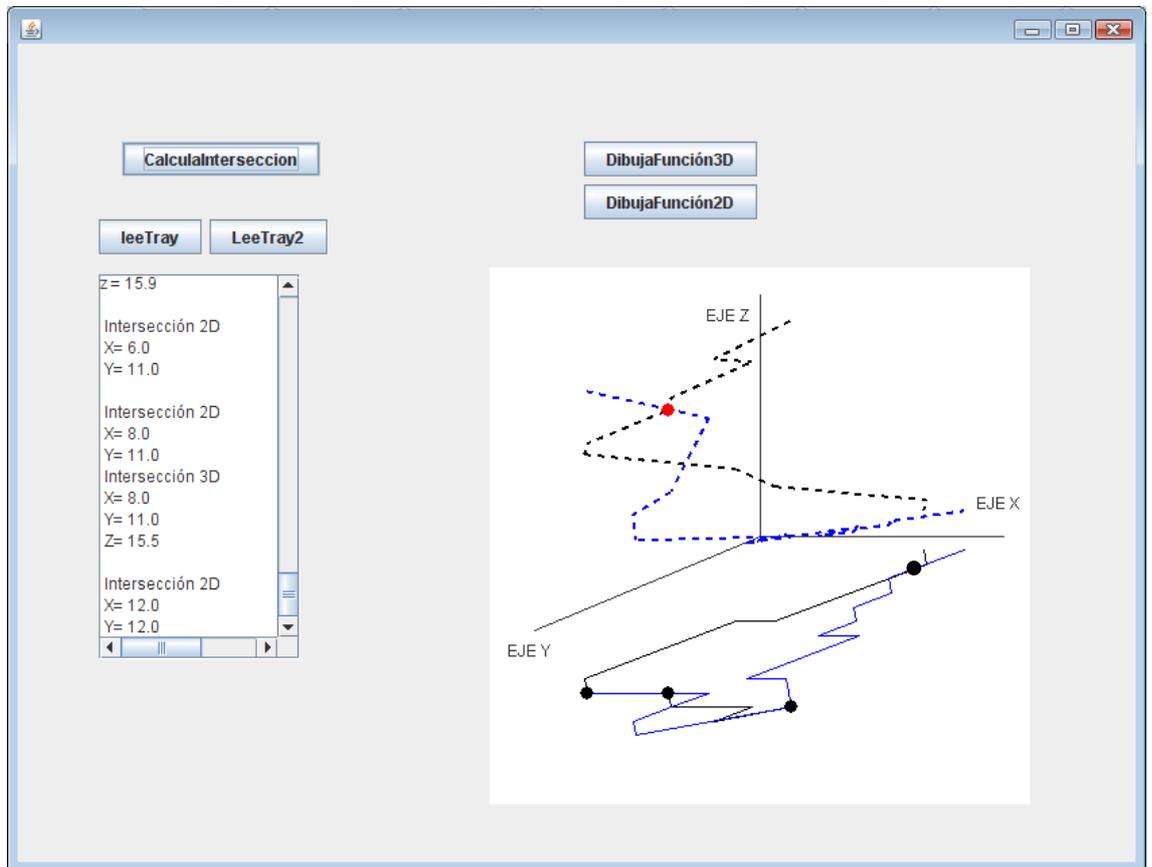


Figura 116: Intersección del movimiento de los dos visitantes

## 6.5 Conclusiones

El movimiento de un cuerpo se puede formalizar mediante una desagregación de eventos que lo originan y modifican sus características. Entre la ocurrencia de dichos eventos el movimiento del cuerpo es uniforme puesto que su dirección y velocidad son constantes. Sin embargo cuando se produce un evento que modifica el movimiento nos encontramos con una discontinuidad o punto de inflexión en las características de dicho movimiento y por tanto una variación en la función espaciotemporal que lo representa.

El movimiento de un cuerpo se puede representar mediante una función tridimensional espacio temporal que relaciona para cada momento con la posición que ocupa en ese momento. Técnica equivalente a las trayectorias espaciotemporales de 'Time Geography'.

Una vez que hemos definido y formalizado un movimiento mediante una función matemática, tenemos varias herramientas pertenecientes al campo del álgebra que nos permiten analizar esa función y realizar consultas sobre relaciones derivadas del movimiento representado. Esto nos lleva a la definición de las relaciones inherentes al movimiento de un cuerpo.

Esta representación de movimiento mediante funciones espacio-temporales, y la definición de sus relaciones inherentes, se puede aplicar a los movimientos realizados sobre la superficie de movimiento conceptualizada en esta tesis. De manera que se podrá representar desplazamientos de las personas sobre un entorno, que cambian de dirección al encontrar celdas de mayor utilidad que la hacen desviarse de su trayectoria en línea recta, y que varían de velocidad debido a diversos eventos. Esto permitirá analizar interacciones de varias personas que se desplazan a la vez por un mismo entorno, pudiendo calcular cuándo se cruzan o a la distancia a que se encuentran en un determinado momento.

Las posibles aplicaciones consisten en la capacidad de representar movimientos ocurridos en el pasado para analizar dichos movimientos, o para representar movimientos en base a eventos que ocurrirán en el futuro para predecir cómo será ese movimiento. Por ejemplo:

- evitar colisiones entre objetos móviles
- planificar rutas de varias personas que se desee que interactúen en distintos momentos.
- planificar horarios de varios medios de transportes para que coincidan en determinados puntos para hacer intercambio de transporte....

## **Capítulo 7. Conclusiones**

---

Tras la realización de este trabajo se han extraído un conjunto de conclusiones que dan respuesta a los interrogantes de investigación considerados en el capítulo 1. Una vez logrados los objetivos que nos planteábamos para la obtención de nuestro modelo, podemos exponer posibles casos de uso o aplicaciones. Llegado a este punto, también estamos en posición de poder plantear, finalmente, nuevas líneas de investigación.

---

## 7.1 Introducción

La evaluación de resultados obtenidos realizada en el capítulo anterior es el último paso del proceso de modelado que proponía esta tesis, permitiéndonos validar nuestro modelo para la explicación y simulación de desplazamientos humanos. Una vez alcanzado este último paso nos proponemos reunir todas las conclusiones que hemos ido extrayendo durante todo el proceso, las cuales dan respuesta a los interrogantes de investigación planteadas en el capítulo 1. El hecho de comprobar que hemos sido capaces de satisfacer estas preguntas nos lleva a la conclusión de que hemos alcanzado los objetivos iniciales. Esto nos motiva a reflexionar sobre el tipo de aplicaciones en que se puede utilizar el modelo desarrollado, e incluso a plantear posibles líneas futuras de investigación relacionadas con la presente tesis.

Para abordar todas estas cuestiones hemos estructurado este capítulo en los siguientes epígrafes:

- Resumen del trabajo de tesis,
- Conclusiones tras el desarrollo del modelo,
- Ventajas y limitaciones del modelo,
- Aplicaciones del modelo,
- Posibles líneas de investigación futuras.

## 7.2 Resumen del trabajo de tesis

Si observamos el mundo real que nos rodea, nos encontraremos con una infinidad de fenómenos cuyo comportamiento en un principio puede resultar un tanto aleatorio o caótico, sin ofrecernos pistas sobre su comportamiento. Éste es el caso del fenómeno de los desplazamientos espontáneos de personas, de cuya observación podemos percibir un cierto caos. Sin embargo, si nos fijamos reiteradamente en un fenómeno concreto y analizamos numerosas muestras de su comportamiento, nos percataremos de la existencia de una serie de componentes relevantes que actúan ajustándose a un patrón general de comportamiento. Una vez desenmascarado este patrón, desaparece el caos aparente que gobernaba el fenómeno de estudio, apareciendo las reglas por la que se rige su comportamiento, con la consiguiente posibilidad de realizar previsiones. Este objetivo es el que nos habíamos propuesto: obtener el patrón de comportamiento que nos permita explicar, representar y simular los desplazamientos de carácter espontáneo de las personas. Además este patrón de comportamiento debe estar integrado en un modelo espacio-temporal que simplifique y conceptualice tanto las componentes del fenómeno como sus reglas y relaciones, por lo que uno de los retos de esta tesis ha sido la integración de la componente temporal en el modelo.

La obtención de las componentes actuantes y de sus reglas de comportamiento ha constituido las dos primeras fases del modelado, y la previsión de comportamiento de las personas en base a esas reglas constituye la tercera. Hemos mostrado un proceso cuya metodología está marcada por la consecución de estas tres fases (abstracción, razonamiento, predicción) que, aplicadas secuencialmente, nos han permitido modelar el fenómeno de la vida real concerniente a los desplazamientos espontáneos de personas.

---

La modelización orientada a objetos, por su capacidad de representar entidades clasificadas y sus relaciones, ha sido idónea para la abstracción de las componentes de este modelo. Y la modelización orientada a eventos nos ha permitido afrontar el frecuente problema que se presenta en la formalización de la dimensión temporal y las variaciones que ocurren en esta dimensión. Para la integración de ambos tipos de modelo hemos incluido la clase 'evento' como la causante de las variaciones sufridas a lo largo del tiempo.

Por otro lado la obtención del patrón de comportamiento en base al cual se desplazan las personas ha generado la búsqueda de la conceptualización de dicho movimiento. Para ello hemos representado el movimiento espontáneo de las personas como resultante de fuerzas análogas a las de gravedad propias de modelos de accesibilidad, que en nuestro modelo son proporcionales al valor de utilidad en cada punto del entorno. Para el cálculo de estos valores de utilidad nos hemos apoyado en el análisis de preferencias ponderadas mediante técnicas de evaluación Multicriterio. La similitud de cada uno de estos fundamentos nos ha motivado a usar su convergencia generando la "*función de interacción*" para representar el movimiento espontáneo de las personas. Para simular dicho movimiento hemos considerado la referencia del movimiento de fluidos sobre una superficie (también causado por fuerzas de gravedad), a partir del máximo gradiente. Nuestro modelo simula el desplazamiento de la persona buscando la maximización de utilidad durante su recorrido, que coincidirá con el máximo gradiente de una superficie constituida por valores de utilidad: las superficies de movimiento. La generación de estas superficies de movimiento para representar el desplazamiento de las personas permite reafirmar la analogía existente entre el desplazamiento de personas y el fluido de líquidos, analogía que nunca antes había sido enunciada.

Recopilando todas las entidades descritas, tenemos ya las principales clases actuantes en el fenómeno del movimiento de las personas: persona, preferencias, interacción, entorno, tiempo, evento, superficie de movimiento y trayectoria.

Llegado a este punto, hemos conseguido una definición teórica del modelo y de su funcionamiento pero, para poder aplicarlo a un escenario de la vida real sobre el que hacer previsiones de desplazamiento, necesitamos primero materializar esta descripción. El primer paso para esta materialización es obtener

---

una formalización de las clases actuantes, asociadas a sus correspondientes propiedades y atributos y las relaciones existentes entre las mismas. Para ello hemos utilizado la herramienta Protégé, ya que permite representar el mundo como una colección de objetos que tienen ciertos atributos, funcionalidades y relaciones con otros objetos mediante reglas y funciones. Además la implementación de las reglas de comportamiento en el sistema experto Jess nos ha permitido hacer razonamientos automáticos sobre dicho fenómeno. El segundo paso para obtener esta materialización ha sido el desarrollo de una aplicación en Java que acomete las fases metodológicas de razonamiento y predicción sobre las anteriores clases formalizadas. Aquí hemos comprobado las ventajas que aporta la modelización orientada a objetos en la conceptualización del modelo, ya que las clases abstraídas en el modelo orientado a objetos durante la fase de abstracción son las mismas que se han empleado para la programación de la aplicación, y además manteniendo las mismas relaciones, lo que ha facilitado el diseño de la aplicación incluso de su interfaz.

Una vez materializado el funcionamiento teórico del modelo, hemos podido aplicarlo en un escenario real sobre el que realizar simulaciones: el parque Dwingelderveld y los desplazamientos realizados por sus visitantes. De la superposición de las trayectorias simuladas y de las reales observadas en dicho escenario hemos podido realizar el proceso de validación del modelo planteado.

Referente al proceso de validación, trataremos en primer lugar lo relativo a la fase de abstracción realizada. Podemos concluir una correcta formalización de las clases actuantes y sus relaciones ya que, aparte de la validación obtenida por el sistema de razonamiento de Protégé, a partir de la definición y relaciones de estas clases, hemos sido capaces de construir la aplicación Java e integrar datos reales en ella obteniendo un correcto funcionamiento. Además la consistencia del modelo queda validada tras su implementación en el sistema experto Jess, ya que se obtuvieron los mismos resultados en cálculos de superficie de movimiento para varios escenarios, con las reglas implementadas en el sistema que mediante su cálculo manual. Esta misma consistencia nos valida también la manera de afrontar la dimensión temporal, ya que el sistema obtenido permite formular consultas con la finalidad de inferir sobre espacios potenciales ocupados por una persona y obtener las posibles intersecciones entre personas en un momento dado. Capacidades ya ofrecidas con *Time Geography*, pero que en el modelo propuesto

---

ofrece una mayor acotación, ya que considera también las características del entorno y las preferencias de la persona en un momento dado en base a los eventos actuantes sobre el entorno y a las actividades realizadas en ese momento.

En un segundo lugar, para tratar la validación de las fases de razonamiento y predicción en base a los resultados obtenidos, apreciamos dos situaciones diferentes:

- Por un lado reconocemos un patrón general existente en el desplazamiento de carácter espontáneo de las personas en la manera en que se mueven para incrementar su nivel de utilidad. Es decir obtenemos una predicción de la trayectoria a escala macroscópica, cuya forma principal característica (sin llegar a nivel de detalle) coincide con la real.
- Por otro lado, a una escala microscópica, encontramos la existencia de un patrón general debido a la impredecibilidad e indeterminismo propio del comportamiento de las personas: hay muchas causas que pueden causar variaciones en un desplazamiento predicho, tales como el encuentro con un elemento o persona inesperada, recibir una llamada de teléfono, etc.

Por lo tanto obtenemos una validación del modelo en cuanto a la simulación adecuada del comportamiento general estructural, pero con posibilidad de discrepancias debidas a elementos aleatorios en el fenómeno, propios de los seres humanos. Es decir, obtenemos una buena representación del movimiento a nivel general, pero más débil para la representación a nivel de detalle.

Por otro lado observando los resultados hemos encontrado más incertidumbre en las trayectorias que pasan por zonas homogéneas de valores de utilidad, ya que no hay ningún camino que ofrezca más ventajas frente los demás. Hecho que vuelve a reafirmar la analogía con el fluido de líquidos, ya que encontramos este mismo comportamiento en la manera en que los flujos discurren por una superficie buscando la máxima pendiente: el flujo abarca más superficie al discurrir por zonas de menor pendiente que al discurrir por grandes pendientes.

Todas estas consideraciones nos llevan a concluir que este modelo permite obtener predicciones sobre el movimiento de las personas considerando sus preferencias y circunstancias espaciales y temporales sólo dentro de un cierto rango de exactitud. Ello implica que se obtendría una correcta previsión para un desplazamiento en la mayoría de las veces en que se realizase, obteniéndose variaciones frente a esta previsión en las otras ocasiones.

Por último se ha realizado una formalización del movimiento obtenido mediante la sucesión desencadenada de los eventos que lo componen: Los eventos son los generadores y modificadores del movimiento, ya que varían sus características (velocidad, dirección). El resultado de dicha formalización es la descripción del movimiento mediante funciones temporales que encuentran sus puntos de inflexión en dichos eventos, a partir de las cuales hemos obtenido una descripción topológica del movimiento de personas simulado a partir de las superficies de movimiento.

### **7.3 Conclusiones tras el desarrollo del modelo**

Tras la lectura del resumen del trabajo de tesis, expuesto en el anterior epígrafe, somos capaces de extraer las respuestas a los interrogantes de investigación que se plantearon al principio del mismo, que se exponen a continuación:

- ¿Cómo abordar el proceso de modelado del desplazamiento humano de carácter espontáneo?

El modelado que se ha realizado en esta tesis sigue una estructuración en tres fases principales que han marcado el desarrollo de metodología: (1) abstracción para describir las entidades relevantes, (2) razonamiento para describir su patrón de comportamiento y (3) predicción para plantear posibles predicciones a partir de supuestos de escenario. El fenómeno a modelar está representado mediante un modelo orientado a objetos que contiene las clases que describen las entidades del fenómeno, sus funciones y reglas de comportamiento.

- ¿Cómo introducir la dimensión temporal en un modelo orientado a objetos?

La dimensión temporal provoca la evolución de las clases que representan las entidades que forman parte del fenómeno, permitiendo tanto su variación de atributos como su movimiento. Este cambio está representado mediante la inclusión de la clase evento entre las clases del modelo. Estos eventos modifican el estado inicial de las entidades definidas por un conjunto de atributos y una

posición espacial que las definen, son por lo tanto los causantes del cambio y del dinamismo.

- ¿Cuáles son los fundamentos teóricos cuya sinergia nos va a permitir conceptualizar y predecir el movimiento espontáneo de las personas?

Por un lado hemos considerado los fundamentos en los que nos hemos basado para conceptualizar el movimiento espontáneo de las personas, que son los siguientes:

- Modelos de gravedad
- Medidas de utilidad basada en preferencias
- Evaluación Multicriterio (EMC)

Por otro lado hemos considerado el fundamento que va a permitir simular el movimiento resultante en la fase de predicción, que se basa en la simulación del movimiento de fluidos mediante la superficie de confluencia de flujo.

- ¿Cuáles son las principales clases actuantes en el fenómeno del desplazamiento espontáneo de las personas?

La respuesta a esta pregunta se obtiene en la primera fase de metodología, fase de abstracción: persona, preferencias, interacción, entorno, tiempo, evento, superficie de movimiento, trayectoria. Además en esta primera fase han quedado todas estas clases relacionadas entre sí: una persona caracterizada por un conjunto de preferencias interactúa mediante la clase interacción con un entorno en un instante de tiempo dado en el que los eventos ocurrentes modifican tanto los valores de las preferencias como los del entorno. Como resultado de esta interacción surge la superficie de movimiento de cuyos valores de utilidad resulta la trayectoria.

- ¿Cómo actúan e interactúan las clases abstraídas para producir el movimiento espontáneo?

La respuesta a esta pregunta se obtiene en la segunda fase de metodología, la fase de razonamiento, mediante la cual se conceptualiza el fenómeno de los desplazamientos mediante fuerzas de atracción proporcionales a valores de utilidad: los puntos deseados del entorno ejercen fuerzas de atracción positiva con valores altos de utilidad, y los no deseados o constreñimientos constituyen fuerzas

---

de atracción negativa o repulsiva con descensos en valores de utilidad. Para el cálculo de estas fuerzas proporcionales a la utilidad recibida se ha desarrollado la función de interacción, que tiene como resultado la superficie de movimiento.

- ¿Cómo hacer previsiones de desplazamiento espontáneo en un escenario definido?

La respuesta a esta pregunta se obtiene en la tercera fase de metodología, la fase de predicción. La manera de hacer previsiones de desplazamiento en un escenario definido parte de la premisa de que el sujeto siente una fuerza de atracción ocasionada por la utilidad de acceder al punto de destino para satisfacer una finalidad en dicho punto. El escenario queda definido mediante el sujeto y sus preferencias, el entorno en el que se encuentra y los eventos actuantes en ese momento. A partir de la definición del escenario se calcula la superficie de movimiento mediante el cálculo de los valores de utilidad en cada punto del entorno y cuyo resultado es la previsión de la trayectoria. El cálculo de esta trayectoria se basa en maximizar la utilidad durante el desplazamiento, por lo que se sigue la misma técnica que en la simulación de un fluido sobre las superficies de confluencia de flujo mediante la búsqueda de la máxima pendiente.

- ¿Cómo materializar el proceso de modelado propuesto?

En primer lugar se ha realizado la implementación mediante una herramienta de formalización de clases (Protégé), que ha permitido obtener una descripción formal de la estructura de clases resultantes de la fase de abstracción, además las reglas de comportamiento han sido implementadas en el sistema experto Jess. En segundo lugar se ha presentado la elaboración de una aplicación Java que implementa el mecanismo del modelo obtenido en las fases de razonamiento y predicción, permitiendo realizar simulaciones a partir de un escenario definido. El desarrollo de la aplicación Java que materializa el funcionamiento teórico del modelo nos ha permitido integrar datos de un escenario real para realizar simulaciones, los que nos ha permitido realizar una evaluación de nuestro modelo.

- ¿Cómo validar el modelo planteado?

La validación del modelo se ha llevado a cabo mediante la comparación entre comportamientos simulados y observados para una misma definición de escenario, para lo que ha sido imprescindible pasar previamente por la anterior etapa de implementación del modelo.

- En vista de los resultados ¿en qué tipo de modelos se encuentra el nuestro?

En vista de los resultados, el modelo propuesto proporciona trayectorias simuladas afectadas de un cierto rango de inexactitud, lo que provoca la aparición de cierta incertidumbre en la determinación del comportamiento. En un principio se encontraría dentro del marco de modelos de tipo probabilístico (frente a los deterministas) puesto que las trayectorias simuladas están afectadas de un factor de probabilidad. Sin embargo no lo podemos asegurar al no tener el modelo de probabilidad asociado que permita calcular el nivel de confianza para cada estimación. Por ello clasificamos al modelo como un modelo aproximado que proporciona trayectorias más exactas cuanto menor es el nivel de detalle (a escalas macro). Para aumentar el nivel de exactitud a bajo nivel de detalle (escalas micro) deberíamos aumentar el número de factores considerados (prever un mayor número de eventos que pueden afectar a la persona) y afinar al máximo la definición de preferencias de la persona.

Resumiendo, la trayectoria que calcula el modelo es la trayectoria que elegiría una persona en la mayoría de los casos, o en aquellos en que se busque la mayor utilidad, pero siempre estaría sometida a pequeñas variaciones producto de factores aleatorios.

- ¿A qué se debe la incertidumbre existente en la simulación?

La incertidumbre obtenida en la simulación se debe a los siguientes factores:

- Áreas de valores homogéneos de utilidad: provocan difluencias de recorrido por no haber una alternativa mejor que otra.
- Existencia de posibles factores no contemplados (recibir una llamada, encontrarse con un conocido): provocan discrepancias de trayectoria de la persona.

- Mala determinación de las preferencias de los visitantes: provocan simulaciones erróneas por haber partido de información equivocada
- ¿Cómo obtener una descripción topológica del movimiento obtenido?

Para ello se ha diseñado por un lado un mecanismo que representa el movimiento mediante funciones espacio temporales a partir de las ecuaciones de rectas que pasan por dos puntos (cada pareja de eventos consecutivos). Y por otro lado, para representar los contextos espacio-temporales con los que interactúa el cuerpo en movimiento hemos introducido unas primitivas espaciotemporales, definidas geoméricamente. A partir de la función espacio-temporal y las primitivas espacio-temporales podemos calcular las relaciones existentes entre el movimiento del cuerpo y su contexto espacio-temporal y movimiento de otros cuerpos mediante operaciones geométricas.

## 7.4 Ventajas y limitaciones del modelo

Tras estas discusiones podemos resumir a continuación las limitaciones y ventajas que ofrece el modelo:

### 7.4.1 Limitaciones

- Sensibilidad a la existencia de factores inesperados (inevitablemente no contemplados en el modelo, como argumentábamos arriba)
- Incertidumbre en situaciones de valores homogéneos.
- Basado en algo subjetivo como son las preferencias, difíciles de medir y obtener salvo que se tenga una encuesta dirigida a extraerlas.
- Acotamiento al tipo de movimiento de carácter espontáneo, sin aplicación directa a la predicción de los movimientos de carácter planificado, es decir a los que son fruto de una elección de trayectoria a priori del desplazamiento.

### 7.4.2 Ventajas

- Obtención de una trayectoria simulada que, aunque pueda estar afectada de los factores inesperados ya comentados, nos permitirá obtener una previsión de su estructura global, variable a lo largo del tiempo según sean las circunstancias

del escenario, lo que permitirá realizar numerosas aplicaciones como las que serán descritas más adelante.

- Posibilidad de considerar eventos que aparezcan en el momento en el que se calcula la trayectoria simulada.
- Posibilidad de formalizar la definición de algo tan subjetivo como las preferencias de una persona mediante las matrices de preferencias que varían con el tiempo, sus pesos y sus funciones de utilidad.
- Posibilidad de individualizar sujetos y considerar sus preferencias materializadas como se ha mencionado más arriba.
- Como muestra la figura 117, incorporar las preferencias al modelo afina la delimitación de espacio geográfico potencial de *Time Geography*. Es decir, el hecho de incorporar eventos basados en actividades produce la capacidad de delimitar el espacio recorrido en función de las actividades que realiza una persona, y la incorporación de las preferencias produce una capacidad mayor de delimitación de espacio recorrido, ya que determina la trayectoria misma.

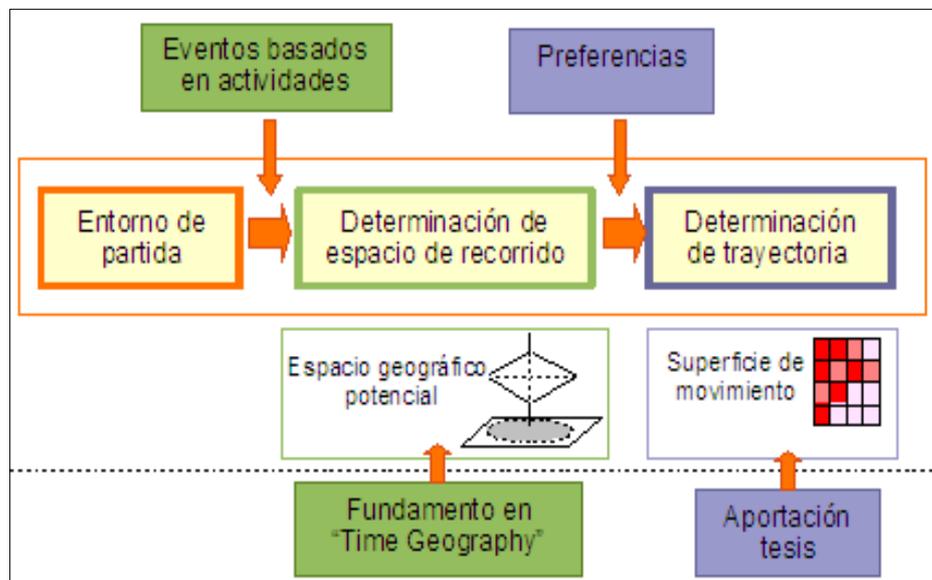


Figura 117: La inclusión de preferencias permite la determinación de la trayectoria.

- Una de las grandes ventajas de este modelado es la posibilidad de obtener una descripción geométrica del movimiento en términos cuantitativos. Lo que nos permite predecir cuando y donde se van a encontrar dos cuerpos en movimiento.

---

## 7.5 Aplicaciones del modelo

A partir de las discusiones realizadas, consideramos al modelo propuesto en este trabajo capaz de simular trayectorias en escenarios reales dentro de un cierto rango de exactitud. Ello nos conduce a hablar de la posibilidad de aplicar este modelo en diversos escenarios de la vida real.

Los usos del modelo constituyen la fase de planificación durante la cual se aplican las predicciones obtenidas, que generalmente son tareas relativas a la planificación de actuaciones, tales como líneas de actuación para hacer frente a las posibles predicciones obtenidas, tomar decisiones y elaborar estrategias para lograr objetivos definidos. Para el caso de las predicciones que plantea nuestro modelo, estas aplicaciones estarán orientadas a planificaciones urbanas como por ejemplo diseño de facilidades para viandantes, localizaciones estratégicas de servicios para el público.

El modelo propuesto, por su herencia de los modelos de accesibilidad y modelos para peatones, hereda algunas de sus aplicaciones. Tradicionalmente, los modelos de accesibilidad han sido aplicados en planificaciones territoriales, como el estudio de patrones urbanísticos o de infraestructuras de transportes, sin olvidar también su utilización en estudios socioeconómicos (Muhammad, 2007). Los estudios sobre los desplazamientos de peatones tienen aplicación en evitar aglomeraciones, planificación de calles y facilidades para el viandante, finalidades comerciales. Sin embargo, las aplicaciones del modelo propuesto estarían encaminadas a realizar planificaciones en las que los requisitos o preferencias de desplazamiento jugarán un papel muy importante.

Para empezar, considerando esta capacidad de discernir preferencias de desplazamiento, este modelo encontraría aplicación en el problema de localización-asignación (Fotheringham et al. 1995) cuando se busque optimizar la accesibilidad a la localización según los requisitos de los usuarios o consumidores a los que se destinará dicha localización. Es decir, si mediante la técnica de localización-asignación se encuentra la localización espacial más apropiada según unos requisitos, mediante la aplicación de este modelo a esta técnica se propone situar un servicio en el lugar más accesible a sus usuarios. Un ejemplo relacionado con la implementación realizada sería ubicar un puesto de alquiler de prismáticos en el lugar de paso por dónde circulan los visitantes que van a observar pájaros.

Otro posible uso estaría encaminado a la planificación de rutas de personas en las que se desea satisfacer sus necesidades o preferencias, como por ejemplo rutas turísticas.

Debido al matiz de espontaneidad del movimiento resultante, generado de la interacción de una persona con un entorno en un momento dado, se propone la aplicación del modelo en la reconstrucción de trayectorias en la búsqueda de personas extraviadas.

La posibilidad de contemplar las preferencias de desplazamiento nos permite también realizar estudios de los movimientos de distintas masas de personas caracterizadas con las mismas preferencias. Tales agrupaciones las podemos encontrar en poblaciones de diferentes culturas, que responderían con tendencias similares ante el mismo entorno. Por ejemplo, un aborigen encontraría diferente (mayor) utilidad desplazándose entre la selva que la que encontraría el habitante de una ciudad.

También gracias a la sensibilidad del modelo frente a la caracterización de preferencias, otra aplicación podría estar encaminada al estudio de los movimientos migratorios de animales, ya que éstos viajan de un punto a otro pasando por las zonas que más se adapten a sus necesidades (posibilidad de adquirir comida, características del viento o de la temperatura).

Las posibles aplicaciones de la descripción geométrica del movimiento consisten en la capacidad de representar movimientos ocurridos en el pasado para analizar dichos movimientos, o para representar movimientos en base a eventos que ocurrirán en el futuro para predecir como será ese movimiento (Ej.: evitar colisiones entre objetos móviles, planificar rutas u horarios de personas que interactúan).

## **7.6 Posibles líneas de investigación futuras**

Tras la elaboración de esta tesis se proponen diversas líneas futuras de investigación:

- La implementación del modelo en escenarios diferentes al propuesto en esta tesis, que tengan otros fines (desplazamientos para ir a trabajar), otro nivel de agregación de personas (manifestaciones), otra escala temporal (sería

---

interesante su implementación en escenarios históricos como migraciones o invasiones) o con otros medios de transporte (desplazamientos en coche).

- La simulación de superficies de movimiento y predicción de trayectorias en tiempo real. Para ello se usarían sensores que percibiesen las características del entorno en los sucesivos momentos de cálculo en los que transcurre el desplazamiento.
- Aplicación del modelo al movimiento de otros objetos móviles distintos de las personas, como por ejemplo en el estudio de desplazamientos de animales, especialmente o a nivel de manadas.
- Estudiar la aplicación del modelo en movimientos de tipo planificado en los que ya hay una ruta predefinida y la interacción con el entorno tiene menos importancia, pero aún así puedan surgir alteraciones por aparición de fenómenos imprevistos que puedan influenciar a la persona y por tanto generen desviaciones sobre la ruta predefinida.
- Realización de un estudio estadístico con un número elevado de muestras que proporcione un modelo de probabilidad de las desviaciones de las trayectorias, lo que permitiría calcular un nivel de confianza para las estimaciones. Este estudio permitiría clasificar al modelo dentro de los probabilistas.
- Relacionado con las relaciones inherentes al movimiento, se propone profundizar en los tipos de relaciones que puedan existir entre el movimiento de la persona, formalizado mediante la función espacio temporal, y sus contextos espacio temporales, formalizados mediante formas geométricas tridimensionales.
- También relacionado con la descripción geométrica del movimiento, se propone formalizar la resolución espacio temporal del movimiento y de sus puntos de intersección, en función del tipo de cuerpo en movimiento (persona andando, un coche, etc.) y de la precisión deseada. Esto se traduciría en engrosar la función espaciotemporal que representa dicho movimiento mediante márgenes que comprendan el valor de la granulometría. Es decir, el movimiento se representaría mediante un cilindro que tenga de ejes los valores de dicha granularidad. Y la intersección del movimiento de dos cuerpos supondría la intersección sus dos cilindros correspondientes.

## **Anejo I**

### **Glosario**

Este glosario recopila algunas de las terminologías empleadas en esta tesis, matizando el significado adoptado con el fin de evitar ambigüedades y facilitar la lectura del texto.

#### **ABSTRACCIÓN**

La abstracción es una operación que permite seleccionar conceptualmente la propiedad de un objeto que se considera relevante dentro de un contexto, ignorando las propiedades no consideradas como relevantes. Consiste por tanto en un proceso de filtrado y clasificación igual al realizado por el ser humano cuando observa un fenómeno en el que considera y clasifica la información que estima importante y la no importante le resulta desapercibida. Este proceso de filtrado y clasificación permiten abstraer y simplificar el fenómeno de la vida real mediante un conjunto de clases que componen el modelo. En el trabajo propuesto el proceso de abstracción corresponde con la técnica de orientación a objetos a partir de la cual se obtienen las clases actuantes en el modelo.

#### **CLASE**

Una clase describe un grupo de objetos con propiedades, comportamientos e interrelaciones comunes, por tanto el concepto de clase aparece al clasificar según diversos criterios a los objetos (ver entrada de “Objeto”). En función de los criterios a considerar en la clasificación se obtendrán diferentes estructuras de clases que definen el modelo. En este trabajo, la estructura de clases que compone el modelo se obtiene a partir del proceso de abstracción mediante la técnica de orientación a objetos.

**ESTADO**

En el mundo real, un estado es la configuración única de las propiedades que tiene un ente o fenómeno en un instante dado o durante un determinado periodo de tiempo. Por tanto, en el modelo, un estado se corresponde con el conjunto de valores de atributos que poseen las entidades que representan dichos entes en ese momento. Las distintas sucesiones de estados están separadas por eventos ya que son los que provocan variaciones en los atributos que les caracterizan. (Ver entrada de “Evento”.)

**EVENTO**

En el mundo real, los eventos representan las acciones que originan los cambios, crean variaciones en las propiedades de los entes o fenómenos. Por tanto en el modelo que representa un aspecto del mundo real, los eventos son considerados como los límites que delimitan los estados de las entidades que representan dichos entes, o dicho de otro modo, son las fronteras temporales que separan las sucesivas configuraciones que adquieren las entidades. (Ver entrada de “Estado”.)

**FUNCIÓN DE UTILIDAD**

Es una función usada frecuentemente en economía para medir la "satisfacción" o "utilidad" obtenida por un individuo racional que disfruta una serie de servicios o productos a cambio de un coste, se usan por tanto para modelizar la conducta de dicho individuo. En este trabajo se usan para medir la utilidad que proporcionan las variables del entorno a un individuo que se corresponde con la persona sujeto de un desplazamiento. En el modelo hay tantas funciones de utilidad asociadas a una persona como criterios o preferencias de desplazamiento tenga, asignando cada función los valores de utilidad a los distintos valores de atributos que son evaluados por las preferencias de la persona.

## **MODELO**

Un modelo es una representación de un aspecto del mundo real. Dependiendo del aspecto considerado y la finalidad para la que se realiza el modo, esta representación puede adquirir diversas formas obteniéndose diversos tipos de modelo (puede tratarse de una abstracción, una descripción formal, una conceptualización, una representación gráfica, etc.). Sin embargo, todas las formas de modelos tienen en común que suponen una simplificación del mundo real, permitiendo estudiar, manipular o analizar el aspecto en cuestión, e incluso establecer simulaciones o predicciones sobre fenómenos del mundo real. De todas las acepciones que tiene el término modelo, la planteada en esta tesis se refiere a la abstracción y conceptualización de un fenómeno que ocurre en el mundo real (los desplazamientos de las personas), con el fin de explicar y realizar predicciones sobre este fenómeno.

## **OBJETO**

En la acepción tomada en este texto, los objetos son entidades abstractas, productos de la abstracción aplicada sobre entes del mundo real y sobre los cuales se pueden definir acciones. Un objeto representa un ente o fenómeno concreto del mundo real cuyas sus características y propiedades pueden ser descritas de manera precisa mediante atributos y funciones, son por tanto las entidades del modelo.

## **TIEMPO**

El Tiempo es la magnitud física con la que medimos la duración de estados de los fenómenos del mundo real y la duración de los eventos que hacen variar esos estados.

Permite ordenar la sucesión de dichos estados y eventos según su existencia o aparición, estableciendo una cronología de sucesos. En el modelo propuesto el tiempo representa el conjunto de instantes en los que ocurren los eventos o cambios que hacen modificar los estados de las entidades que lo componen. En función de la resolución temporal del modelo, estos instantes variarían de horas, días, meses o incluso años. Es decir, para representar un desplazamiento por un

parque como el mostrado en este trabajo necesitaríamos una resolución temporal de horas, sin embargo para representar desplazamientos de tipo migratorio nos bastaría con una resolución de días o de meses.

### **SUPERFICIE DE MOVIMIENTO**

Esta terminología se introduce en este texto para referirse a la superficie hipotética que se forma mentalmente una persona tras percibir y evaluar, según sus preferencias, el entorno por el que se desplaza. Esta superficie imaginaria está formada por el conjunto de valores de utilidad resultantes de esa evaluación, que representan sólo en analogía un campo de fuerzas de atracción que producen el movimiento de una persona hacia los puntos de mayor utilidad. También hablando en analogía, así como una gota de agua se desliza por una superficie buscando las máximas pendientes, una persona se moverá por un entorno buscando las máximas utilidades.

---

## Anejo II

### Implementación de clases, objetos y reglas en Protégé y Jess

A continuación se muestra el código introducido en Protégé y Jess para crear las clases, objetos, reglas y funciones que fueron definidas en la metodología del capítulo 3 e implementadas en el capítulo 4.

#### 1. Definición de clases

##### Clase Tiempo

```
(defclass Tiempo (is-a :THING)
  (slot dia (type integer)) (slot mes (type integer)) (slot año (type integer)))
```

##### Clase Persona

```
(defclass Persona (is-a :THING)
  (slot name (type string)) (slot edad (type integer)) (slot horario paseo (type integer)) (slot
  horario entrada trabajo (type integer)) (slot lugar_trabajo (type string)) (slot
  tienePreferencias (type instance) (allowed-classes Preferencias)))
```

##### Clase Entorno

```
(defclass Entorno (is-a :THING) (slot seguridad_c (type integer)) (slot rapidez_c (type
integer)) (slot paisaje_c (type integer)))
```

**Clase Superficie de Movimiento**

```
(defclass SuperficieMovimiento (is-a :THING) (slot utilidad (type integer)))
```

**Clase Preferencias**

```
(defclass Preferencias (is-a :THING) (slot seguridad (type integer)) (slot rapidez (type integer)) (slot paisaje (type integer)))
```

**Clase y subclases de Evento**

```
(defclass Evento (is-a :THING) (slot espacio (type instance)(allowed-classes Entorno)) (slot momento (type instance)(allowed-classes Tiempo)))
```

```
(defclass Actividad (is-a :THING) (slot sujeto (type instance)(allowed-classes Persona)) (slot hora ini (type integer)) (slot hora fin (type integer)) (slot estado (type integer)) (slot nombre actividad (type string)) )
```

```
(defclass EventoEntorno (is-a :THING) (slot sujeto (type instance)(allowed-classes Persona)) (slot hora ini (type integer)) (slot hora fin (type integer)) (slot estado (type integer)) (slot nombre lugar (type string)) (slot tipo evento (type string)) )
```

**2. Definición de objetos (instancias de clases)****Objetos de Persona**

```
(MAIN::object (is-a Persona) (is-a-name "Persona") (OBJECT) (:NAME "Pluto") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (edad 30) (tienePreferencias (realizaActividad nil) (horario paseo 15) (horario entrada trabajo 8) (name "Ana"))
```

```
(MAIN::object (is-a Persona) (is-a-name "Persona") (OBJECT) (:NAME "leo") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (edad 30) (tienePreferencias) (realizaActividad nil) (horario paseo 20) (horario entrada trabajo 9) (name "Leo"))
```

### Objetos de Entorno

(MAIN::object (is-a Entorno) (is-a-name "Entorno") (OBJECT) (:NAME "celda1") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (nombre\_entorno "viso") (paisaje\_c 3) (seguridad\_c 2) (rapidez\_c 1))

(MAIN::object (is-a Entorno) (is-a-name "Entorno") (OBJECT) (:NAME "celda2") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (nombre\_entorno "alto") (paisaje\_c 3) (seguridad\_c 1) (rapidez\_c 1))

### Objetos de Superficie de Movimiento

(MAIN::object (is-a SuperficieMovimiento) (is-a-name "SuperficieMovimiento") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "celdaSM1") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (utilidad 2))

### Objetos de Preferencias

(MAIN::object (is-a Preferencias) (is-a-name "Preferencias") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "prefAna") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (dueñoPref "Ana") (seguridad 2) (sujetoPref <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (rapidez 1) (paisaje 3))

(MAIN::object (is-a Preferencias) (is-a-name "Preferencias") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "prefLeo") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (dueñoPref "Leo") (seguridad 2) (sujetoPref <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (rapidez 1) (paisaje 3))

## Objetos de subclases de Evento

(MAIN::object (is-a Actividad) (is-a-name "Actividad") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "ModeloJess2\_Instance\_10047") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (espacio nil) (Activa nil) (ModificaPersona nil) (tipoEvento nil) (estado "on") (momento nil) (hora\_fin 20) (hora\_ini 16) (ModificaEntorno nil) (nombre\_actividad "pasear") (realizada\_por <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>))

(MAIN::object (is-a Actividad) (is-a-name "Actividad") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "trabajar") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (espacio nil) (Activa nil) (ModificaPersona nil) (tipoEvento nil) (estado "of") (momento nil) (hora\_fin 16) (hora\_ini 8) (ModificaEntorno nil) (nombre\_actividad "trabajar") (realizada\_por <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>))

(MAIN::object (is-a EventoEntorno) (is-a-name "EventoEntorno") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "ModeloJess2\_Instance\_20153") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (espacio <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (Activa nil) (ModificaPersona nil) (tipoEvento "luvia") (estado "of") (momento nil) (hora\_fin 10) (hora\_ini 8) (ModificaEntorno nil) (nombre\_lugar "viso"))

(MAIN::object (is-a EventoEntorno) (is-a-name "EventoEntorno") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "ModeloJess2\_Instance\_10048") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (espacio <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (Activa nil) (ModificaPersona nil) (tipoEvento "sol") (estado "of") (momento nil) (hora\_fin 18) (hora\_ini 10) (ModificaEntorno nil) (nombre\_lugar "viso"))

(MAIN::object (is-a EventoEntorno) (is-a-name "EventoEntorno") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "ModeloJess2\_Instance\_30146") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (espacio <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (Activa nil) (ModificaPersona nil) (tipoEvento "nublado") (estado "on") (momento nil) (hora\_fin 20) (hora\_ini 13) (ModificaEntorno nil) (nombre\_lugar "alto"))

(MAIN::object (is-a EventoEntorno) (is-a-name "EventoEntorno") (OBJECT <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (:NAME "ModeloJess2\_Instance\_20049") (:DIRECT-TYPE <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultCls>) (espacio <Java-Object:edu.stanford.smi.protege.model.DefaultSimpleInstance>) (Activa nil) (ModificaPersona nil) (tipoEvento "arcoiris") (estado "on") (momento nil) (hora\_fin 20) (hora\_ini 18) (ModificaEntorno nil) (nombre\_lugar "viso"))

### 3. Definición de reglas y funciones

#### **Tiempo activa actividad**

```
(defrule MAIN::tiempo-activa-actividad
  (declare (no-loop TRUE))
  (object (is-a MomentoCalculo) (hora ?h))
  ?a <- (object (is-a Actividad) (hora_fin ?hf&:(> ?hf ?h)) (hora_ini ?hi&:(< ?hi ?h)))
  =>
  (slot-set ?a estado on))
```

#### **Tiempo activa evento**

```
(defrule MAIN::tiempo-activa-actividad
  (declare (no-loop TRUE))
  (object (is-a MomentoCalculo) (hora ?h))
  ?a <- (object (is-a Actividad) (hora_fin ?hf&:(> ?hf ?h)) (hora_ini ?hi&:(< ?hi ?h)))
  =>
  (slot-set ?a estado on))
```

#### **Evento modifica entorno**

```
(defrule MAIN::evento_modif_entorno
  (declare (no-loop TRUE))
  (object (is-a EventoEntorno) (espacio ?esp) (tipoEvento ?tipo) (estado ?est&:(= ?est
"on")))
  =>
  (if (= ?tipo "lluvia") then (slot-set ?esp paisaje_c 2) (slot-set ?esp rapidez_c 1) (slot-set
?esp seguridad_c 1))
  (if (= ?tipo "nublado") then (slot-set ?esp paisaje_c 3) (slot-set ?esp rapidez_c 1) (slot-set
?esp seguridad_c 1))
  (if (= ?tipo "arcoiris") then (slot-set ?esp paisaje_c 3) (slot-set ?esp rapidez_c 1) (slot-set
?esp seguridad_c 2))
  (if (= ?tipo "sol") then (slot-set ?esp paisaje_c 3) (slot-set ?esp rapidez_c 3) (slot-set ?esp
seguridad_c 3)))
```

**Actividad modifica preferencias**

```
(defrule MAIN::activ_modif_preferencias
  (declare (no-loop TRUE))
  (object (is-a Actividad) (estado ?est&:(= ?est "on")) (nombre_actividad ?na)
  (realizada_por ?s))
  ?pref <- (object (is-a Preferencias) (sujetoPref ?s))
  =>
  (if (= ?na "trabajar") then (slot-set ?pref seguridad 2) (slot-set ?pref rapidez 3) (slot-set
  ?pref paisaje 1))
  (if (= ?na "compras") then (slot-set ?pref seguridad 2) (slot-set ?pref rapidez 2) (slot-set
  ?pref paisaje 2))
  (if (= ?na "pasear") then (slot-set ?pref seguridad 2) (slot-set ?pref rapidez 1) (slot-set
  ?pref paisaje 3)))
```

**Función de interacción**

```
(deffunction funcion_interaccion (?s ?v ?p ?ps ?pv ?pp)
  (if (and (= ?s ?ps) (= ?p ?pp) (= ?v ?pv)) then
    (return 3)
  else
    (if (or (and (= ?p ?pp) (= ?v ?pv)) (and (= ?p ?pp) (= ?s ?ps)) (and (= ?s ?ps) (= ?v
    ?pv))) then
      (return 2))
    else
      (if (or (= ?p ?pp) (= ?v ?pv) (= ?s ?ps)) then
        (return 1))
      else
        (return 0)))
```

**Calcula interacción**

```
(defrule MAIN::calcula_interacción
  (declare (no-loop TRUE))
  (object (is-a Interacción) (NombrePersona ?n) (NombreEntorno ?e))
  ?pref <- (object (is-a Preferencias) (dueñoPref ?dp&:(= ?dp ?n)))
  ?ent <- (object (is-a Entorno) (nombre_entorno ?ne&:(= ?ne ?e)))
  =>
```

**Función principal**

```
(deffunction principal1 (?t ?esp ?pers)
  (desactiva-eventos)
  (slot-set ModeloJess2_Instance_20103 hora ?t)
  (slot-set ModeloJess2_Instance_8 NombreEntorno ?esp)
  (slot-set ModeloJess2_Instance_8 NombrePersona ?pers)
  (run))
```

---

## Anejo III

### Encuesta a los visitantes del parque Dwingelderveld

La implementación se ha realizado a partir de los datos obtenidos en un experimento incluido en el proyecto GEOPKDD realizado en el parque Dwingelderveld. En este experimento se han obtenido encuestas realizadas a los visitantes, además de sus trayectorias registradas mediante un dispositivo GPS, así mismo se proporcionaron también las distancias recorridas por cada tipo de visitante sobre cada tipo de vía.

De dichas encuestas se han extraído las preferencias de paseo por el parque de cada visitante, para ello se seleccionaron, de entre todas las preguntas de las que consistía la entrevista, las que tienen como respuesta las mostradas en la tabla 18.

Encuesta
ID
GPS
Fecha
Sexo
Edad
Vacaciones
Frecuencia de visita al parque
Número de adultos

Número de niños
Perro
Número total de personas
Tipo de visitante
Propósito de la visita
Tipo de propósito
Atracciones
Parking

Tabla 18: Respuestas extraídas de la encuesta

### Significado de las preguntas

A continuación se expone el significado de cada una de las preguntas seleccionadas:

- ID: Identificador único del visitante o grupo de visitantes
- GPS: El valor [1] indica si el visitante registró la trayectoria con GPS, y [0] si no la registró
- Fecha: Fecha en la que se realiza la encuesta
- Sexo: Sexo del visitante
- Edad: Edad del visitante
- Vacaciones: El valor [1] indica si el visitante está de vacaciones o [2] si no está
- Frecuencia de visita al parque: Frecuencia con la que visita el parque o si es la primera vez.
- Número de adultos: Número de adultos que componen el grupo de visitantes
- Número de niños: Número de niños que componen el grupo de visitantes
- Perro: El valor [1] indica si el visitante lleva perro o [0] si no lo lleva
- Número total de personas: Número total de personas (adultos y niños) que hay en el grupo.

- Tipo de visitante: Tipo de visitante (persona mayor sola, adulto solo, pareja de adultos, familia con niños, grupo de adultos)
- Propósito de la visita: ¿Hay un propósito de visita al parque? [1] si [2] no
- Tipo de propósito: Tipo de propósito (pasear, observar naturaleza, sacar fotos, hacer deporte, visitar atracciones)
- Atracciones: ¿En qué atracciones del parque está interesado el visitante?
- Parking: Parking usado por el visitante

## Anejo IV

### Implementación en Java

Este anejo hace referencia al esquema seguido en la implementación del modelo en una aplicación Java, la estructura de clases y el código de las funciones más importantes.

La clase que contiene el interfaz es “*Interface.java*” es la encargada de recoger las peticiones del usuario de la aplicación, comunicarse con las demás clases (“*Persona.java*”, “*Entorno.java*”, “*Trayectoria.java*”,...) para obtener la respuesta y posteriormente responder dichas peticiones. Las clases “*PintorEntorno.java*” y “*PintorLeyenda.java*” son las encargadas de mostrar la visualización de los resultados gráficos, superficies de utilidad con sus correspondientes leyendas y trayectorias (figura 118).

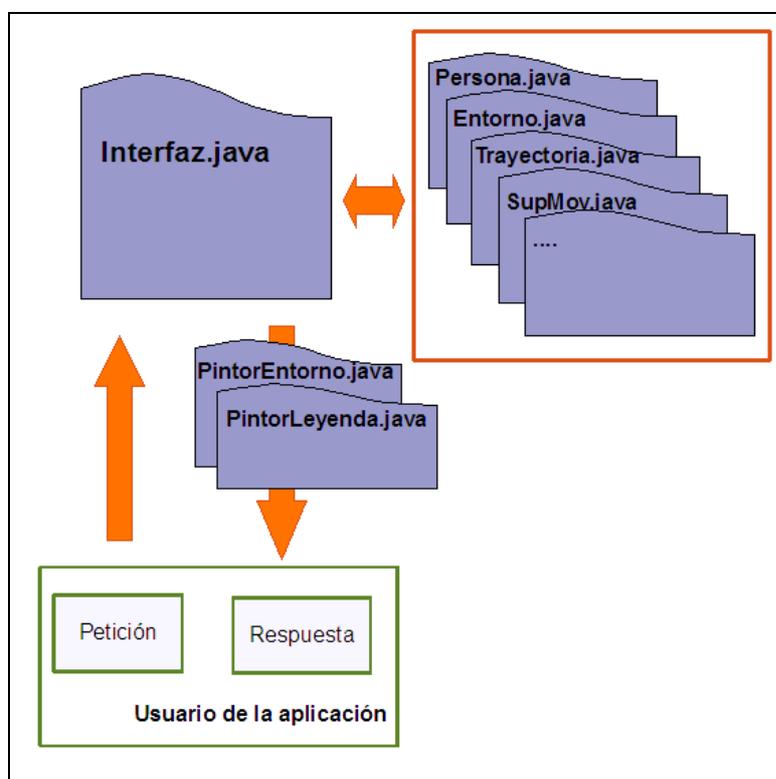


Figura 118: Esquema de comunicación de la aplicación

Las posibles peticiones que puede recibir el interfaz con sus correspondientes respuestas están reflejadas en el esquema de la figura 119.



Figura 119: Posibles peticiones a la aplicación

Cada una de estas peticiones es calculada mediante funciones implementadas en las distintas clases que componen la aplicación. A continuación se muestra el código de las dos más importantes:

- La función contenida en la clase “*SuperficieMovimiento.java*”, que calcula la superficie de movimiento.

```
public double[][] CalculaSM(){
    SM = new double [nc][nc];
    for(int i=0;i<nc;i++){
        for (int j=0;j<nc;j++){
            SM[i][j]=(pVia*utVia[j][i]+pPajaros*utPajaros[j][i]+
                pW*utW[j][i]+pVeg*utVeg[j][i]+pAt*utAtracciones[i][j])/100;
        }
    }
    return SM;
}
```

- La función contenida en la clase “*Trayectoria.java*”, que calcula la trayectoria sobre la anterior superficie de movimiento calculada.

```

public int[][] DameTrayectoria{

    Tray = new int [900][900];
    Tray[0][0]=Xini;
    Tray[0][1]=Yini;
    XAux=Xini;
    Yaux=Yini;
    for(int i=1;i<900;i++){

        v1= SupMov3[XAux+c][YAux+ar];
        v2= SupMov3[XAux+de][YAux+ar];
        v3= SupMov3[XAux+de][YAux+c];
        v4= SupMov3[XAux+de][YAux+ab];
        v5= SupMov3[XAux+c][YAux+ab];
        v6= SupMov3[XAux+iz][YAux+ab];
        v7= SupMov3[XAux+iz][YAux+c];
        v8= SupMov3[XAux+iz][YAux+ar];

        if(v1>=v2&&v1>v3&&v1>v4&&v1>v5&&v1>v6&&v1>v7&&v1>v8){Tray[i][0]=XAux;Tray[
i][1]=YAux-1;}

        if(v2>v1&&v2>=v3&&v2>v4&&v2>v5&&v2>v6&&v2>v7&&v2>v8){Tray[i][0]=XAux+1;Tr
ay[i][1]=YAux-1;}

        if(v3>v2&&v3>v1&&v3>=v4&&v3>v5&&v3>v6&&v3>v7&&v3>v8){Tray[i][0]=XAux+1;Tr
ay[i][1]=YAux;}

        if(v4>v2&&v4>v3&&v4>v1&&v4>=v5&&v4>v6&&v4>v7&&v4>v8){Tray[i][0]=XAux+1;Tr
ay[i][1]=YAux+1;}

        if(v5>v2&&v5>v3&&v5>v4&&v5>v1&&v5>=v6&&v5>v7&&v5>v8){Tray[i][0]=XAux;Tray[
i][1]=YAux+1;}

        if(v6>v2&&v6>v3&&v6>v4&&v6>v5&&v6>v1&&v6>=v7&&v6>v8){Tray[i][0]=XAux-
1;Tray[i][1]=YAux+1;}

        if(v7>v2&&v7>v3&&v7>v4&&v7>v5&&v7>v6&&v7>v1&&v7>=v8){Tray[i][0]=XAux-
1;Tray[i][1]=YAux;}

        if(v8>v2&&v8>v3&&v8>v4&&v8>v5&&v8>v6&&v8>v7&&v8>=v1){Tray[i][0]=XAux-
1;Tray[i][1]=YAux-1;}

        XAux=Tray[i][0];
        YAux=Tray[i][1];

        if(Math.sqrt(Math.pow(XAux-Xfin,2.0)+Math.pow(YAux-Yfin,2.0))<=1){
            XAux=Tray[i][0];
            YAux=Tray[i][1];
            l=900;
        }
    }
}

```

## Anejo V

### Resultados con variación de pesos de preferencias

Para comprobar que estábamos usando los pesos más adecuados a las preferencias se realizó distintas pruebas con otros pesos distintos a los empleados en el capítulo 4 de implementación, donde se daba mayor peso a las preferencias por atracciones y elementos del entorno que por el tipo de vías. A continuación se muestran, (según el esquema de la figura 120) resultados de cálculos de superficies de movimiento y trayectorias usando una ponderación inversa, es decir con más peso a las preferencias por tipo de vía que por elementos del entorno, comprobándose que los pesos más adecuados fueron los usados. (Figuras 121, 122, 123, 124, 125)



Figura 120: Esquema de resultados expuestos

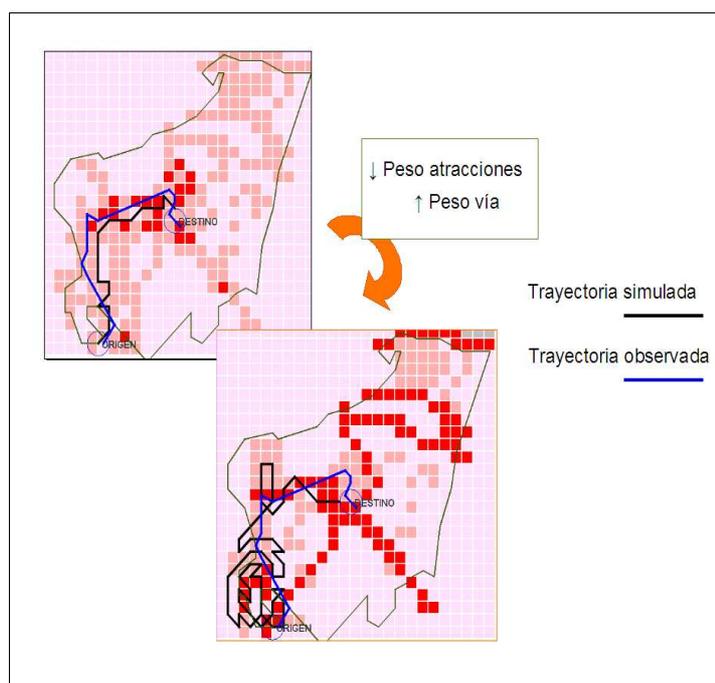


Figura 121: Variación trayectoria por variación pesos

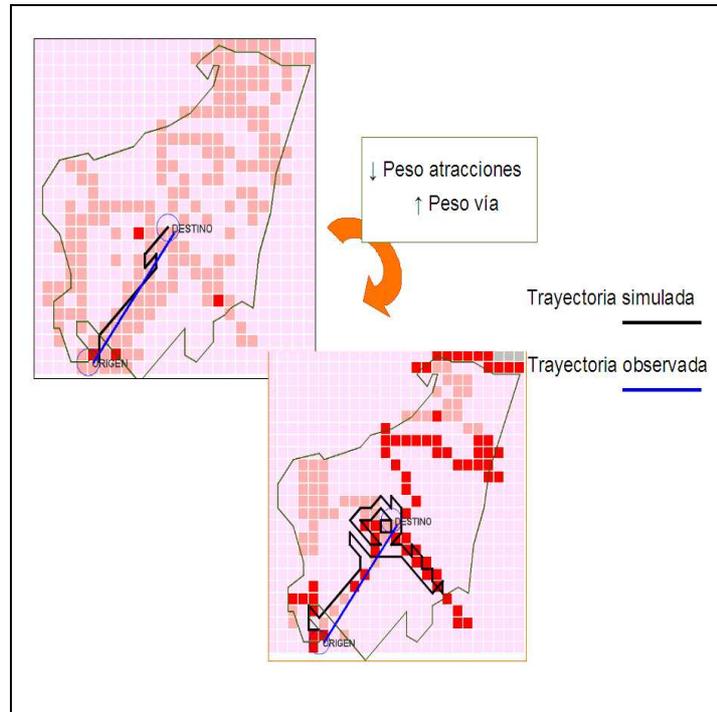


Figura 122: Variación acusada de trayectoria por variación pesos

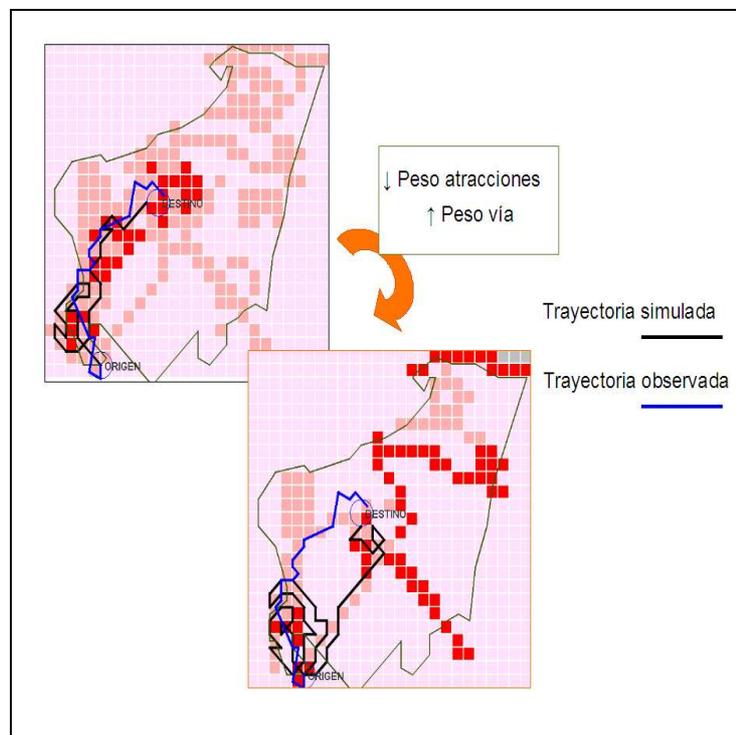


Figura 123: Variación de predicción

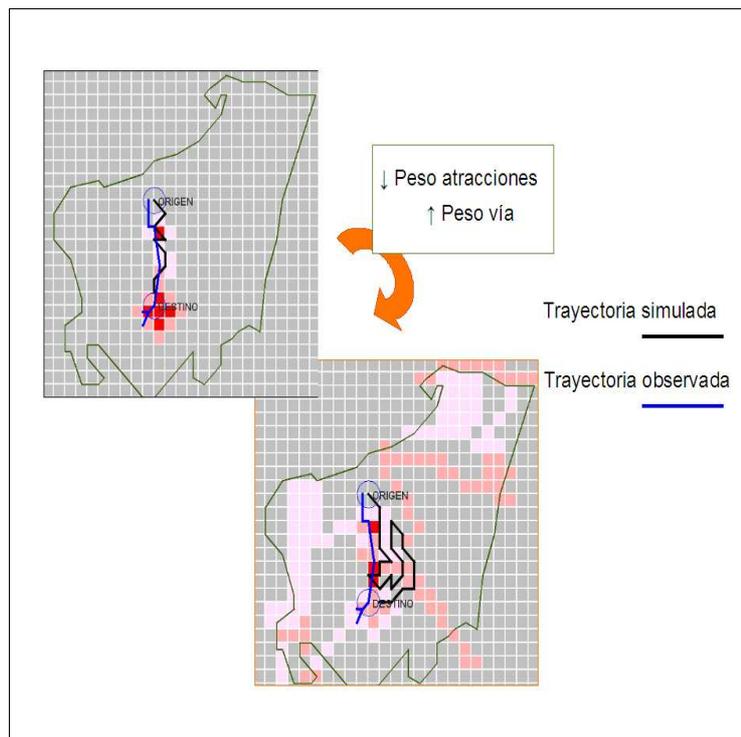


Figura 124: Ejemplo de variación de predicción

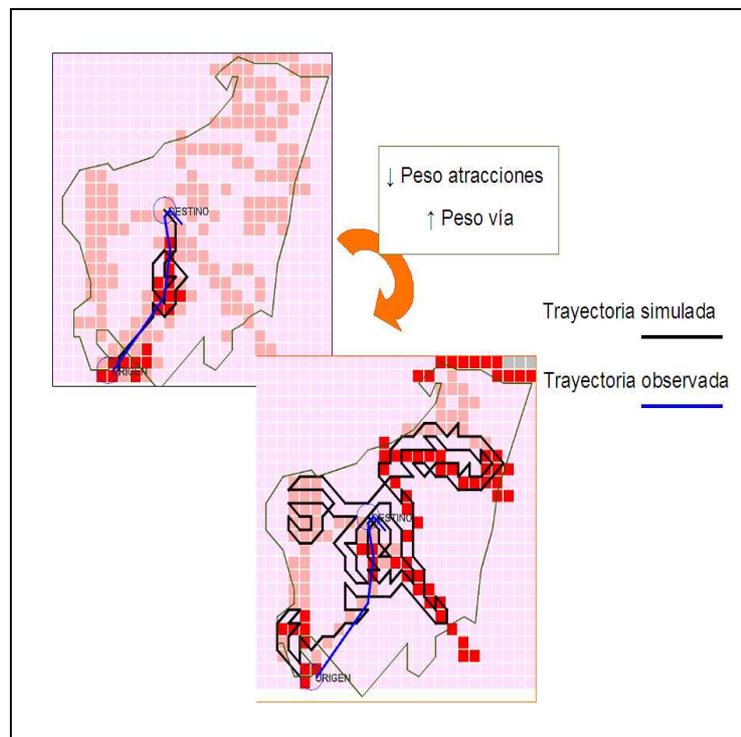


Figura 125: Resultado con variación de pesos

## Referencias bibliográficas

- ANDRIENKO, N., ANDRIENKO, G, PELEKIS, N., SPACCAPIETRA, S. “Basic concepts of movement data”. En Giannotti, F. y Pedreschi, D. (eds) *Geography, Mobility and Privacy: A Knowledge Discovery Vision*, Springer, 2007.
- ANTONINI, G. “A Discrete Choice Modeling Framework for Pedestrian Walking Behavior with Application to Human Tracking in Video Sequences”. Tesis Doctoral. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- ARMSTRONG, M. “Temporality in Spatial Databases”. *Proceedings: GIS/LIS'88*, San Francisco, 1988, vol 2, p. 880-889.
- BATTY, M., JIANG, B., THURSTAIN-GOODWIN, M. (1998) “Local movement: agent-based models of pedestrian flow”. *Center for Advanced Spatial Analysis Working Paper Series*, num 4. Disponible en [http://casa.ucl.uk/working\\_papers.htm](http://casa.ucl.uk/working_papers.htm).
- BATTY, M. (2003) “*Agent-Based Pedestrian Modelling*”. En *Advanced Spatial Analysis: the CASA book of GIS*. Longley P, y Batty M. (eds). Londres: ESRI Press, 2003. ISSN 1467-1298;
- DE BERG, M., CHEONG, O., VAN KREVELD, M., OVERMANS, M. “*Computational geometry: algorithms and applications*”. [S.l.]: Springer, 2008. ISBN 3540779736, 9783540779735
- BERRY, J.K. “Beyond Mapping III”. 2007. BASIS Press. Disponible en <http://www.innovativegis.com/basis>;

- BURSTEDDE, C., KLAUK, K., SCHADSCHNEIDE, A., ZITTARTZ, J. “Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton”. *Physica A*, 2001. vol 295, p. 507–525.
- CLARAMUNT, C., JINAG, B. A Representation of Relationships in Temporal Spaces”  
En: *Proceedings of the GIS Research UK 7th Annual Conference*, Southampton: [s.n.], 1999.
- CLARAMUNT, C., THÉRIAULT, M. “Managing time in GIS: an event-oriented approach”. En: Clifford, J. and Tuzhilin, A (ed). *Recent Advances in Temporal Databases*. Berlin: Springer-Verlag, 1995, p. 23-42.
- CZIKO, G. A. “Unpredictability and indeterminism in human behavior: Arguments and implications for educational research”. *Educational Researcher*, 1989, vol 18, num 3, p. 17-25.
- DAAMEN, W., HOOGENDOORN, S.P., BOVY, P.H.L. “First-order Pedestrian Traffic Flow Theory”. En: *Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington DC: National Academy Press, 2005. p. 1-14.
- DIJKSTRA, J., TIMMERMANS, H.J.P. “The application of conjoint measurement as a dynamic decision making tool in a virtual reality environment”. *International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures. 7*. [S.l.]: Junge, 1997. ISBN: 757-770.
- DIJKSTRA, J., TIMMERMANS, H.J.P. “Exploring the possibilities of conjoint measurement as a decisionmaking, tool for virtual wayfinding environments”. *International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures. 7*. [S.l.]: Junge, 1997. ISBN: 757-770.
- DIJKSTRA, J., TIMMERMANS, H.J.P. “Conjoint Analysis and Virtual Reality, a Review”, En: *Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning Conference. (4)*. Maastricht: Timmermans, H.J.P., 1998.

- DIJKSTRA, E. W., "A note on two problems in connection with graphs". *Numerische Mathematik*, 1959, vol 1, p.269–271.
- DOUGLAS, D.H. "Least-cost path in GIS using an accumulated cost surface and slopelines". *Cartographica*, 1994, vol 31, num 3, p. 37-51.
- EASTMAN, J.R., JIN, W., KYEM, P.A.K., TOLEDANO, J. "Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1995, vol 61, num 5, p. 539-547.
- ELANDS, B., VAN MARWIJK, R. "Expressing recreation quality through simulation models: useful management tool or wishful thinking?". *11th International Symposium on Society and Natural Resource Management. Forest and Nature Conservation Policy Group. visitor flows. Forest Snow and Landscape Research*, 2005, vol 81, num 1-2, p. 59-76.
- ERWIG, M., GUÉTING, R.H., SCHNEIDER, M., VAZIRGIANNIS, M. "Spatio-temporal data types: An approach to modeling and querying moving objects in databases," *GeoInformatica*, 1999, vol, p. 269-296.
- FORER, P. (1998) "Geometric Approaches to the Nexus of Time, Space and Microprocess: Implementing a Practical Model for Mundane Socio-Spatial Systems". En: M J Egenhofer and R G Golledge (ed). *Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems*. Oxford: Oxford University Press, 1998, p. 171-190.
- FOTHERINGHAM A.S., WEGENER M. "*Spatial models and GIS: New potential and new models*". London: Taylor & Francis, 2000. ISBN 0748408460, 9780748408467.
- FOTHERINGHAM, A.S., DENSHAM, P.J., CURTIS, A.: "The zone definition problem and locationallocation modelling". *Geographical Analysis*, 1995, vol. 27, p. 60-77.

- FRUTOS DE, P. "Determinantes de las visitas a los parques y jardines urbanos: aplicación de un modelo de gravedad". *Estudios de Economía Aplicada, Estudios de Economía Aplicada*, 2004 vol 22, p. 349-363.
- GALTON, A. "Dominance Diagrams: A tool for qualitative reasoning about continuous systems". *Fundamenta Informaticae*, 2001, vol 46, num 1-2, p. 55-70.
- GEERTS, F. "Moving Objects and their Equations of Motion". *Proceedings of the 1st International Symposium on Applications of Constraint Databases*. vol 3074. Springer, 2004. p. 41–52.
- GEURS K.T., VAN WEE B. "Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions". *Journal of Transport Geography*, 2004, vol 12, num 2, p. 127-140.
- GINEVIČIUS, R., PODVEZKO, V. "Some problems of evaluating multicriteria decision methods". *International Journal of Management and Decision Making*, 2007, vol 8 num 5, p. 527–539.
- GOLLEDGE, R., STIMSON, R. "*Spatial Behavior: A Geographic Perspective*". New York: the Guilford Press, 1997.
- GOODCHILD, M.F., KLINKENBERG, B., JANELLE, D.G. "A factorial model of aggregate spatio-temporal behavior: application to the diurnal cycle". *Geographical Analysis*, 1993, vol 25, num 4, p.277-294.
- GOODCHILD, M.F. "GIS and disaggregate transportation modelling". *Geographical Systems*, 1998, vol 5, num 1, p. 19-44.
- GUIMARÃES, J. "The object oriented model and its advantages". *SIGPLAN OOPS* 1995, vol 6, num 1 (), p. 40-49. Disponible en <http://doi.acm.org/10.1145/209866.209872>.

- GUTIÉRREZ PUEBLA, J., PINTO, C. GÓMEZ, G. “Accesibilidad peatonal a la red de metro de Madrid: efectos del Plan de Ampliación 1995-99”. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 2000, vol 25, p. 451-464. ISSN: 0211-9803
- GUTIÉRREZ PUEBLA, J., GARCÍA PALOMARES, J.C., ALVENTOSA, C., REDONDO, J.C., PANIAGUA, E. “Accesibilidad peatonal a la red sanitaria de asistencia primaria en Madrid”. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 2002, vol extraordinario, p. 269-280. ISSN: 0211-9803
- HÄGERSTRAND, T. “What about people in regional science?”. *Papers of the Regional Science Association*, 1970, vol 24, p. 7–21.
- HANDY S. L., NIEMEIER D. A. “Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives”. *Environment and Planning A*, 1997, vol 29, num 7, p.1175 – 1194.
- HANSEN, W. (1959): “How Accessibility Shapes Land Use”. *Journal of the American Institute of Planners*, 1959, vol, p. 73-76.
- HAYNES, K., FOTHERINGHAM, A.S. “*Gravity and spatial interaction models*”. Beverly Hills, CA: Sage, 1984.
- HELBING D., MOLNAR P., FARKAS I., BOLAY K.: “Self-organizing pedestrian movement”. *Environment and Planning B*, 2001, vol 28, p. 361-383.
- HENDERSON, L. F. “The statistics of crowd fluids”. *Nature*, 1971, vol 229 pp. 381-383.
- HENDERSON, L. F. “On the fluid mechanics of human crowd motion”. *Transportation Research*, 1974, vol 8, p. 509-515.
- HOOGENDOORN, S. P., BOVY, P., DAAMEN, W., (2001) “Microscopic Pedestrian Wayfinding and Dynamics Modelling”. En: M. Schreckenberg and S. D. Sharma (eds.) *Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Berlin: Springer, 2001. pp. 123-154.
- HOOGENDOORN, S.P. (2002): “Wayfinding under Uncertainty in Continuous Time and Space by Dynamic Programming”. En: *Mini-EURO conference – Handling*

- Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems*. 13. [S.l.]: [s.n.], 2002, p. 71-76.
- HOOGENDOORN, S.P. “Pedestrian flow modeling by adaptive control”. *Transportation Res. Rec.*, 2004, vol 1878, p. 5-103.
- HOOGENDOORN, S.P., BOVY, P. “Normative Pedestrian Behaviour Theory And Modelling”. *Proceedings of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. Adelaide, Australia, 2002. p. 219-245;
- HOOGENDOORN, S.P., BOVY, P. “Pedestrian route-choice and activity scheduling theory and models”. *Transportation Research Part B*, 2004, vol 38, p. 169–190.
- HOOGENDOORN, S.P., BOBY, P. “Pedestrian Travel Behavior Modeling”. *Networks and Spatial Economics*, 2005, p. 193–216;
- HOOGENDOORN, S.P., DAAMEN, P. “Self-organization in walker experiments”. En: *Proceedings Traffic and Granular Flow Conference*. [S.l.]: [s.n.], 2004.
- JANKOWSKI, P. “Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods”. En: *Classics from IJGIS: Twenty years of the International Journal of Geographical Information Science and Systems*. CRC Press, 2006. vol 9, num 3, p. 251-271. ISBN 0849370426, 9780849370427;
- KANEIWA, K., IWAZUME, M., FUKUDA, K. “An Upper Ontology for Event Classifications and Relations”. En *Proceedings of the Twentieth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*. [S.l.]: [s.n.], 2007. p. 394-403. LNCS 4830.
- KAVOURAS, M. “Understanding and Modelling Spatial Change”. En: Frank A.Raper J.and Cheylan J.P. (Eds.). *Life and Motion of Socio-Economic Units*. London: Taylor & Francis, 2001;
- KIRCHNER, A., AND SCHNEIDER, A. “Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics”. *Physica A*, 2002, vol 312, p. 260-276.

- KITAZAWA, K., BATTY, M. “Pedestrian Behaviour Modelling. An Application to Retail Movements using a Genetic Algorithm”. En: *Proceedings of the 7th International Conference on Design and Decision Support Systems*. Sint-Michielsgestel, 2004.
- KWAN, M.-P. , HONG, X.-D. “Network-based constraints-oriented choice set formation using GIS”. *Geographical Systems*, 1998, vol 5, p. 139-62.
- KWAN, M., WEBER, J. “Individual accessibility revisited: Implications for geographical analysis in the twenty-first Century”. *Geographical Analysis*, 2003, vol 35, num 4, p. 341-353.
- LANGRAN, G. *Time in Geographic Information Systems*. Londres: Taylor & Francis, 1993, 189 p. ISBN: 0-7484-0033-6.
- LIGTENBERG, A., VAN MARWIJK, R., MOELANS, B., KUIJPERS, B. “Recognizing patterns of movements in visitor flows in nature areas”. *Theoretical Computer Science*, 2008. Disponible en <http://hdl.handle.net/1942/8558>;
- LONGLEY, P., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J., RHIND, D.W. “*Geographical information systems and science*”. New York: John Wiley and Sons, 2005. ISBN 047087001X, 9780470870013;
- LÓPEZ SUÁREZ, E. “Assessment of transport infrastructure plans: A strategic approach integrating efficiency, cohesion and environmental aspects”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- MACEDO, J., VANGENOT, C., OTHMAN, W., PELEKIS, N., FRENTZOS, E., KUIJPERS, B., NTOUTSII, I., SPACCAPIETRA, S., THEODORIDIS, Y. “Trajectory data models”. En: Discovery, Fosca Giannotti, Dino Pedreschi (Eds). *Mobility, Data Mining and Privacy-Aware. Geographic Knowledge*. Springer, 2008. ISBN 978-3-540-75176-2;

- MALCZEWSKI, J. “*GIS and Multicriteria Decision Analysis*”. John Wiley and Sons, 1999. ISBN 0471329444, 9780471329442;
- MASSAM, B. H. “The Classification of Quality of Life Using Multi-criteria Analysis”. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1999, vol 3, num 2, p. 1-8.
- MILLER, H. J. “Modelling accessibility using space-time prism concepts within geographical information systems”. *International Journal of Geographical Systems*, 1991, vol 5, p. 287-301.
- MILLER, H. J. “Measuring space-time accessibility benefits within transportation networks: Basic theory and computational procedures”. *Geographical Analysis*, 1999, vol 31, p. 187-212;
- MILLER, H. J. “Activities in space and time”. En: P. Stopher, K. Button, K. Haynes and D. Hensher (eds.) *Handbook of Transportation Research 5: Transport Geography and Spatial Systems*. Lugar: Elsevier, 2004, p. 647-660.
- MONZÓN, A. “Los indicadores de accesibilidad y su papel decisor en las en inversiones en infraestructuras de transporte. Aplicaciones en la Comunidad de Madrid”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1988.
- MUHAMMAD, S. “Future urbanization patterns: in the Netherlands under the influence of information and communication technologies”. Tesis Doctoral. Utrecht University, 2007.
- NEUTENS, T., WITLOX, F., DEMAeyer, P. “Individual accessibility and travel possibilities: A literature review on time geography”. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2007 vol 7, num 4, p. 335-352.
- NISHINARI, K., KIRCHNER, A., NAMAZI, A., SCHADSCHNEIDER, A. (2004): “Simulations of evacuation by an Extended Floor Field CA Model”. En: Hoogendoorn h.P. et al. (ed). Berlin: Springer, 2005, vol E87, p. 726–732;

- NOYON, V., CLARAMUNT, C. AND DEVOGELE, T. "A relative representation of trajectories in geographical spaces". *GeoInformatica*, 2007, vol 11, p. 479-496.
- PEARCE, D., ATKINSON, G., MOURATO, S. "Cost-benefit analysis and the environment: recent developments". *Organisation for Economic Co-operation and Development*. France: OECD, 2006. ISBN 9264010041.
- PELLEGRINI, P.A., FOTHERINGHAM, A.S. "Modelling Spatial Choice: A Review and Synthesis in a Migration Context". *Progress in Human Geography*, 2002, vol 26, num 4, p. 487-510.
- PEUQUET, D. "It's About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems". *Annals of the Association of American Geographers*, 1994, vol 84, num 3, p. 441-461.
- PEUQUET, D. J., DUAN, N. "An event-based spatiotemporal data model (ESTDM) for temporal analysis of geographical data". *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995, vol 9, num 1, p. 7-24.
- PRED, A. "Social Reproduction and the Time-Geography of Everyday Life". *Geografisker Annaler*, 1981, vol 63B, p. 5-22.
- RAVESTEIN, E.G. "The laws of migration". *Journal of the Royal Statistical Society*, 1885, vol 48, p.167-235.
- ROCHA DA , L. V., EDELWEISS, N., IOCHPE, C. (2001): "Geoframe-t: A temporal conceptual framework for data modelling". En: *ACM Symposium on Advances in GIS*. Atlanta, 2001. p. 124-129.
- SCHELHORN, T., O'SULLIVAN, D., HAKLAY, M., THURSTAIN-GOODWIN, M. "STREETS: an agent-based pedestrian model". En: *Conference Computers in Urban Planning and Urban Management*, Venice: [s.n.], 1999.

- STEINER, A., PHILIPP, M., SCHMID, A. "Parameter Estimation for a Pedestrian Simulation Model". En: *Swiss Transport Research Conference (7)*. [S.l.]: [s.n.], 2007.
- TERLOUW, S. "Nature management in National Park Dwingelderveld". Tesis Doctoral. Wageningen University, 2008.
- THÉRIAULT, M., DES ROSIERS, F. "Modelling perceived accessibility to urban amenities using fuzzy logic, transportation GIS and origin-destination surveys". En: *AGILE Conference on Geographic Information Science (7)*. Heraklion: F. Toppen and P. Prastacos, 2004, p. 475-485;
- TIMMERMANS, H. J. P., VAN DER HEIJDE, TIMMERMANS, H. J. P., VAN DER HEIJDEN, R. E. C. M., WESTERVELD, H. "Decision-making between multi-attribute choice alternatives: a model of spatial shopping behaviour using conjoint measurements". *Environment and Planning A*, 1984, vol 16, pp. 377-387.
- TOMLIN, C. D. "Geographic Information Systems and Cartographic Modeling". New Jersey: Prentice Hall, 1990, p.249.
- TORRENS, P.M. "Geosimulation, automata, and traffic modeling". En: P. Stopher, K. Button, K. Haynes, D. Hensher (eds). *Handbooks in Transport 5: Transport Geography and Spatial Systems*. Londres: Pergamon/Elsevier Science, 2004. p. 549-565.
- UBOE, J. "Aggregation of Gravity Models for Journeys-to-work", *NHH working paper*, num 4, 2001. ISSN: 1500-4066;
- VAN MARWIJK, R., ELANDS, B.H.M. & LENGKEEK, J. "Experiencing nature: The recognition of the symbolic environment within research and management of visitor flows". *Forest Snow and Landscape Research*, 2007, vol 81, num 1-2, p. 59-76.

- WACHOWICZ, M. (1999): "Object-oriented design for temporal GIS". CRC Press.  
ISBN 0748408312, 9780748408313.
- WARNTZ, W. "Transportation, social physics and the Law of Refraction". *The Professional Geographer*, 1957, vol 9, p. 2–7.
- Warntz, W. "A Note on Surfaces and Paths and Applications to Geographical Problems".  
*MICMOG Discussion Paper No. 6*, 1965, University of Michigan.
- WORBOYS, M. F. "Event-oriented approaches to geographic phenomena". *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, vol 19, p. 1–28.
- YOON, K.P., HWANG, C., OAKS, T. "Multiple attribute decision making: an introduction". *Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences*. California: Sage, 1995. p. 73. ISBN 0-8039-5486-7.
- YUAN, M. (1996): "Temporal GIS and Spatio-Temporal Modeling", En: The 3rd Conference Integrating GIS and Environmental Modeling. Santa Fe, New Mexico: Goodchild M. (ed), 1996.
- ZHANG, R. "Hierarchies for event-based modeling of geographic phenomena". Tesis Doctoral. University of Maine, 2005.