

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE INFORMÁTICA**



TESIS DE GRADO

**“SIMULACIÓN DEL DESHIELO BASADO
EN AUTÓMATAS CELULARES”**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIATURA EN INFORMÁTICA
MENCION: INGENIERIA DE SISTEMAS INFORMÁTICOS

Postulante: **GARY REYNALDO BALLIVIÁN TICONA**

Docente Tutor: **Lic. EFRAIN SILVA SÁNCHEZ**

Docente Revisor: **Lic. CARMEN ROSA HUANCA QUISBERT**

**La Paz – Bolivia
2009**

Dedicatoria

*Este trabajo de investigación lo dedico
A mi Padre Reynaldo y
a mi Madre Constanca,
por la confianza que me tienen.*

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a mis padres, por el trabajo que ellos realizaron, para que sus hijos tengan las oportunidades que ellos no tuvieron, por la confianza que tienen en mi, para que siga adelante.

A mi familia más cercana, mis hermanos, primos y mis sobrinitos, a quienes trato de enseñar lo bueno del estudio y la vida.

Debo agradecer a la Universidad Mayor de San Andrés y la carrera de Informática por formarme profesionalmente para ser de ayuda a la sociedad y sentirme orgulloso de pertenecer a esta casa de estudio.

A mis compañeros que he conocido en los años de universidad, por haber aprendido de sus errores y sus éxitos y haber compartido con ellos experiencias que solo en la juventud se debieran realizar, para convertirse en una persona de bien.

Agradecer a los que lograron la realización de este trabajo de investigación, me refiero a mi tutor el Lic. Mario Loayza Molina por los consejos sabios que el ofrece y en especial a mi revisora la Lic. Carmen Rosa Huanca Quisbert quien tuvo mucha paciencia con mi persona e hizo observaciones útiles a este trabajo de investigación, permitiendo mejoras tras cada revisión.

Debo agradecer también al Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) de la UMSA y al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) que por medio del Ing. Javier Mendoza, Docente de la Facultad de Ingeniería Carrera de Ingeniería Civil, quien es la persona que me brindo la experiencia e información del glaciar de Chacaltaya, ya que dedica muchos años en estudiar este fenómeno natural del descongelamiento de los glaciares en Bolivia.

Gary Ballivian.

RESÚMEN

El efecto invernadero producido por la contaminación del medio ambiente, gracias al descuido del hombre que es el principal culpable junto con los países industrializados, las consecuencias de este fenómeno es el calentamiento global que está derritiendo los glaciares del Ártico a gran velocidad y en el futuro habrá en escasez de agua en el mundo.

Se ha visto que Bolivia no está lejos de este problema ya que se están descongelando tres glaciares, Chacaltaya, Zongo y Tunjani Condoriri, los encargados de estudiar este fenómeno es el IRD (Instituto de Investigación para el Desarrollo, el cual es una cooperación Francesa para estudiar los Glaciares Tropicales Andinos en Sud América), a través del IHH (Instituto de Hidráulica e Hidrología) de la UMSA y el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) de depende del Ministerio de Aguas.

Gracias a estas instituciones se puede contar con bastante información cronológica para estudiar este fenómeno, proponiendo nuevos modelos de investigación, como en nuestro caso es la "Simulación del Deshielo Basado en Autómatas Celulares", para poder mostrar de una manera visual, en que año de proyección se tendría la desaparición completa del Glaciar de Chacaltaya y mostrar el retroceso de la mancha de hielo, gracias a la herramienta matemática de los Autómatas Celulares.

Los principales factores que influyen a este fenómeno del retroceso de la mancha de hielo son: los factores topográficos (altura, pendiente, etc.) que ayudan a la distribución de la nieve, los factores climatológicos (precipitación, temperatura, radiación solar, etc.) estos pueden hacer que aumente o disminuya la mancha de hielo en el glaciar.

Para realizar las pruebas respectivas de nuestro modelo ACN2D, se tiene que construir un software (prototipo), las cuales se construyen con una metodología RAD, con las fases respectivas, que garantizan la eficiencia y objetivos del modelo, la construcción del prototipo se hizo con un lenguaje de programación de alto nivel Visual Basic.

CONTENIDO GENERAL

Índice	Página
Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen	iii
Contenido General	iv
Índice Figuras	viii
Índice Tablas	viii

Índice	Página
--------	--------

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	5
1.3	Planteamiento de la Investigación	7
	1.3.1 Planteamiento del Problema	7
	1.3.2 Formulación del Problema	8
1.4	Objetivos	8
	1.4.1 Objetivo General	8
	1.4.2 Objetivos Específicos	9
1.5	Hipótesis	9
1.6	Justificaciones	9
	1.6.1 Justificación Teórica	9
	1.6.2 Justificación Metodológica	10
	1.6.3 Justificación Económica	10
	1.6.4 Justificación Social	10
1.7	Alcances y Aportes	11
	1.7.1 Alcances	11
	1.7.2 Aportes	11
1.8	Metodologías y Técnicas	12

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1	Autómatas Celulares	13
	2.1.1 Historia	14
	2.1.2 Los Primeros Autómatas Celulares	16

2.1.3	Autómatas Celulares e Inteligencia Artificial	17
2.1.4	¿Qué es un Automata Celular?	18
2.1.5	Definición Formal de un Automata Celular	18
2.1.6	Propiedades de un Automata Celular	20
2.1.6.1	Conjunto de Entes	20
2.1.6.2	Retícula o látice	20
i.	Bordes Absorbentes	21
ii.	Bordes Periódicos	21
2.1.6.3	Vecindades	21
i.	Vecindad de Von Neumann	22
ii.	Vecindad de Moore	22
iii.	Vecindad de Moore extendido	23
iv.	Vecindad de Margolus	23
v.	Vecindad de Sandy	23
2.1.6.4	Conjunto de estados	23
2.1.6.5	Reglas de Transición	23
i.	Legales	24
ii.	Totalísticas	24
iii.	Elementales	24
2.1.7	Autómatas Celulares Uni-Dimensionales	24
2.1.8	Autómatas Celulares Bi-Dimensionales	25
2.1.9	Autómatas Celulares Tri-Dimensionales	26
2.1.10	Autómatas Celulares Estocásticos	26
2.2	Sistema de Información Geográfico (SIG)	27
2.2.1	Historia	27
2.2.2	Definición	28
2.2.3	Elementos de los SIG	29
2.2.3.1	Software	29
2.2.3.2	Hardware	29
2.2.3.3	Datos	30
2.2.3.4	Usuario	30
2.2.4	Funciones de los SIG	30
2.2.4.1	Entrada de Información	30
2.2.4.2	Manipulación	31
2.2.4.3	Gerencia	31
2.2.4.4	Consulta y Análisis	31
2.2.4.5	Salida de Datos	31
2.2.5	Modelado de Datos	31
2.2.5.1	Modelo Vectorial	32
2.2.5.2	Modelo Ráster	32
2.2.6	Modelo de Datos de Elevación (MDE)	33
2.2.7	Modelo Digital del Terreno (MDT)	34
2.2.8	Interpolación	35
2.3	El Glaciar	36
2.3.1	Glaciar	36
2.3.2	Cuenca	36
2.3.3	Partes de un Glaciar	36
2.3.3.1	Zona de acumulación	37
2.3.3.2	Zona de ablación	37
2.3.3.3	Línea de equilibrio de altitud	37
2.3.3.4	Grietas	37

	2.3.3.5 Morrenas	39
2.3.4	Características de los Glaciares	39
2.3.5	Tipos de Glaciares	39
	2.3.5.1 Glaciares de Montaña	40
	2.3.5.2 Glaciares Continentales	40
	2.3.5.3 Glaciares Intermedios	40
2.3.6	Clima	40
2.3.7	Efecto Invernadero	41
2.3.8	Cambios Climáticos	41
2.3.9	Deshielo	42
2.3.10	Factores Climatológicos y de Terreno de Influencia	42
	2.3.10.1 Radiación Solar	43
	2.3.10.2 Precipitación	43
	2.3.10.3 Temperatura	43
	2.3.10.4 Viento	44
	2.3.10.5 Escurrimiento	44
	2.3.10.6 Fenómeno ENSO	44
	2.3.10.7 Topografía	46
2.4	Presentación del Área de Estudio	47
	2.4.1 Ubicación	47
	2.4.2 Límites y Superficie	48
	2.4.3 Acceso	48
	2.4.4 Altitud	49
	2.4.5 Clima	49
	2.4.6 Geología	49
	2.4.7 Hidrografía	50
	2.4.8 Geomorfología	51
2.5	Metodología para el desarrollo del Prototipo	54
	2.5.1 Metodología Orientada a Objetos	54
	2.5.2 Lenguaje de Modelado Unificado (UML)	55
	2.5.3 El Modelo en Cascada	57
	2.5.4 Modelos de Simulación	58
	2.5.5 Sistema	59
	2.5.5.1 Sistemas Dinámicos	59
	2.5.5.2 Sistemas Complejos	60
	2.5.6 Modelo	60
	2.5.7 Simulación	62

CAPÍTULO 3 CONSTRUCCIÓN Y FORMALIZACIÓN DEL AUTÓMATA CELULAR ACN2D

3.1	Introducción	63
3.2	Descripción Informal del Modelo	64
	3.2.1 Componentes	64
	3.2.2 Variables	64
3.3	Construcción del Autómata Celular	66
	3.3.1 Retícula (L)	66
	3.3.1.1 Determinación de la Dimensión	67

3.3.1.2	Determinación del Borde	67
3.3.2	Conjunto de Estados (S)	69
3.3.3	Tipo de Vecindad (N)	70
3.3.4	Conjunto de Reglas (f)	70
3.3.5	Asignación de Pesos de Probabilidad	75

CAPÍTULO 4 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

4.1	Introducción	77
4.2	Requerimientos	78
4.3	Análisis	78
4.3.1	Diagrama de Casos de Uso	79
4.3.2	Descripción de Actores	79
4.3.3	Descripción de los Casos de Uso	80
4.3.4	Modelado de Objetos	82
4.3.5	Diagrama de Secuencias	84
4.4	Diseño	88
4.4.1	Diagrama de Colaboración	88
4.4.2	Diagrama de Estado	88
4.5	Construcción	90
4.6	Pruebas	91

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	Conclusiones	102
5.1.1	Estado de la Hipótesis	102
5.1.2	Estado de lo Objetivos Específicos	103
5.2	Recomendaciones	104

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Página
1.1. Variación de la Temperatura Global	2
1.2. Ubicación de los Glaciares Monitoreados por el (IRD)	4
2.1. Representación de las Retículas	21
2.2. Detalle de Vecindades y Extensiones de las mismas	22
2.3. Modelo Orientado a Capas de un SIG	28
2.4. Elementos de un SIG	29
2.5. Representación Vectorial y Ráster de un mundo real	32
2.6. Partes de un Glaciar – Corte Esquemático de un Glaciar de Montaña	38
2.7. Ubicación del Glaciar en Estudio	52
2.8. Interacción entre los modelos de una Simulación	58
3.1. Estructura del Modelo Mediante el AC	65
3.2. Abstracción de la Imagen Digital	68
3.3. Conjunto de Estados para ACN2D	70
3.4. Configuraciones Posibles de las Vecindades	71
3.5. Influencia sobre la célula central	72
3.6. Estado de la celdas	73
4.1. Diagrama de Casos de Uso	79
4.2. Diagrama de Clases	83
4.3. Diagrama de Secuencias Ingreso de año Proyección	84
4.4. Diagrama de Secuencias Ingreso de Temperatura	85
4.5. Diagrama de Secuencias Ingreso de Precipitación	85
4.6. Diagrama de Secuencias de la simulación	86
4.7. Diagrama de Secuencias del Calibrado	87
4.8. Diagrama de Secuencias del Reporte	87
4.9. Diagrama de Colaboración del Prototipo	88
4.10. Diagrama de Estados del Prototipo	89
4.11. Interfase del Prototipo	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Página
2.1. Unidades Estratigráficas Presentes	50
3.1. Variables de cada Componente	66
3.2. Precipitación promedio por año	74
3.3. Superficie y Volumen por año	74
4.1. Descripción del Actor	78
4.2. Descripción de Casos de Uso	79
4.3. Descripción de Modelo de Objetos	82

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN



*El secreto del éxito en la vida de un hombre
está en prepararse para aprovechar
la ocasión cuando se presente.*

Disrael

1.1 INTRODUCCIÓN

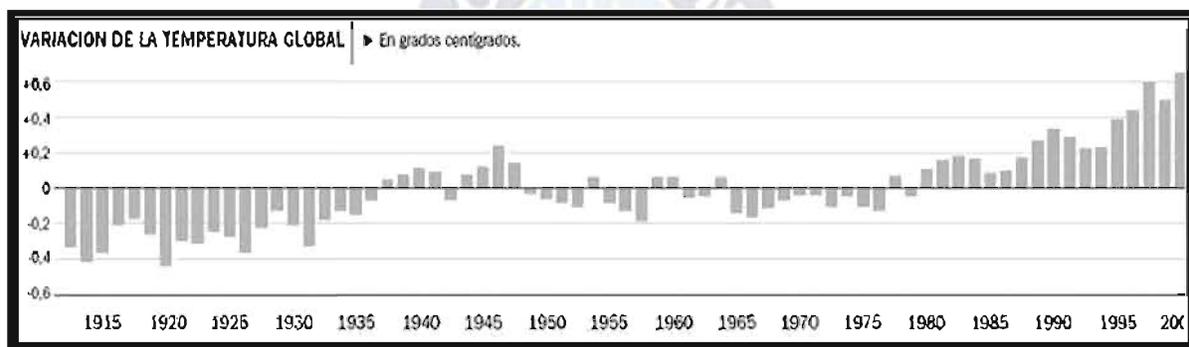
El clima siempre ha variado, el problema del cambio climático es que en el último siglo el ritmo de estas variaciones se ha acelerado de manera anómala, a tal grado que afecta ya la vida planetaria. Al buscar la causa de esta aceleración, algunos científicos encontraron que existe una relación directa entre el calentamiento global o cambio climático y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, provocado principalmente por las sociedades industrializadas (Figura 1.1).

Nuestro planeta se está calentando, eso es una realidad. Los últimos diez años han sido los más calurosos desde que se llevan registros, y los científicos han anunciado que en el futuro serán todavía más cálidos. Y, entonces, los seres humanos somos los principales

culpables: ejercemos un impacto directo sobre el proceso de calentamiento, popularmente conocido como el "efecto invernadero".

El clima ártico es un claro ejemplo de lo que esta pasando en el planeta, este se está calentando rápidamente y los expertos están, anunciando cambios mucho más grandes, las temperaturas del Ártico están elevándose casi el doble del promedio global y podrían subir entre 4 y 7 grados Celsius para el 2100.

Figura 1.1. Variación de la Temperatura Global



Fuente: [Climate Change 2001: The Scientific Basis, Technical Summary].

El calentamiento global derretirá la mayor parte de los glaciares en el mundo, y los glaciares que están distribuidos por los Andes no están excluidos de este problema mundial, con lo cual afectará a millones de personas que dependen de estos glaciares para el consumo de agua potable, agricultura y generación de energía.

El Instituto de Investigación para el desarrollo (IRD) por sus siglas en Francés, desarrolló un programa denominada "**Great Ice**", que tiene por objetivo estudiar el fenómeno del retroceso de los Glaciares Tropicales Andinos, donde están incluidos los países de Perú, Ecuador y Bolivia. En Bolivia se están monitoreando los Glaciares de Tuni Condoriri, Zongo y Chacaltaya. (Figura. 1.2).

El Chacaltaya que significa "Camino frío" en aymara, se encuentra en La Paz – Bolivia, es un glaciar alpino que está a más de 5.260 metros sobre el nivel de mar, pero ahora el Chacaltaya ya no tiene el denominativo de glaciar por la pérdida que sufrió en su superficie de 49 pies de espesor que tenía en 1998 a 10 pies que es lo que tiene ahora.

De acuerdo con los estudios que se realizaron en el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) conjuntamente con el Instituto de Hidráulica e Hidrología de la U.M.S.A. (IHH) apoyado por el Instituto de Investigación para el desarrollo (IRD), pronosticaron que en el Glaciar de Chacaltaya se producirá el deshielo total de la montaña dentro de siete u ocho años más.

Más de un millón de personas del departamento de La Paz dependen del deshielo de los nevados y del nacimiento de los glaciares para captar agua de consumo e indirectamente para servicios de energía. Hasta ahora el 35 por ciento del agua de consumo proviene del deshielo de glaciares y 40 por ciento de la generación de energía según el Programa Nacional de Cambios Climáticos, programa impulsado por el Gobierno Nacional.

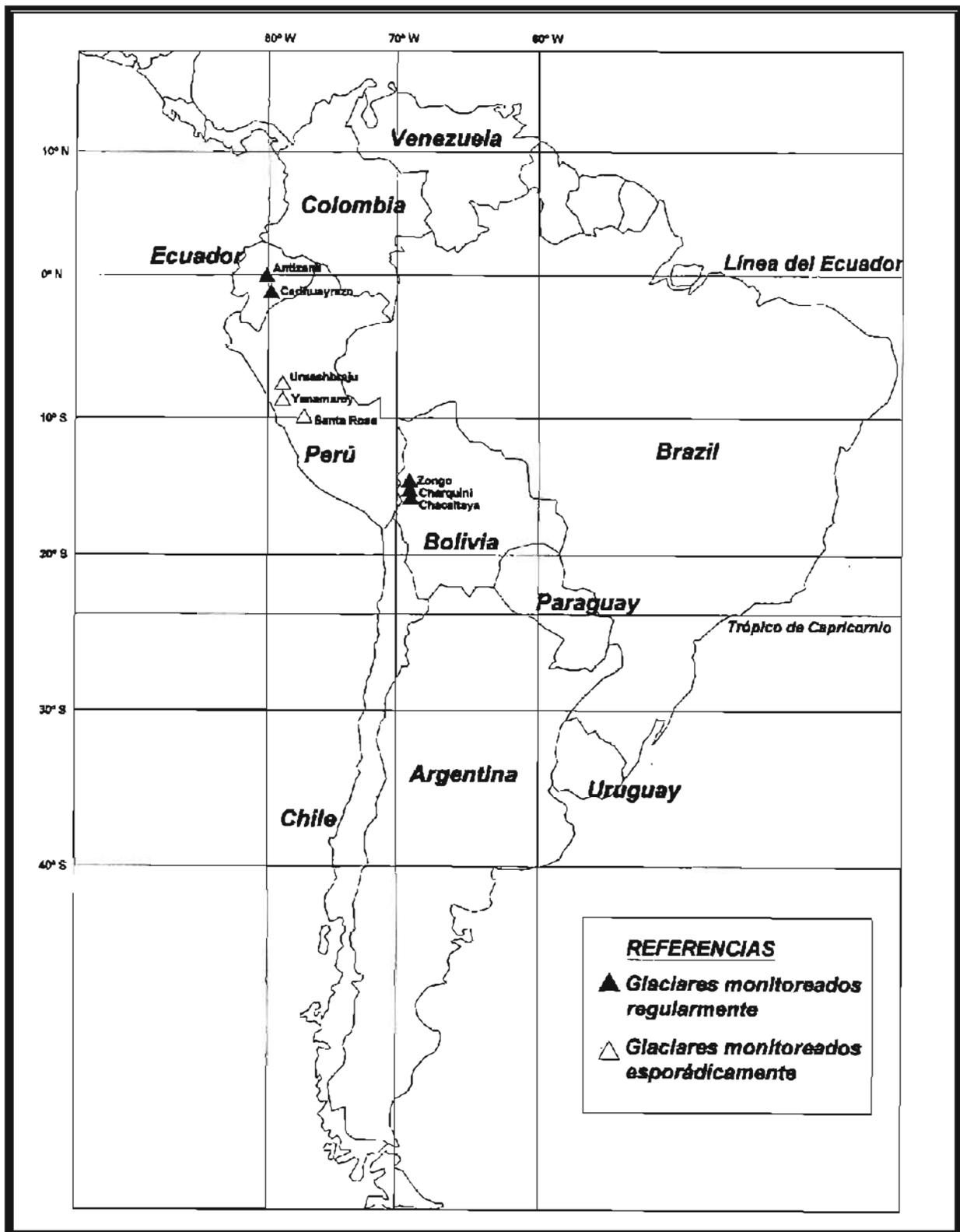
Se espera que la necesidad de agua para la población en La Paz se incremente al doble para el año 2050.

El objetivo del presente trabajo es poder simular el avance del deshielo del entonces glaciar de Chacaltaya a mediano y largo plazo, utilizando para este fin la teoría de autómatas celulares (AC) como herramienta de modelación de la simulación del deshielo. Bajo este enfoque el espacio del nevado es abstraído en celdas, las cuales pueden estar vacías u ocupadas por distintos tipos de variables (temperatura, precipitación, etc.). La simulación genera una base de conocimientos que apoya la toma de decisiones que las autoridades competentes deban asumir para evitar un deshielo, a corto plazo del glaciar de Chacaltaya.

1.2 ANTECEDENTES

En lo que se refiere a estudios realizados con el deshielo en nuestro medio son escasos y los pocos que se conocen son más bien planteamientos de tipo teórico, uno de estos estudios es: La investigación: ***“Bolivia Pierde Glaciares con el Calentamiento”*** realizado por Mónica Machicao y Eduardo García el 19 de Junio de 2007 para Reuters. Trabajo que hace un análisis sobre las causas y las consecuencias que tiene el calentamiento global sobre el glaciar de Chacaltaya.

Figura 1.2. Ubicación de los Glaciares Monitoreados por el (IRD)



Fuente: [Instituto de Investigaciones para el Desarrollo (IRD), 2003].

Otra investigación importante, que fue acreedora de un premio de reportaje sobre la biodiversidad de Mata Atlántica 2007, titulado: **“Deshielo Exceso y Escasez de Agua en La Paz”** por Miriam Telma Jemio en mayo del 2007. Este trabajo hace referencia sobre las consecuencias del efecto invernadero y como los heleros sostienen entre el 30 y 40 por ciento de la población, con agua en exceso, pero dentro de tres décadas se estima la desaparición de los reservorios helados de la montaña, con consecuencias de escasez de agua.

En lo que se refiere a Tesis y Proyectos de Grado sobre el estudio del retroceso de los Glaciares Tropicales Andinos podemos mencionar los siguientes:

- ❖ Tesis de la carrera de Geografía de la Facultad de Ciencias Geológicas con el título **“EL GLACIAR DE CHACALTAYA: ESTUDIO DEL BALANCE GLACIOLÓGICO CONTRIBUCIÓN AL ANÁLISIS DEL RETROCESO DE UN GLACIAR TROPICAL”** realizado por Ramiro Luís Cartagena Chávez en 1998. Trabajo que plantea las causas principales para que este glaciar se deshiele y la cantidad de volumen que se pierde en un determinado intervalo de años, 1991 a 1997., con el modelo Balance de Masas.
- ❖ Tesis de la carrera de Geología de la Facultad de Ciencias Geológicas para el IRD con el título de **“EL GLACIAR DE ZONGO (CORDILLERA REAL): INVESTIGACIONES GLACIOLÓGICAS: AÑOS HIDROLÓGICOS 2000 al 2002”** realizado por Alvaro Wladimir Soruco Sologuén en 2003. Trabajo que muestra el retroceso del Glaciar de Zongo mediante datos de volumen y superficie, por medio del modelo de Balance de Masas.
- ❖ Proyecto de Grado de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería para el IHH – IRD, con el título **“ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE UN GLACIAR TROPICAL EN PROCESO DE RETROCESO ACELERADO - CHACALTAYA”** realizada por Iby Fabiola Valle Aranibar en 2002. Trabajo que plantea las variables que influyen al retroceso del glaciar y el análisis del Balance de Masas en un intervalo de tiempo 1991 al 2001, donde además se informa sobre la superficie y el volumen que se pierde.

Existen diversos estudios sobre Autómatas Celulares (AC), los cuales contribuyen como referencia para la elaboración del presente trabajo. Entre estos trabajos se pueden mencionar tesis presentadas a la carrera de Informática de la Universidad Mayor de San Andrés.

Algunas de estas tesis son las siguientes:

- ❖ Tesis de la carrera de Informática con el título ***“ENCRIPCIÓN DE IMÁGENES DIGITALES A COLOR BASADA EN AUTÓMATA CELULAR REVERSIBLE BIDIMENSIONAL”*** realizada por Samuel Cabero Leniz en 1998. Trabajo que plantea una teoría de encriptación de imágenes utilizando definiciones de grafos y autómatas celulares bidimensionales.
- ❖ Tesis de la carrera de Informática con el título ***“AUTÓMATA CELULAR PARA LA COMPRESION DE ARREGLOS BOOLEANOS”*** realizada por Juan Carlos Luna Lira en el año 2000. Este trabajo plantea un algoritmo capaz de comprimir y descomprimir información almacenada en una matriz booleana.
- ❖ Tesis de la carrera de Informática con el título ***“PROPAGACIÓN DE ENFERMEDADES DE DIFUSION RESPIRATORIA PRONOSTICADO CON AUTÓMATAS CELULARES”*** realizada por Marcelo Alonzo Calla Valeriano en el 2001. Plantea un modelo para simular el contagio de enfermedades de tipo respiratorio en una población utilizando autómatas celulares.
- ❖ Tesis de la carrera de Informática con el título ***“MODELO DE DINÁMICA URBANA BASADO EN AUTÓMATAS CELULARES”*** realizado por Gerardo Alex Claire Torrez en el año 2002. Este Trabajo plantea una simulación del crecimiento de la mancha urbana en la ciudad del Alto a mediano y largo plazo.
- ❖ Tesis de la carrera de Informática con el título ***“SIMULACIÓN DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN BOLIVIA UTILIZANDO AUTÓMATAS CELULARES”*** realizado por: Juan Pablo Cruz Ulloa.

- ❖ Tesis de la carrera de Ingeniería de Sistemas en la EMI con el título **“SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO URBANO EN UN EJE PREFERENCIAL DE LA CIUDAD DE LA PAZ”** realizado por: Milenka Lineth Argote Cusi.

A nivel mundial se tiene referencia por Internet de trabajos de autómatas celulares desarrollados por Couclelis (1985), Batty y Longley (1987), Itami (1988), Cecchini y Viola (1989), Batty (1991) y Engelen y White (1993 y 1994), Sichirollo (1996).

1.3 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Planteamiento Del Problema

El deshielo del glaciar de Chacaltaya, a causa del calentamiento global y el efecto invernadero producirán un efecto negativo a la ciudad del Alto y las laderas, porque estos lugares se benefician del agua que baja de esté glaciar.

Ahora los habitantes de estos lugares tienen un exceso de agua, lavan sus pertenencias en los ríos, lavan arena, juegan con esta agua limpia y libre, pero si continúa el descongelamiento del glaciar de Chacaltaya, habrá una escasez de agua, se llegará a un estado de *exceso a escasez*.

Con los estudios que se realizaron por los expertos en el área de Hidrología, sobre el glaciar de Chacaltaya, se tiene previsto que dentro de siete u ocho años se producirá el deshielo total de la montaña.

Aproximadamente un millón de personas del departamento de La Paz dependen del deshielo de las montañas y del nacimiento de los glaciares para captar agua de consumo e indirectamente para servicios de energía. Hasta ahora el 35 por ciento del agua de consumo proviene del deshielo de glaciares y 40 por ciento de la generación de energía según el Programa Nacional de Cambios Climáticos, programa impulsado por el Gobierno Nacional.

Además se espera que la necesidad de agua para la población del Departamento de La Paz se duplique para el año 2050.

1.3.2 Formulación Del Problema

De todo lo anterior expuesto identificamos el siguiente problema principal:

Frente al inminente descongelamiento de las montaña nevadas de Bolivia, y especialmente del glaciar de estudio que es Chacaltaya.

¿Será posible utilizar herramientas de inteligencia artificial como son los Autómatas Celulares para realizar una predicción sobre el retroceso de la mancha de hielo en un futuro, a mediano y largo plazo permitiendo de esta manera una visualización de este fenómeno?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar el Modelo de Simulación del Deshielo Basado en Autómatas Celulares que permita simular y visualizar la reducción de la mancha de hielo en el glaciar de Chacaltaya para el futuro.

1.4.2 Objetivos Específicos

- ❖ Plantear un modelo analítico basado en autómatas celulares para el estudio del deshielo en las montañas.
- ❖ Establecer un modelo de simulación del deshielo en el glaciar de Chacaltaya.

- ❖ Implementar un prototipo para la Simulación del Deshielo del nevado de Chacaltaya.
- ❖ Establecer reglas de evolución para el autómata celular que reflejen el comportamiento del deshielo.

1.5 HIPOTESIS

“El Modelo de Simulación del Deshielo Basado en Autómatas Celulares podrá realizar la predicción sobre el deshielo del glaciar de Chacaltaya utilizando como herramienta un Autómata Celular Bi-Dimensional”.

1.6 JUSTIFICACIONES

1.6.1 Justificación Teórica

El presente trabajo representa el estudio de un área relativamente nueva en nuestro medio, pretendiendo obtener de este estudio un conjunto de técnicas, procedimientos y metodologías aplicables a nuestro entorno.

Se procura ser base de otros trabajos relacionados con el área, abrir una brecha para el desarrollo de nuevos conocimientos y herramientas que exploten los Autómatas Celulares, debido a la necesidad que existe, de poder aplicar la inteligencia artificial en cualquier ámbito de la sociedad.

1.6.2 Justificación Metodológica

La tecnología tiene un acelerado crecimiento en lo que se refiere al Hardware y Software, esto conlleva grandes facilidades de procesar cantidades inmensas de información y lograr cálculos que no se lograrían de manera manual. Esta ventaja

origina la utilización de la simulación por computadora para representar el comportamiento de sistemas complejos como ser la simulación del deshielo.

1.6.3 Justificación Económica

La simulación nos permite realizar experimentos utilizando la computadora como herramienta y ahorrando de esta manera recursos y tiempo tomando en cuenta el costo horas hombre. Realizar la simulación del deshielo del glaciar de Chacaltaya sin la ayuda de un ordenador involucraría la construcción de maquetas que represente la reducción de la mancha del nevado en función del tiempo, esto representaría un gasto económico significativo, por lo que el uso de una computadora para realizar las simulaciones del modelo se justifica.

1.6.3 Justificación Social

La utilidad en este sentido es significativamente importante, puesto que con este modelo basado en Autómatas Celulares se podrá realizar la predicción sobre el deshielo del glaciar de Chacaltaya y las consecuencias de este efecto que tendrán sobre los seres que se benefician de estos deshielos, digamos que en seis a ocho años en el futuro, habrá una escasez de agua y es importante que la autoridades competentes tomen decisiones y políticas para el futuro.

1.7 ALCANCES Y APORTES

1.7.1 Alcances

Este trabajo pretende establecer un modelo basado en autómatas celulares el cual realice la predicción de la reducción de la mancha del deshielo del glaciar de Chacaltaya para un año horizonte en función a las variables que afectan al modelo, para esto se utilizará varias imágenes digitales del terreno de la montaña.

Este trabajo no pretende alcanzar una simulación de todos los glaciares que se encuentran en Bolivia, ni una simulación de otro tipo de deshielo.

1.7.2 Aportes

La ciencia en su acepción más genérica, equivale a toda clase de saber. Sin embargo históricamente, la ciencia vino a significar, de modo más preciso, un conjunto de conocimientos sistematizados sobre una materia¹.

A continuación se menciona los aportes que se conseguirán con el desarrollo de la tesis:

- ❖ Un estudio sistemático sobre el deshielo del Glaciar de Chacaltaya y sus factores más determinantes.
- ❖ Construcción de un prototipo de simulación del deshielo del Glaciar de Chacaltaya, basado en Autómatas Celulares, como instrumento de apoyo para otros glaciares.
- ❖ El utilizar los Autómatas Celulares como herramienta de simulación, demuestra su capacidad y potencialidad, que puede ser utilizada para el estudio de otros sistemas, por ejemplo: sistemas económicos, sistemas políticos, etc.

1.8 METODOLOGÍAS Y TÉCNICAS

El desarrollo de la Tesis de Grado sigue el Método Científico, el cual permite recorrer el camino de la investigación de manera razonable y productiva de forma que se alcancen los objetivos planteados.

Se utilizará el método deductivo para el análisis del prototipo “*Simulación del Deshielo Basado en Autómatas Celulares*”, de esta manera se identifican las variables relevantes para el desarrollo del prototipo. Al mismo tiempo el método inductivo se aplica para determinar el comportamiento de toda la simulación, que emerge como resultado de la aplicación de Autómatas Celulares para la simulación del mismo.

¹ *Yañes Fernando, 2000* [YAÑ00]

❖ Técnicas de Ingeniería de Software como ser:

- a) Recopilación de información de personas expertas en el área de las SIG (Sistema de Información Geográfica), Ingeniería Civil en el área Hidrología, Geólogos expertos en glaciares, y Ingeniería Geográfica expertos en la topografía de la montaña en estudio, mediante encuestas y entrevistas directas.
- b) Recopilación de información y bibliografía acerca de los Autómatas Celulares, su construcción y sus aplicaciones.

Para la construcción del Prototipo se utilizará la metodología Desarrollo Rápido de Aplicaciones (RAD), con lo cual se podrán seguir las Actividades del Marco de Trabajo de manera ordenada.

Las herramientas que se utilizarán serán:

- ❖ Implementación de un prototipo utilizando un lenguaje de programación de alto nivel como es Visual Basic 6.0, que demuestre de manera clara la eficiencia y/o eficacia de la simulación.
- ❖ Para el análisis y diseño se utilizara la herramienta del Lenguaje de Modelado Unificado (UML).
- ❖ El Lenguaje de Modelado Unificado será construido con la Herramienta CASE: *Rational Rose, Rouse Enterprise Edition, version: 2006.06.00.*

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO



*Un hombre digno de ser llamado tal,
ama a su trabajo sobre todas las cosas del mundo,
e incluso más que a la mujer que ama.*
André Maurois

2.1 AUTÓMATAS CELULARES

El modelamiento en la mayoría de sistemas físicos, eléctricos y mecánicos, está basado en métodos y expresiones matemáticas, las cuales representan teóricamente el comportamiento de dichos sistemas. Generalmente, para modelar sistemas de naturaleza continua, son utilizadas las ecuaciones diferenciales, las integrales funcionales y variables de estado entre otras. Algunos procedimientos de discretización y digitalización de sistemas, permiten realizar análisis numéricos sobre métodos aproximados.

Una técnica matemática compleja utilizada para modelar algunos sistemas físicos y mecánicos es el modelo de los Elementos Finitos (FEM), cuya finalidad es discretizar espacios de naturaleza continua, sobre los cuales es posible realizar análisis numéricos para comprender, por medio de un modelo discreto, el comportamiento de sistemas analógicos. No obstante, la complejidad de aplicar FEM sobre algunos sistemas es tal,

que resulta difícil lograr modelos que describan con precisión sus comportamientos. FEM es de amplia utilización en análisis de espacios físico – mecánicos donde el objetivo sea comprender la resistencia de materiales, la dinámica de partículas y en general el comportamiento y la interacción de los elementos base del sistema en el espacio; pero quedan aún muchos complejos y de diversa naturaleza en lo cuales no es convencional aplicar esta técnica, por ejemplo, sistemas químicos, biológicos, evolutivos, genéticos, eléctricos, computacionales e inclusive otros físicos y mecánicos. Para el modelamiento de este tipo de sistemas quedan aún tres opciones: Lograr un modelo de naturaleza continua (en aquellos sistemas analógicos), en el cual se requiere expresiones de funciones continuas; utilizar métodos aproximativos (sin embargo, se tienen problemas de digitalización del modelo) o modelar con un **“Autómata Celular” (AC)**.

Los AC son estructuras ideales para construir modelos digitales que se aproximen al comportamiento de algunos sistemas complejos de naturaleza continua, sin pasar por modelos analógicos. Es posible, por ejemplo lograr sencillos modelos digitales que representen con suma fidelidad algunas leyes de la física.

Un AC es una herramienta computacional que hace parte de la *Inteligencia Artificial* basada en modelos biológicos, el cual esta básicamente compuesto por una estructura estática de datos y un conjunto finito de reglas que son aplicadas a cada nodo o elemento de la estructura. El interés que ha despertado esta técnica radica en la sencillez y simplicidad que caracteriza la construcción de los modelos; además, en la particularidad de los patrones de comportamiento presentados por el *Autómata* en tiempo de ejecución. [GON99].

2.1.1 Historia

En la medida que el hombre, apoyando en el recurso tecnológico, comprende mejor el mundo que le rodea, ha visto que su conocimiento profundiza cuando los comportamientos de cualquier sistema se da en términos de la interacción de sus partes o subsistemas. Los sistemas naturales, físicos, biológicos, ecológicos y sociales; en donde la relación entre sus componentes es sencilla pero en su

conjunto generan un patrón de comportamiento global o complejo, se les denomina sistemas complejos.

El interés por el estudio de los sistemas complejos se vio fortalecido después de la segunda guerra mundial gracias a dos causas. La primera corresponde al desarrollo de la microelectrónica y por ende de la misma tecnología de computación. La segunda, de índole teórico, corresponde a una serie de modelos y fundamentos teóricos que han permitido elaborar estudios y desarrollar investigación profunda en lo denominado actualmente como sistemas complejos. En particular, los trabajos teóricos de gente como Alonzo Church, Emil L. Post y Alain M. Turing, entre otros, fueron los que establecieron los fundamentos teóricos para el estudio de un cierto tipo de sistemas complejos denominados ***Autómatas Celulares (AC)***.

El inicio en el estudio de los AC se debe a Jhon Von Neumann en los años 50. influenciado por los trabajos de Turing y Post que se presentaron de manera independiente en los años 30 a cerca de los procesos computables y autómatas; y el trabajo de Warren S. McCulloch y Walter Pitts sobre el funcionamiento del sistema nervioso a principio de los años 40. El gran interés que despertó estas ideas en Von Neumann lo llevo a investigar sobre la complejidad requerida para que un dispositivo pudiera auto reproducirse y la organización de éste para tener un funcionamiento correcto al repararse con partes que pudieran tener un mal funcionamiento. Los resultados no se dejaron esperar, toda una corriente de investigación se ha desarrollado con una fuerte interrelación en campos como fractales y sistemas dinámicos, así como aplicaciones en: computación en paralelo, simulación de sistemas dinámicos y reconocimiento de patrones.

Los AC, según el enfoque de los investigadores, han sido estudiados bajo una gran variedad de nombres: “espacios celulares”, “estructuras celulares”, “estructuras homogéneas”, “estructuras de mosaico”, “autómatas de mosaico” ó “arreglos iterativos”.

Los diferentes puntos de vista han vigorizado el estudio de los AC, y su historia, aunque muy reciente en comparación con otras áreas, ya han presentado una

alternativa entre fuertes momentos de interés y periodos de latencia, que otras áreas de investigación han presentado. Nosotros podemos identificar varias etapas históricas: el origen, con el “*El Juego de la Vida*” de Jonh Conway, y el de **Autómatas Celulares Lineales (ACL)**. [JIM99].

2.1.2 Los Primeros Autómatas Celulares

Los estudios sobre autómatas finitos, *Maquinas de Turing*, y otros modelos que sigan la misma filosofía configuran lo que se ha denominado *Teoría de Autómatas y Maquinas de Turing*, o simplemente *Teoría de la Computación*.

En la década de los años 50, dos neurofisiólogos, Warren S. McCulloch y Walter Pitts diseñaron un modelo matemático para representar el funcionamiento de las células cerebrales que fue el origen de lo que hoy se conoce por *Redes Neuronales*. El modelo era una aproximación muy sencilla al comportamiento real de las neuronas, pero tenía grandes aplicaciones en otros contextos. En el campo puramente matemático, Kleene redefinió el modelo y dio lugar a los *autómatas finitos*, especie de maquinas ideales o modelo matemáticos, al modo de la maquina de Turing, con posibilidades bastante más reducidas, pero muy adecuadas para ciertos procesos de cálculo.

Por otra parte el ingles Touring consiguió definir conceptualmente una maquina de cálculo que se considera universal, es decir, el mecanismo de procesar cualquier algoritmo. Turing diseño un modelo matemático de autómatas que siguiendo unas reglas simples conseguía solucionar una gran gama de problemas. En principio, la maquina de turing constituye el instrumento de calculo universal, el más general. No es posible dar una demostración rigurosa de esto, aunque si se tiene una gran cantidad de indicios, agrupados en lo que se conoce como *Tesis de Church*, que puede plantearse así: “No existen funciones que puedan ser definidas por personas, y cuyo calculo sea descrito por un algoritmo, que no pueden computarse con una maquina de Turing”.

2.1.3 Autómatas Celulares e Inteligencia Artificial

En la *Inteligencia Artificial (IA)* podemos observar dos enfoques distintos, según el objetivo perseguido:

- ❖ El intento de desarrollar una tecnología capaz de crear máquinas con capacidades de razonamiento, o aparentemente similares a la inteligencia humana.
- ❖ La investigación relativa a los mecanismos de inteligencia, que emplea el computador como herramienta de simulación para la validación de teorías.

El segundo enfoque no pretende obtener programas inteligentes, sino descubrir en qué consiste la inteligencia. Ya que la actividad inteligente surge inicialmente en animales vivos, una parte de los esfuerzos orientados en este sentido pretenden no solo descubrir en qué consiste la inteligencia, sino también en qué consiste la vida.

La *Vida Artificial* es el intento por parte del hombre, de crear vida, o algo parecido a la vida, mediante la combinación de símbolos (datos) y procesos de símbolos (programas) independientemente del soporte físico de estos símbolos y procesos.

La *Vida Artificial*, en parte, trata de recrear los procesos propios de la vida, partiendo de la suposición de que la vida, sino son imprescindibles para la aparición de inteligencia, al menos son una buena idea para crear inteligencia, ya que evolutivamente los seres inteligentes siempre han sido seres vivos.

Por otra parte, la *Vida Artificial* trata de descubrir qué es la vida. Fundamentalmente, trata de descubrir si la vida depende de un soporte (físico, energético, metafísico o como se quiera llamar) o se trata de procesos, datos, configuraciones, esquemas, es decir, de objetos lógicos y sus relaciones, independientes del soporte. Este enfoque de *Vida Artificial* se aleja tanto de la búsqueda de la inteligencia que parece difícil clasificarlo dentro de la *Inteligencia Artificial* si no se toman en cuenta las reflexiones anteriores, y perfectamente se

podría clasificar como un campo de estudio independiente de la *Inteligencia Artificial*.

Dentro de la *Vida Artificial*, los AC son el más claro ejemplo de este rodeo en la búsqueda de la inteligencia. Es bastante extraño decir que los AC son inteligentes, no lo parecen en absoluto. En cambio, poseen muchos de los aspectos fundamentales de la vida en cuanto a procesos. Además, esto se intenta conseguir con la máxima simplicidad posible, por lo que podrían ser el fundamento, al menos teórico, de la vida, y por extensión, de la inteligencia. [FLE02].

2.1.4 ¿Qué es un Autómata Celular?

En pocas palabras, un AC es un modelo formal que está compuesto por un conjunto de entes elementales, cada uno de ellos susceptible de encontrarse en un cierto estado y de alterarlo de un instante al siguiente, asumiendo que el tiempo transcurre de forma discreta. La regla que gobierna la transición de estados en los entes es sensible a los estados de los demás elementos en su vecindad, siendo por tanto una *regla transición local*. El aspecto que más caracteriza a los AC es su capacidad por dotar al conjunto del sistema, visto como un todo, una serie de propiedades emergentes inducidas por la propia dinámica local. En general, no es fácil obtener las propiedades globales de un sistema definido como el anterior, complejo por naturaleza, a no ser por vía de la simulación, partiendo de un estado inicial de la población de objetos y cambiando en cada instante los estados de todos ellos en forma sincrónica. [REY99][UEX02].

2.1.5 Definición Formal De Autómata Celular

Sea:

L una retícula regular (a los elementos de L llamados células),

$$L = \{ (i,j) / i, j \in \mathbb{N}, 0 \leq i < n, 0 \leq j < m \}$$

S un conjunto finito de estados (estados posibles que pueden tomar las células)

N un conjunto finito (de tamaño $|\mathbf{N}| = n$) de vecindades tal que para todo c en **N**, para todo r en **L**: $r + c$ en **L**,

$f : \mathbf{S}^n \rightarrow \mathbf{S}$ una función de transición desde una configuración de estados a otra cualquiera.

Un Autómata Celular queda definido por la cuádrupla $(\mathbf{L}, \mathbf{S}, \mathbf{N}, f)$.

Una configuración $C_t : \mathbf{L} \rightarrow \mathbf{S}$ es una función que asocia un estado con cada célula de la retícula. El efecto de la función de transición f es cambiar la configuración C_t en la nueva configuración C_{t+1} según:

$$C_{t+1} = f (\{ C_t(i) : i \text{ pertenece } N(r) \})$$

Donde denotamos por $N(r)$ el conjunto de vecinos de la retícula r .

$$N(r) = \{i \text{ en } \mathbf{L} : r - 1 \in \mathbf{N}\}$$

En la práctica usualmente restringimos a una retícula de tamaño infinito. Esto se logra modificando una capa de células adyacentes entre cada aplicación sucesiva de la función de transición.

Por su dimensión los AC pueden ser: *uni* – dimensionales, representados por una cadena lineal, *bi* – dimensionales, representados por una matriz, *tri* – dimensionales, representados por una forma cúbica, y *n* – dimensionales. En las secciones posteriores se verán cada uno de estos AC.

2.1.6 Propiedades De Un Autómata Celular

La definición de un AC requiere considerar los siguientes elementos: **Conjunto de Entes, Retículo ó Lálice, Vecindades, Conjunto de Estados y Reglas de Transición.**

2.1.6.1 Conjunto de entes

El conjunto de entes se refiere a los objetos elementales que van a formar la población del sistema. En principio no hay restricción a su número, pudiendo ser desde unos pocos hasta una infinidad. Para la aplicación del tema de investigación, es necesario situarlos en un área geográfica determinada, en este caso se trabaja sobre la región de los Andes Tropicales Andinos de Bolivia.

La célula es el elemento básico de un AC. Se interpreta como un elemento de memoria que almacena estados, o también como un componente que puede tomar un valor de un conjunto de estados, en el caso más simple, estos estados pueden ser estados binarios: 0 ó 1.

2.1.6.2 Retícula o látice

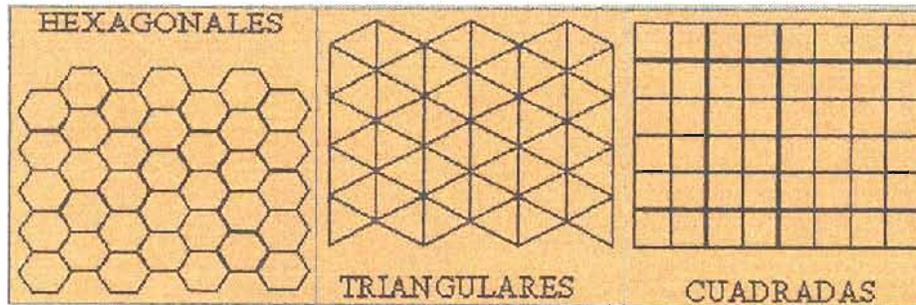
Se trata de un dominio n-dimensional, como se mencionó anteriormente, los componentes son denominados entes, u objetos elementales. Los entes se distribuyen espacialmente formando una red o malla, que constituirá el ambiente en el que se impondrán las interacciones que puedan efectuarse entre las células. En los autómatas celulares bi - dimensionales existen tres tipos de retículos: triangular, cuadrangular y hexagonal. (Figura 2.1).

Los bordes de la retícula dependen de las condiciones que se impongan en los límites. Se suelen considerar dos casos:

i. Bordes periódicos

Las células opuestas se consideran vecinas, de tal forma que es necesario conectar las células del borde el uno al otro, teniendo así el AC unidimensional una topología de “anillo”, y el AC bi - dimensional una topología de un “tours” (una dona).

Figura 2.1. Representación de las Retículas



Fuente: [Duarte, Lozano, Andrade, 2000]

ii. Bordes absorbentes

Las células de los bordes no tienen vecinos más allá de los límites del retículo.

2.1.6.3 Vecindades

Para cada elemento del sistema es necesario establecer su *vecindad*, esto es, aquellos otros elementos que serán considerados como sus vecinos. En caso de asociar objetos con coordenadas de un sistema de referencia, el criterio suele ser construir la vecindad de un elemento dado con todos aquellos otros elementos que se encuentran a menos de una cierta distancia o *radio*, de forma que los más alejados no ejerzan influencia directa sobre él.

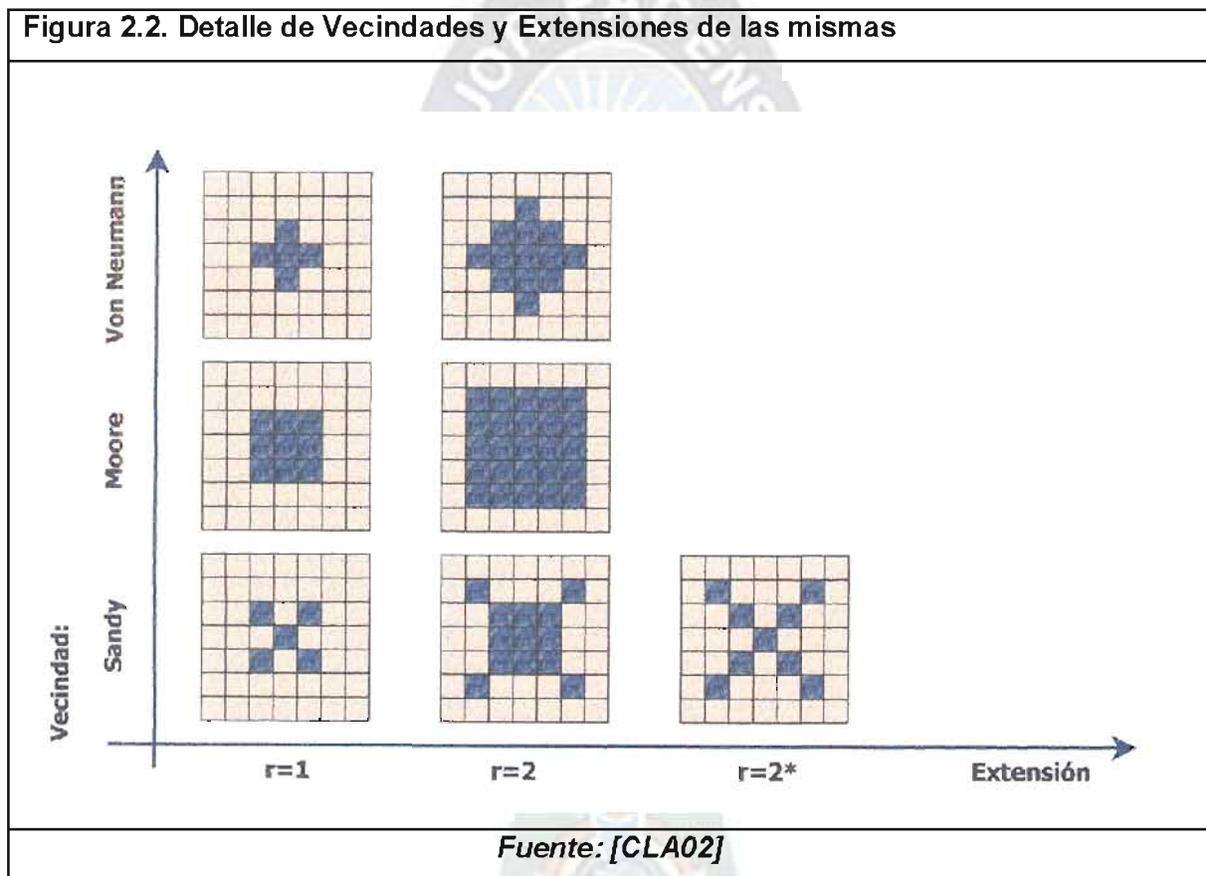
Diferentes definiciones de vecindades son posibles, considerando una retícula bi – dimensional, las definiciones siguientes son comunes: (Figura 2.2).

i. Vecindad de Von Neumann

Esta vecindad consiste en que una célula en cuestión estará influenciada por cuatro células vecinas, ubicadas al Norte, Sur, Este y Oeste respectivamente. El radio de esta vecindad es uno ($r = 1$).

ii. Vecindad de Moore

La vecindad de Moore es una ampliación de la vecindad de Von Neumann que contiene además las células diagonales. Es decir una célula en cuestión estará influenciada por ocho células vecinas, ubicadas al Norte, Sur, Este, Oeste, Noreste, Noroeste, Sureste y Suroeste respectivamente. El radio de esta vecindad es también uno ($r = 1$).



iii. Vecindad de Moore Extendido

Es equivalente a la descripción de la vecindad de Moore de arriba, pero la vecindad alcanza sobre la distancia de las siguientes células adyacentes. Por lo tanto el radio de la vecindad es mayor o igual a dos ($r = 2$).

iv. *Vecindad de Margolus*

Este enfoque completamente diferente. Se consideran bloques de 2×2 células que se modifican globalmente, no célula a célula.

v. *Vecindad de Sandy*

De manera adicional, señalamos la siguiente estructura de vecindad, la cual fue establecida por un estudiante boliviano **V. Sandy**. Esta vecindad posee también radio uno ($r=1$) y podría considerarse como el complemento de la vecindad de Moore. Los vecinos que forman parte de esta vecindad son: *Sureste, Suroeste, Noroeste, Noreste respectivamente*.

2.1.6.4 Conjunto de estados

En cada instante, cada elemento (célula) deberá encontrarse en un cierto estado. El caso más sencillo corresponde a los elementos bi-estables, los cuales se pueden encontrar en sólo uno de dos estados posibles, 0 ó 1, por ejemplo. Pero también el conjunto de estados puede venir representado por un vector de componentes reales o por una cadena de un lenguaje formal.

2.1.6.5 Reglas De Transición

Uno de los aspectos más importantes de los AC son las *reglas de transición o función de transición*. Este determina la evolución. Por supuesto las reglas de transición dependen de la geometría de los retículos, la vecindad, y el conjunto de estados.

La regla de transición define la dinámica del sistema. Dado un elemento y un instante determinados, la regla devuelve el siguiente estado del elemento, para ello necesita como argumentos los estados actuales, tanto el elemento considerando como aquellos que conforman su vecindad. Las reglas de transición pueden ser *determinísticas o probabilísticas*, y se pueden agrupar en: **[JIM99]**.

i. Legales

Son aquellas en que la vecindad nula da siempre un valor nulo y además con simetrías.

ii. Totalísticas

Son aquellas en que la regla de evolución solo depende de la suma de los estados de los vecinos. La codificación de estas reglas es mucho más sencilla.

iii. Elementales

Son reglas con radio igual a uno, un ACL. Hay solo 32 reglas elementales.

2.1.7 Autómatas Celulares Uni – Dimensionales

Los autómatas Celulares Uni-Dimensionales ó Autómatas Celulares Lineales (ACL) son autómatas cuyas celdas están dispuestas a lo largo de un segmento rectilíneo. Su representación formal es la siguiente [WOL82].

$$a_i^{(t+1)} = f(a_{i-1}^{(t)}, a_i^{(t)}, a_{i+1}^{(t)})$$

el valor de un sitio en la posición i al paso del tiempo t se denota a_i^t , donde:

t = tiempo presente

$t + 1$ = siguiente instante de tiempo

f = función de regla de transición

Un ACL se construye de la siguiente manera: se coloca una serie de celdas en línea, es decir un arreglo lineal de elementos los cuales se denominan *células*.

Cada célula puede tener un número finito de valores, ya sea un valor entero, una letra o un color, lo que se quiera que represente cada una, a estos valores se les denomina *estados*, todas las células tiene el mismo número posible de estados.

En los extremos del arreglo la célula inicial y final no tienen el mismo vecindario que las células interiores, por esto, para preservar la uniformidad de todos los vecindarios, la cadena puede ser imaginada como un anillo, así la primera célula del arreglo es la vecina derecha de la última y está es la vecina izquierda de la primera.

2.1.8 Autómatas Celulares Bi – Dimensionales

Una extensión inmediata de los Autómatas Celulares Lineales, son los ***Autómatas Celulares Bi-dimensionales ACB***. Estos tienen importancia por si mismos, debido a las múltiples aplicaciones prácticas que actualmente se les ha dado, entre otras se emplean para: La modelación de sistemas mecánicos, biológicos, problemas de irrigación, sistemas químicos, físicos y otros. En muchos casos, se encuentran estrechamente ligados a un fenómeno denominado Percolación, este último es objeto de estudios actuales en combinación con otras técnicas de modelación de sistemas dinámicos.

Una característica destacable en los autómatas celulares en general, es que son capaces de producir comportamientos complejos a partir de reglas simples, únicamente basados en interacciones locales de las células que forman parte de la teselación. Al igual que en el caso de los ACL, en un ACB el comportamiento de cada célula en la retícula depende únicamente de la vecindad local que se haya definido para dicho autómatá.

En el caso de los ACB, resultan de mucha utilidad para representar organizaciones entre individuos varios ubicados en un plano, los cuales pueden organizarse en colonias que se estabilizan o mueren con el tiempo.

2.1.9 *Autómatas Celulares Tri – Dimensionales*

La representación en tres dimensiones es más difícil; como es de suponer una retícula regular se verá como cubos apilados.

Una forma más sencilla de observar el comportamiento tri - dimensional, es mostrar los estados sucesivos con imágenes bi - dimensionales, es por esta razón que el número de imágenes crece rápidamente.

2.1.10 *Autómatas Celulares Estocásticos*

En este tipo de autómatas se introduce una importante distinción a nivel teórico. Un Automata Celular Estocástico o Probabilístico es aquel, en el que las reglas de desarrollo son probabilísticas: cada configuración de las células vecinas a una celda la induce hacia una distribución de probabilidad sobre el valor de dicha célula en la siguiente iteración. Se trata de un caso muy realista, puesto que muchas aplicaciones de la biología o de la física (en particular a nivel atómico) no es posible predecir hacia donde va a crecer un tejido o como va a moverse un átomo. A la hora de simular dicho autómata debe calcularse el valor de manera aleatoria, siguiendo una distribución de probabilidad. [UEX02].

Se puede definir dos formas de AC probabilístico. La primera donde las reglas del AC se aplican de manera uniforme a todas las celdas del espacio celular, para cada cambio de estado tiene una propiedad de ocurrencia, y otra donde las reglas no son uniformes y cada celda puede aplicar una regla y otra con diferentes probabilidades. El primer caso se denomina AC probabilística uniforme (ACPU) y el segundo AC probabilística no uniforme (ACPN).

2.2 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Los SIG desde sus inicios, estuvieron orientados al análisis espacial y cada día son más las áreas en las que se encuentran presentes, resuelven diferentes tareas de

presentación y/o análisis de información, satisfactoriamente. Pero, está surgiendo la necesidad de representar sucesos espaciales y también se ésta considerando parte del espacio, a procesos que ocurren en una determinada región geográfica.

La tecnología SIG integra operaciones comunes de base de datos tales como preguntas y análisis estadísticos con la visualización única y los beneficios geográficos de análisis ofrecidos por mapas. Estas cualidades distinguen a los SIG de otros sistemas de información, permitiendo su uso en empresas públicas y privadas, para explicar los acontecimientos, predecir resultados y planear estrategias.

A mediada que el tiempo pasa los SIG van adquiriendo mayor importancia entre distintos especialistas de diversas áreas, por lo cual hoy en día se puede observar que se aplica en biología, agronomía, geografía, estadística, informática, y otros.

2.2.1 Historia

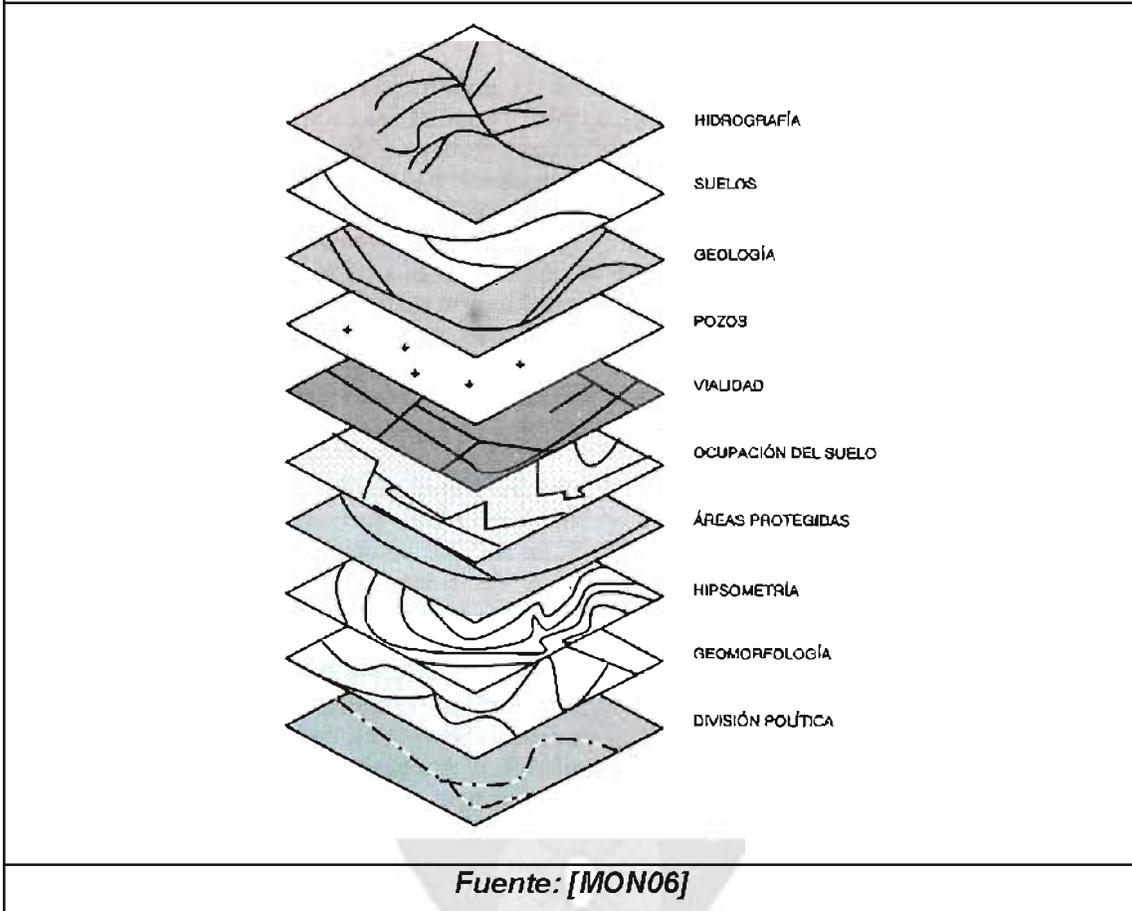
El origen de los SIG se remota hacia el antiguo Egipto, en donde se empezaron a realizar los primeros mapas para delimitar los predios adyacentes al Nilo, ya en el año 1870 se realizó un SIG por una empresa de trenes empleando acetatos súper posicionados, lo cual llevo al surgimiento de los primeros software's de cartografía automatizada y a un SIG que estuvo orientado al manejo de bosques. Una vez que surgieron los SIG éstos empezaron a evolucionar también sus técnicas pasando desde un *modelo orientado a registros* a un *modelo orientado a capas*². (Figura 2.3).

Los SIG también evolucionaron por las tareas técnicas de la Informática desde un enfoque orientado a realizar sólo mapas cartográficos por medios digitales, luego se vio la necesidad de relacionar los Sistemas de Información con los aspectos geográficos, es decir poder manipular esta información, los SIG llegaron al punto

² Modelo de capas se define como “Un conjunto de elementos geográficos lógicamente relacionados y sus atributos temáticos” o la separación lógica de los datos espaciales de un mapa de acuerdo a un tema determinado.

en que se puede acceder a datos espaciales mediante Internet: GoogleEarth y Sistemas de Posicionamiento Global: GoogleMap.

Figura 2.3. Modelo Orientado a Capas de un SIG



2.2.2 Definición

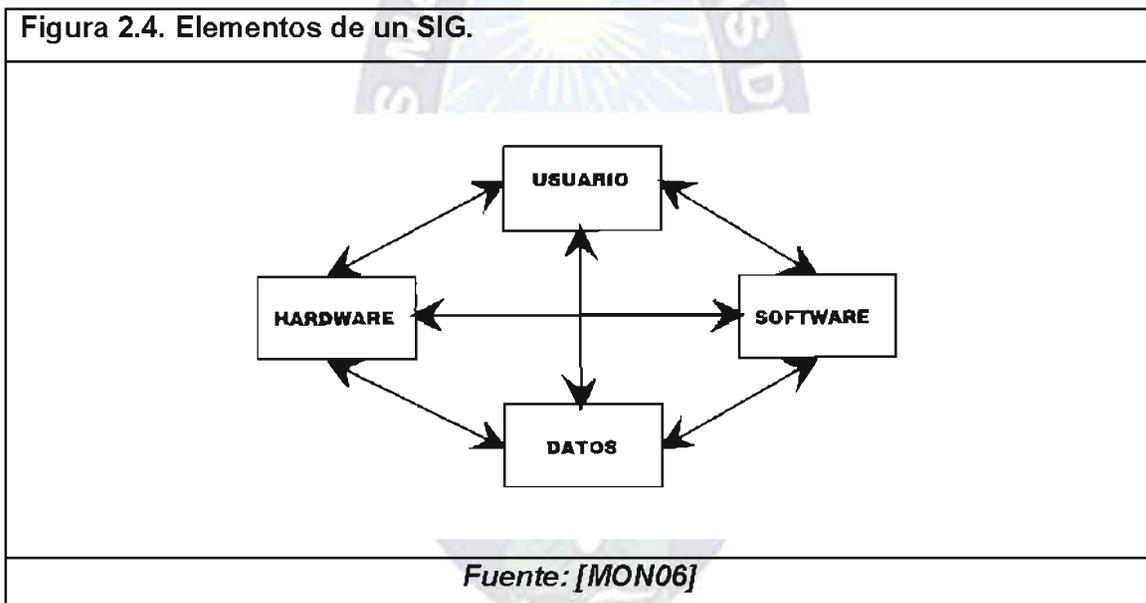
Podemos mencionar dos definiciones de diferentes autores:

“Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una colección organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para la eficiente captura, almacenamiento, integración, actualización, modificación, *Análisis Espacial*, y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada”. [ESR93].

“Es un modelo informatizado del mundo real, descrito en un sistema de referencia ligado a la tierra, establecido para satisfacer unas necesidades de información específicas respondiendo a un conjunto de preguntas en concreto”. [BOS94].

2.2.3 Elementos de los SIG

Básicamente un SIG está formado por cuatro elementos fundamentales, los cuales permiten realizar sus operaciones posibles considerando la complejidad del tratamiento del dato espacial y sus componentes espacial y temática. (Figura 2.4).



2.2.3.1 Software

Esta permite proporcionar las herramientas para manipular, analizar y mostrar la información geográfica con las que se pretende trabajar.

2.2.3.2 Hardware

Un SIG requiere de hardware para poder lograr su funcionamiento. Estas pueden ser servidores, PC's, red, etc.

2.2.3.3 Datos

Es el componente esencial de un SIG, ya que este opera con datos geoespaciales, es decir datos que hacen referencia a un espacio geográfico cuya ubicación se conoce bajo un sistema de coordenadas, estos pueden ser tanto datos geográficos (localización absoluta y relativa) como descriptivos, los cuales pueden ser relacionados para proporcionar información útil.

2.2.3.4 Usuario

Este componente es el que proporciona un equipo humano, el cual se encargara del correcto funcionamiento de un SIG, este componente comprende tanto a las personas que manejan el SIG como a los que requieren servicios de un SIG.

2.2.4 Funciones de los SIG

Las funciones de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se pueden agrupar en cinco conjuntos fundamentales.

2.2.4.1 Entrada de Información

Los datos que se utilizarán en un SIG deben estar digitalizados. Los SIG proporciona una tecnología que permite automatizar el proceso de digitalización, otra manera de introducir la información es realizar una digitalización manual mediante tablas, pero también existen datos que ya están preparados para ser compatibles con los SIG, los cuales pueden ser directamente cargados.

2.2.4.2 Manipulación

Puede ocurrir que por ejemplo, los tipos de datos con los que trabaje el SIG no se presenten en una misma escala lo cual requiere que de un cambio y una transformación. Estas transformaciones pueden ser temporales o definitivas para

su permanencia en los SIG, por esta tarea los SIG proveen de herramientas para manipulación de datos espaciales.

2.2.4.3 Gerencia

El proceso que se sigue depende de el volumen de datos con se este trabajando. Por ejemplo para una cantidad pequeña de información se podría salvar ésta en archivos simples, no obstante, cuando el volumen de los datos es mayor se requiere de un Sistema Manejador de Base de Datos que nos permita guardar, ordenar y manejar los datos. En los SIG el diseño más útil es el relacional.

2.2.4.4 Consultas y Análisis

Cuando el SIG está funcionando y se tiene ya la información geográfica es posible realizar consultas al Sistema. Se pueden realizar tanto análisis de descubrimiento como de aproximación.

2.2.4.5 Salida de Datos

Con un SIG la salida de datos o visualización de información se la puede obtener de forma gráfica, lo cual permite comprender de mejor manera la información.

2.2.5 Modelo de Datos

En los Sistema de Información Geográfica existen dos tipos de modelos de datos para la representación y manipulación de los datos geográficos, éstos son: el modelo de datos *vectorial* y el *ráster*. (Figura 2.5).

2.2.5.1 Modelo Vectorial

En el modelo vectorial, la información del mundo real es representada por los puntos, líneas y los polígonos que definen sus límites y fronteras, estableciendo un sistema de coordenadas (x,y) para localizar cada objeto espacial en una capa. En dicho modelo de datos el espacio tiene un carácter continuo, por ejemplo las áreas internas a un polígono pertenecen a un elemento único, siendo representados los elementos por sus fronteras, las cuales de definen explícitamente. En el modelo de datos vectorial las áreas (polígonos) están descritas por el conjunto de líneas de frontera que las delimitan, dichas líneas se representan por un conjunto de coordenadas correspondientes sus vértices, mientras que los puntos se representan por una coordenada (x,y). [MON06].

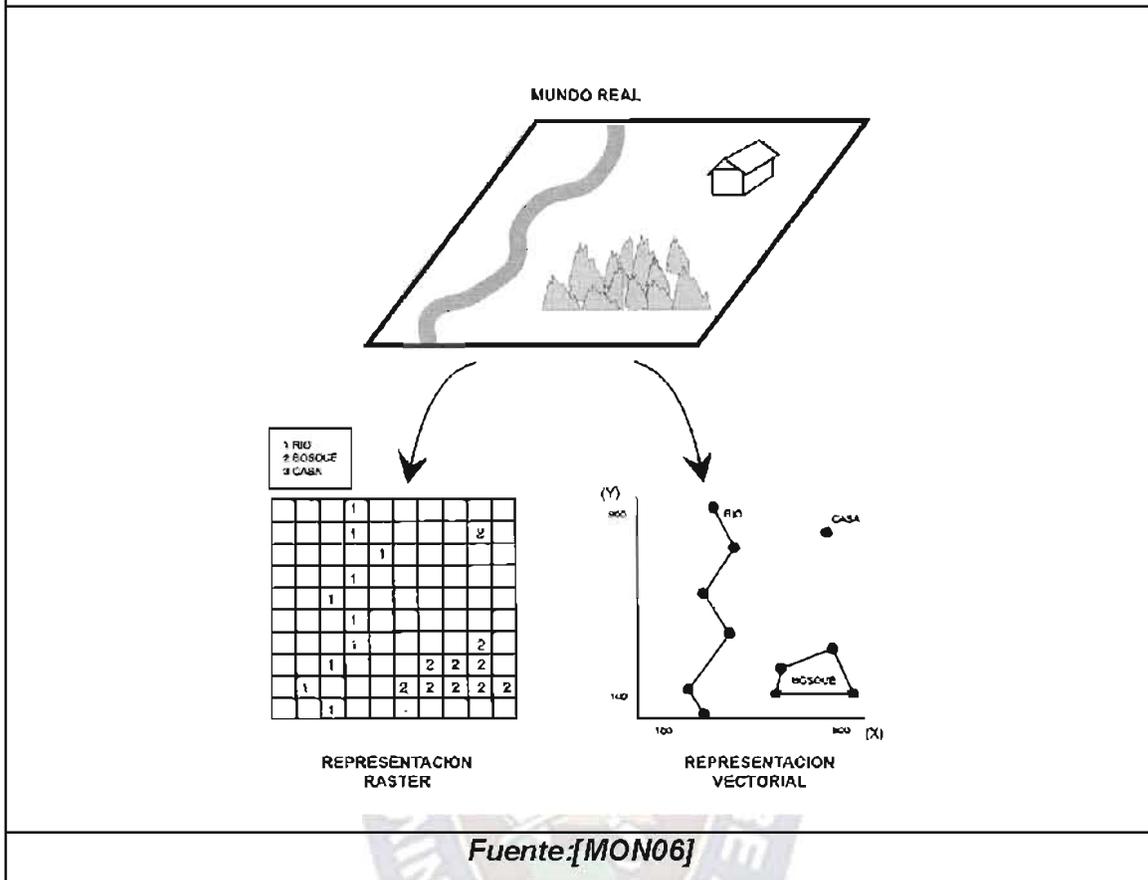
2.2.5.2 Modelo Ráster

La estructura ráster consiste en la representación de nuestro mundo real o la representación de este en una grilla compuesta de celdas (pixel). Esta serie de datos ráster, basado en celdas, está orientado para representar fenómenos tradicionalmente geográficos que varían continuamente en el espacio, como la elevación, inclinación o precipitación. Pero además pueden ser utilizadas para representar tipos de información menos tradicionales, tales como densidad de población, comportamiento del consumidor y otras características demográficas.

Las celdas también son datos ideales de representación para el modelo espacial, el análisis de flujos y tendencias sobre los datos representados como superficies continuas como el modelado de vertientes o los cambios dinámicos de población sobre el tiempo.

Esta estructura es simple y fácil de manejar, tiene gran capacidad de sobreposición u overlay. A la representación ráster se le denomina imagen. La estructura genera sólo un archivo que contiene las coordenadas en fila columna y el atributo del píxel. [MAN03].

Figura 2.5. Representación Vectorial y Ráster de un Mundo Real.



2.2.6 Modelo de Datos de Elevación (MDE)

El Modelo de Datos de Elevación (MDE) se puede definir como: “Un modelo digital de elevaciones es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno”. [FEL05].

Un MDE es un grupo de valores que representa puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica está definida por coordenadas (x,y) y a las que se le agrega un valor de “z” que corresponde a la elevación. Se ha convenido que los puntos deben estar espaciados y distribuidos de modo regular, de acuerdo con un patrón que corresponde a una cuadrícula.

Los MDE's son datos de tipo ráster, las imágenes en estos modelos están formadas por pequeñas celdas. Los SIG pueden generar MDE's, los cuales se los utiliza para el análisis de volúmenes, perfiles, cálculos de superficies, profundidades y la relación que juega alguna variable frente a la morfología de un paisaje.

Entre las fuentes de datos para la generación de un MDE tenemos a los métodos directos (toman la información sobre la superficie real del terreno), pueden ser los siguientes: Altimetría, Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Levantamiento Topográfico. Entre los métodos indirectos (se basa en documentos analógicos o digitales).

Existen varias formas de representar estos modelos de elevación de acuerdo a la estructura y organización de los datos. Clásicamente hay dos formas comunes de representar los modelos. **[FEL05]**.

- ❖ **Vectorial:** basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices.
- ❖ **Ráster:** basado en localizaciones espaciales sobre la retícula regular de puntos a los cuales se le asigna el valor de elevación.

2.2.7 Modelo Digital de Terreno (MDT)

Uno de los elementos básicos de la representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Terreno (MDT). Se denomina así al conjunto de mapas que representan distintas características de la superficie terrestre que se derivan de un mapa de elevaciones Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

Un MDT suele incluir: Modelo Digital de Elevaciones, Pendiente, Orientaciones o exposiciones.

Para su formación se necesita una muestra de valores que nos permita interpolar el MDE, esta muestra puede consistir en:

- ❖ Un conjunto de puntos con altitud medida sobre el terreno (GPS o estación topográfica).
- ❖ Curvas de nivel digitalizadas de un mapa

2.2.8 Interpolación

Interpolación es un procedimiento matemático utilizado para predecir el valor de un atributo en una locación precisa a partir de valores del atributo obtenidos de puntos vecinos ubicados al interior de la misma región. A la predicción del valor de un atributo en lugares fuera de la región cubierta por las observaciones se le llama *extrapolación*.

Se utiliza interpolación para transformar un número finito de observaciones, obtenidas en base a ubicaciones geográficas precisas, a un espacio continuo de manera que el patrón espacial presentado por las observaciones puntuales pueda ser comparado con los patrones espaciales de otras variables bajo consideración. **[MAN03].**

La interpolación es necesaria:

- ❖ Cuando la *superficie es rasterizada*³ (GRID) tiene una resolución que es diferente de la resolución pedida,
- ❖ Cuando una *superficie es continua*⁴ es representada por un modelo que es diferente al necesitado.
- ❖ Cuando los datos no cubren toda la región de interés de estudio.

³ Representan objetos tanto en atributos de vector como en sistemas de almacenaje de datos ráster. Un objeto discreto debe tener fronteras definibles. Ej. Uso de la tierra, ríos, caminos, pozos, etc.

⁴ Una superficie continua representa fenómenos donde cada posición sobre la superficie es una medida del nivel de concentración o su relación de un punto fijo en el espacio o de una fuente de emisión. Ej. Elevación, contaminación por ruido, precipitación, pendiente, temperatura, etc.

2.3 EL GLACIAR

Para el presente estudio, es de gran importancia desarrollar algunas definiciones teóricas, que permitan comprender mejor el comportamiento de los glaciares.

2.3.1 Glaciar

Es una masa de hielo, que se mueve sobre la superficie del terreno, y puede ser considerado como un sistema:

- ❖ Cuya señal de entrada, viene del clima (cantidad de precipitaciones, temperatura, radiación solar, etc.) y
- ❖ Cuya señal de salida, está constituida: primero por la variación de hielo en movimiento que se traduce en términos de un avance o retroceso del frente, y segundo, por la variación del caudal del torrente que sale de ese frente.

2.3.2 Cuenca

La cuenca está definida como la región que recibe las precipitaciones y que después de los procesos hidrológicos resultantes en pérdidas y retardos, conduce al punto de salida. En otras palabras es la totalidad del área drenada por una corriente ó un sistema interconectado por causes, tales que todo el escurrimiento originado en tal área es descargado a través una única salida. [Linsley, R.K. 1977].

2.3.3 Partes de un Glaciar

Las partes más comunes que presenta un Glaciar son: (Figura 2.6)

2.3.3.1 Zona de acumulación

Llamada también “Zona de alimentación”, y corresponde a la zona donde se acumula la nieve, la cual se convierte en neviza, y más tarde en hielo glaciar.

En la escala anual, la alimentación predomina en la región alta del glaciar o zona de alimentación.

2.3.3.2 Zona de ablación

Conocida también como “Región de Desplazamiento”, y corresponde a la región baja del glaciar, donde domina el deshielo.

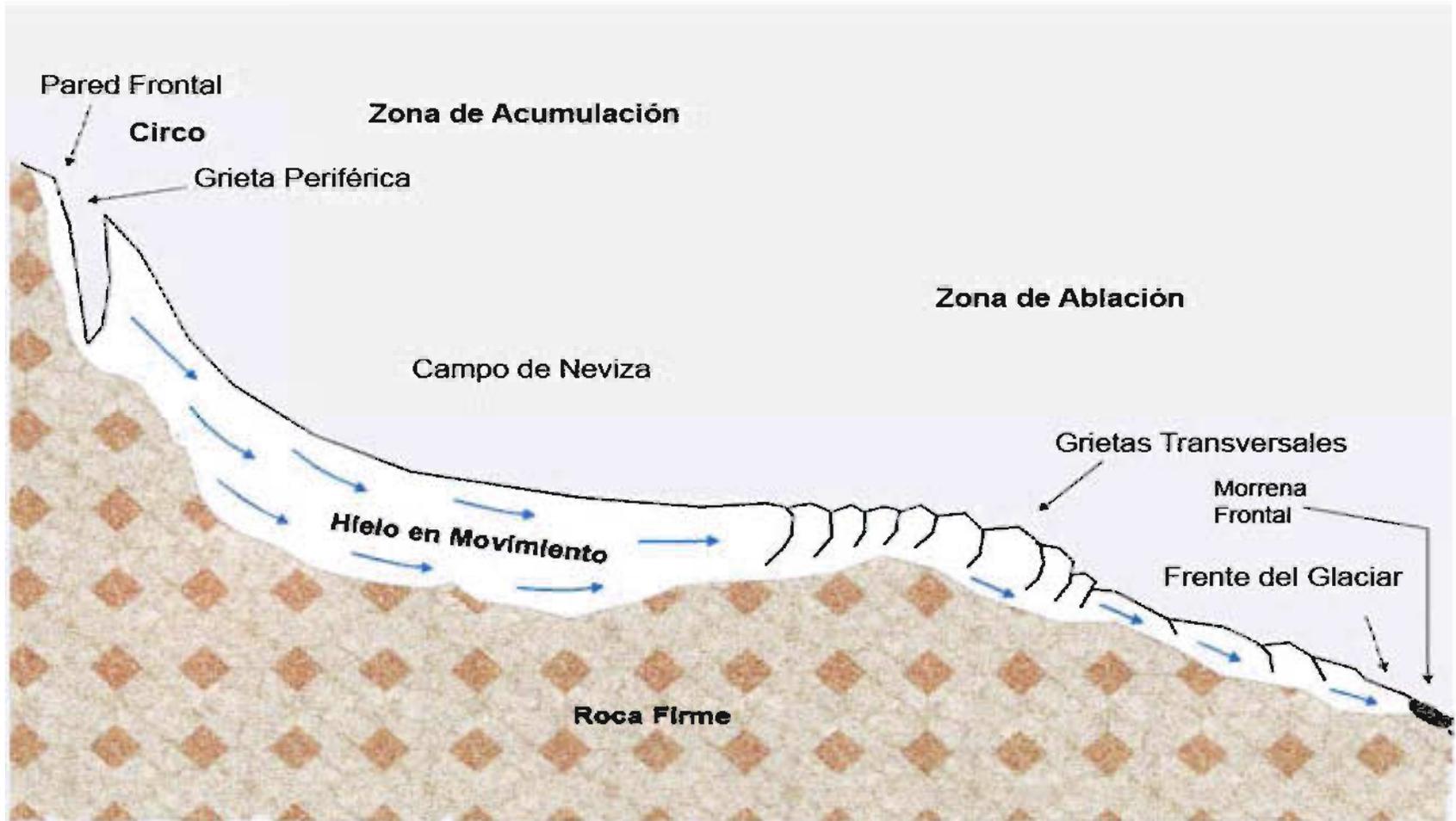
2.3.3.3 Línea de Equilibrio de Altitud

También se conoce como “Línea Nevada”, es la línea más o menos constante en la escala de algunos años que marca el paso de una zona a otra, pero cuya altura puede variar a lo largo del tiempo (conocida comúnmente en inglés como *Equilibrium Line Altitude*, E.L.A.); su nivel hipsométrico depende de las condiciones climáticas, es decir, al aumentar la capa de nieve por bajas temperatura, se desplaza hacia abajo por el contrario al ponerse más cálido el clima, la línea se desplaza hacia arriba.

2.3.3.4 Grietas

En el desplazamiento de los glaciares, las partes centrales se mueven más rápido que las partes periféricas sometidas a fricción contra los bordes de los valles. Este movimiento desigual de la masa de hielo provoca la formación de fracturas periféricas o de costado. Debido principalmente a las irregularidades del relieve del lecho, se deforma el cuerpo glaciar, originando fracturas transversales.

Figura 2.6. Partes de un Glaciar – Corte Esquemático de un Glaciar de Montaña



Fuente: [Holmes 1969]

2.3.3.5 Morrenas

Los glaciares en su movimiento fracturan y destruyen material rocoso y acumulan el material fragmentado mediante la erosión glaciár, este material recibe el nombre de de morrenas. Según sea su estado, las morrenas se dividen en móviles e inmóviles, las primeras se mueven con el movimiento del hielo, mientras que las segundas representan el material fragmentado que se queda en el lugar, una vez que se derrite el glaciár.

2.3.4 Características de los Glaciares

Algunas de las características relevantes son:

- ❖ Los glaciares están constituidos por hielo glaciár, formado por el congelamiento de la nieve, diferenciando del hielo de terreno, río o mar que se forma por el congelamiento del agua.
- ❖ El hielo glaciár no posee estratificación, normalmente es transparente con matices azulados.
- ❖ El hielo glaciár siempre se encuentra en estado de desplazamiento, debido a la corriente plástica de la propia masa de hielo, cuyo movimiento se ve favorecido por la presión del agua existente en la parte inferior, que se forma al disminuir la temperatura y por el derretimiento del hielo, que a veces lubrica a todo el macizo echado.

2.3.5 Tipos de Glaciares

De acuerdo a las formas, dimensiones y relación entre las regiones de alimentación y de desplazamiento, [C.Staufler 1969], clasifica a los glaciares en tres tipos:

2.3.5.1 Glaciares de Montaña

Son relativamente delgados, adjuntos a diferentes tipos de depresiones, valles fluviales, desfiladeros, etc.; la región de alimentación está definida claramente, posee forma de circo y se encuentra más arriba de la línea nevada, generalmente esta zona está rodeada de picos y altas crestas. El hielo se desplaza por los valles montañosos con vertientes escarpadas, formando una o varias corrientes de hielo en forma de lenguas – el glaciar de Chacaltaya, pertenece a esta clasificación.

2.3.5.2 Glaciares Continentales

Se forman en las regiones polares y están situadas casi a nivel del mar. Por lo general, ocupan inmensas extensiones y poseen un considerable espesor. Los glaciares continentales no poseen regiones de alimentación y de desplazamientos claramente aisladas entre sí. Su forma no depende del relieve del hecho y por lo general poseen una forma de escudo convexo, un poco elevado en su parte central.

2.3.5.3 Glaciares Intermedios

Estos glaciares se denominan intermedios por tener una mezcla de las propiedades de los dos anteriores. Por lo regular se forman en montañas con clima llana (mesetas). Al igual que los continentales, estos cubren inmensas extensiones en las mesetas.

2.3.6 Clima

La palabra clima deriva del griego *Klima* la cual es definida como la inclinación de la tierra hacia el Ecuador. Los griegos creían que la posición de la superficie terrestre respecto al Ecuador determinaba el Clima de un lugar. Hoy en día se conoce que el Clima, está determinado por la latitud, altitud, y el complejo intercambio de energía y humedad entre la superficie terrestre y la atmósfera. [UNESCO 1990].

El Clima representa a los valores medios y extremos de los diversos elementos del tiempo o manifestaciones meteorológicas que caracterizan las condiciones atmosféricas de una región relativamente amplia, calculados en un intervalo específico de tiempo, el cual, según la Organización Meteorológica Mundial (WMO), es de 30 años.

2.3.7 Efecto Invernadero

Se llama “*efecto invernadero*” al fenómeno por el que determinados gases componentes de una atmósfera planetaria retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar. Afecta a todos los cuerpos planetarios dotados de atmósfera. Este fenómeno evita que la energía del Sol recibida constantemente por la Tierra vuelva inmediatamente al espacio, produciendo a escala planetaria un efecto similar al observado en un invernadero.

El efecto invernadero es uno de los fenómenos naturales más conocidos debido a sus graves secuelas. Es causado por el aumento en la concentración de los gases de invernadero: el dióxido de carbono (CO₂), los clorofluorocarbonados (CFC), el metano (CH₄), el óxido de nitrógeno (N₂O) y el ozono de la tropósfera. En pequeñas concentraciones, los gases de invernadero son necesarios para nuestra subsistencia. La energía solar pasa a través de ellos, llega a la tierra y, parte de ella, se devuelve, en forma de energía infrarroja. Es entonces cuando los gases de invernadero la atrapan y conservan el calor de la radiación infrarroja, al modo en que el calor se mantiene en un invernadero.

2.3.8 Cambios Climáticos

Aunque el clima natural de la tierra es variable, se utiliza normalmente el término cambio climático o “*calentamiento global*”, en referencia al riesgo de

calentamiento acelerado, o al aumento de las temperaturas superficiales medias del planeta inducido por el reforzamiento del efecto invernadero.

El cambio climático se manifiesta a través de las variaciones de los parámetros meteorológicos, cuyas fluctuaciones alcanzan niveles recurrentes hasta diferenciarse de los valores considerados inicialmente. La denominación "calentamiento global" suele utilizarse habitualmente considerando implícitamente la influencia de la actividad humana.

2.3.9 Deshielo

La aceleración en el deshielo de los glaciares del planeta, en estos últimos años, ha obligado a la tierra a aflojarse un poco el cinturón, ya que su contorno ecuatorial ha aumentado. La Tierra nunca ha sido exactamente esférica, siempre ha sido una especie de calabaza. Aunque desde la última Edad del Hielo, el planeta se ha ido redondeando más y más a medida que el suelo bajo las regiones polares se iba aplanando por acción del peso del hielo, ahora parece que "rebota" hacia afuera.

El deshielo de los glaciares de montaña, por otro lado, se debe a los efectos del calentamiento global. La Ciencia se ha encargado en estudiar este fenómeno en muchas regiones del planeta. Los múltiples resultados obtenidos siguen evidenciando que el calentamiento de la atmósfera está acelerando el deshielo en todo el mundo. *"El aumento en el deshielo de los glaciares asciende a varios cientos de kilómetros cúbicos de agua al año"*. El deshielo es la pérdida de masa de hielo en los glaciares, convirtiéndose así en agua.

2.3.10 Factores Climatológicos y de Terreno de Influencia

Los principales parámetros climáticos y de terreno que influyen al deshielo de un glaciar y por consecuencia sus variables más importantes que influyen al retroceso de un glaciar o el deshielo de este, son bastante conocidos en las regiones extratropicales, gracias a series de balances medidos durante más de 50 años,

mientras que se aprecia todavía muy mal los parámetros climáticos que controlan la evolución de los glaciares bajo los trópicos. [FRA92].

Sin embargo, considerando de manera general los parámetros climáticos y de terreno de influencia sobre latitudes tropicales, podemos indicar que son: temperatura, precipitaciones, radiación solar y la anomalía climática del fenómeno ENSO, la topografía y los escurrimientos.

2.3.10.1 Radiación Solar

Es la fuente principal de energía de nuestro planeta y determina sus características climatológicas:

Tanto la tierra (relieve terrestre, el suelo, la nieve o hielo, vegetación, etc.) como el sol irradian energía como cuerpos negros, es decir, emiten para cada longitud de onda, cantidades de radiación cercanas a las máximas teóricas para cuerpos con sus temperaturas⁵.

Las nubes por su parte, también reflejan al espacio una gran cantidad de la radiación solar incidente. La cantidad reflejada, depende del tipo de nubes y de su albedo.

2.3.10.2 Precipitación

Es el agua procedente de la atmósfera que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra, en forma sólida mediante la nieve y el granizo. La precipitación es medida a través de pluviómetros, pluviógrafos, nivómetros, y otros.

2.3.10.3 Temperatura

⁵ Cuanto más blanca es la superficie del objeto, la cantidad de radiación emitida tiende a aproximarse a la cantidad recibida de radiación solar.

La temperatura del aire es el calor suministrado o medido a consecuencia de los rayos solares; en otras palabras resultaría ser el equilibrio de calor proveniente del sol que recibe la tierra durante el día y la que devuelve a la atmósfera durante la noche. La temperatura es medida, a través de los termómetros, pudiendo ser éstos analógicos, digitales u otros.

2.3.10.4 Viento

Son las corrientes de aire que presentan movimientos con velocidad variable. Estos movimientos se originan debido a que en la atmósfera existen zonas de alta y baja presión, la velocidad de estas corrientes depende de la diferencia de presión existente entre dichas regiones.

La turbulencia del viento aumenta con la rigurosidad del relieve, así mismo aumenta cuando la velocidad del viento incrementa. Aunque como consecuencia de la acción de los remolinos el viento puede ser muy variable, tanto en dirección como en velocidad durante breves periodos, el flujo principal del aire se mantiene por lo general constante, soplando en promedio de una cierta dirección. [DON91].

2.3.10.5 Esguerrimientos

Es el componente más importante del ciclo hidrológico desde el punto de vista del aprovechamiento de los Recursos Hidrológicos de una región, el esguerrimiento de una corriente constituye la disponibilidad para ser derivada y utilizada inmediatamente, en el riego y/o el abastecimiento de agua a las poblaciones, o bien para ser almacenadas en los embalses y empleada posteriormente en diversos fines ó en última instancia retenida para su control. Sin embargo, el esguerrimiento en este caso es una consecuencia de la aceleración de la desglaciación, relacionadas con alteraciones de las dinámicas atmosféricas, que a lo largo son una amenaza, para los habitantes de los valles andinos, por que este fenómeno producirá un déficit de agua originada por los deshielos.

2.3.10.6 Fenómeno ENSO

Desde hace siglos, "EL Niño", fue la denominación que un grupo de pescadores peruanos le otorgaba a la aparición de una corriente marina, anormalmente cálida, en la costa peruana, cada cierta cantidad de años. Esta denominación se refería al Niño Jesús, ya que la aparición de estas aguas cálidas, se observaba a fines del mes de Diciembre, cerca de Navidad.

En el año 1982, producto de estas corrientes cálidas, que se comenzaron a introducir más términos, para el estudio de este fenómeno, tales como: "ENSO", "evento frío", "evento cálido", y "La Niña", entre otros.

Según estudios, se sabe que "El Niño" es una corriente oceánica de aguas cálidas que se desplaza por el Océano Pacífico Tropical, desde el lado Oeste del Pacífico, en las costas de Indonesia y Australia hasta el lado Este del Pacífico, en las costas de Sudamérica, precisamente, hasta las costas de Colombia, Ecuador, Perú y el norte de Chile.

Cuando ocurría este fenómeno, se observó que siempre estaba acompañado de marcadas diferencias de presión atmosférica entre el Este y el Oeste Tropical del Pacífico, existiendo una baja presión en el Oeste y una alta presión en el Este, y que además, existía un fenómeno, contrario al de "El Niño", en el que cual las extremas de presión se cambiaban.

ENSO, sigla de "El Niño Oscilación del Sur" o en inglés, ENSO, fue la denominación, originalmente introducida para identificar la relación del fenómeno de aguas cálidas de "El Niño" con la fase negativa de la "Oscilación del Sur".

La fase positiva de la "Oscilación del Sur" o "Evento Frío", pues, al contrario de "El Niño", se caracteriza por la llegada de aguas anómalamente frías, a las costas de Sudamérica. Por ende, también recibió nombres como: "Anti - El Niño", "El Viejo", y su actual nombre: "La Niña".

¿Que efectos trae estas anomalías?

Según los registros, se sabe que "el Niño" tiene ocurrencia irregular, a intervalos de 3 a 8 años, y una duración de 12 a 18 meses. Por el aumento de la temperatura del mar, se produce una alteración en la salinidad, una disminución del oxígeno en el mar, lo que la hace una corriente pobre en nutrientes, lo que afecta a los ecosistemas marinos, y por ende, la actividad pesquera. Además, las condiciones atmosféricas, afecta el clima global, actuando sobre los recursos hídricos y la agricultura, como cambios en la dirección y velocidad de los vientos y desplazamientos de las zonas de lluvias en la región tropical; lo que trae consigo sequías, erosión costera, inundaciones y tormentas tropicales.

También afecta la actividad pesquera, ya que cambia la salinidad de las aguas, por lo tanto la fauna marina. En Chile, "El Niño" produce un aumento en la cantidad de precipitaciones en la zona central en invierno; y "La Niña" produce sequías, en el Norte y Central de Chile.

En la actualidad, el término ENSO, no sólo se usa para identificar la unión del "El Niño" con la fase negativa de la "Oscilación del Sur", sino que se para describir, todo el conjunto de alteraciones de las condiciones normales del sistema océano-atmósfera del Pacífico Tropical; en el cual se pueden distinguir dos fenómenos: "El Niño" o fase cálida del ENSO y "La Niña" o fase fría del ENSO. ENSO es uno de los fenómenos más estudiados, hoy en día en el mundo.

En nuestro medio el fenómeno ENSO se da a fines de cada año, en un periodo de cada tres u ocho años, lo cual acelera el descongelamiento de nuestros glaciares.

2.3.10.7 Topografía

La topografía es una parte de la geodesia⁶ que se ocupa de la determinación de las posiciones relativas de los accidentes del terreno y su posterior proyección a escala, en un plano o mapa. La mayoría de los últimos estudios considera a la elevación como el factor más importante en la distribución de la nieve, gracias a la información topográfica (área, pendiente, elevación, aspecto).

⁶ La geodesia es la ciencia que estudia la forma geométrica y las dimensiones de la Tierra.

2.4 PRESENTACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

El área seleccionada corresponde al Glaciar de Chacaltaya, que se encuentra en la Cordillera Real de los Andes Bolivianos⁷, ubicado en latitudes tropicales, constituyendo el 2% aproximadamente de toda la superficie glaciar en Bolivia. (Figura 2.7).

Chacaltaya, es un Glaciar de Montaña, con exposición Sur, se caracteriza por la presencia de tres zonas morfológicas muy bien definidas:

- ❖ **Zona Alta:** muy inclinada (aproximadamente 35° de pendiente), angosta (alrededor de 120m. de ancho), presenta una grieta relativamente profunda, que se manifiesta normalmente en la época seca, representa aproximadamente el 25% del Glaciar. Se ubica entre los 5.375 y 5.275 m.s.n.m.
- ❖ **Zona Intermedia:** Con menor pendiente que la anterior (cercana a los 25°), representa la mayor parte del Glaciar (aproximadamente el 60%), donde además, se encuentra la parte más ancha del mismo (232m en 1997) se ubica entre los 5.275 y los 5.175 m.s.n.m.
- ❖ **Zona Baja o Final:** De forma alargada, con pendiente alrededor de los 30°, representa la menor parte del glaciar (aproximadamente el 15%) y se ubica entre los 5.175 y 5.120 m.s.n.m.

2.4.1 Ubicación

Es sitio de estudio corresponde al área que ocupa el Glaciar de Chacaltaya, el cual se ubica en la cordillera Real de Bolivia, comprendido entre las siguientes coordenadas:

Longitud Oeste 68° 06' 36'' y 68° 08' 52''

⁷ La Cordillera Real de Bolivia, se ubica entre la línea del Ecuador (0°) y la línea del trópico de Capricornio (a una latitud de 23° 27'), que marca el límite de los trópicos. *Extraído de Compton's Interactive Encyclopedia.*

Longitud Sud 16° 20' 00" y 16° 22' 06"

Políticamente el Glaciar de Chacaltaya se ubica en el cantón de Milluni, que corresponde a la jurisdicción municipal del Alto (Cuarta Sección de la Provincia Murillo en el Departamento de La Paz). **[Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, 1996]**.

2.4.2 Límites y Superficie

El Glaciar de Chacaltaya limita al Norte con la región de Milluni, el nevado de Huayna Potosí, el cerro Visuyo y el Nevado Charquini; al Sur con el cerro Estuquería y la ciudad de La Paz; al Este con el río Achachicala y el cerro Farellón; y al Oeste con el lago Milluni y el lago Milluni Chico.

La superficie aproximada de estudio en el año 1997 era de 140.000 m²., poseía una extensión máxima de 545 m. y su parte más ancha sobrepasaba los 230 m. Ahora en el 2007 tiene una superficie de 3.499 m². y un volumen de 1.400 m³.

2.4.3 Acceso

El acceso al Glaciar de Chacaltaya se realiza a través de dos vías: la primera por la carretera que une La Paz – Milluni – Valle de Zongo, la cual posee un desvío que confluye hasta la cabaña del Club Andino (parte media del Glaciar de Chacaltaya) o el Observatorio de Física Cósmica, cumpliendo un recorrido total de casi 34 km. Desde la ciudad de La Paz (aproximadamente 45 minutos de viaje). La segunda vía de acceso, es por el barrio de la Ciudadela Ferroviaria, hasta llegar al campamento Kaluyo y seguir más adelante con la carretera La Paz – Milluni, completando un recorrido total de 25 km. hasta la cabaña del Club Andino.

2.4.4 Altitud

La Altitud del Glaciar de Chacaltaya está entre los 5.120 m.s.n.m. al nivel del frente glaciar, y 5.375 m.s.n.m. al nivel de la cumbre nevada del Glaciar.

2.4.5 Clima

De la información meteorológica obtenida, podemos extraer:

- Temperatura Media Anual: entre 1 y -1 °C
- Temperatura Media del Mes más cálido: entre 4 a 7 °C
- Temperatura Media del Mes más frío: entre -3 y -7 °C
- Precipitación Anual: alrededor de 600 mm.

De acuerdo a la clasificación de W. Köppen, y considerando la información que dispone (solamente datos de temperatura, precipitación y rasgos característicos de área de estudio), el tipo de clima que le correspondería, sería de tipo ETH, es decir, un Clima de tundra (carente de árboles), correspondientes a zonas de altas montañas en latitudes tropicales, con temperatura media del mes más cálido inferior a 10 °C.

Según la clasificación de Trewartha Robinson, el Clima del área de estudio correspondería, a un Clima Frío de Tierras Altas con nieves perpetuas y precipitaciones siempre sólidas.

2.4.6 Geología

Según Dobrovolny, la Cordillera Real, ofrece un perfil estratigráfico completo del Plio – Cuaternario. Por los estudios realizados por Sánchez, los terrenos del área de estudio y los adyacentes, estarían constituidos por las llamadas “pizarras de la Cordillera Real”, con una edad Silúrica.

De acuerdo a la Tesis de Grado de Sánchez y al Mapa Geológico de Milluni, en el área de estudio, se encuentran las siguientes unidades estratigráficas: ^B

^B El Mapa Geológico de Milluni, a escala 1:50.000, fue elaborado por Bernd Lehman y Alberto Sánchez. Adaptación y producción por Technische Fachhochschule, Belín 1997.

Tabla 2.1. Unidades Estratigráficas Presentes

ERA	PERIODO	CARACTERÍSTICAS
CENOZOICO	Cuaternario	Material suelto no diferenciado. Material coluvial. Morrenas Glaciares Suelos Estructuras, Turba
PALEOZOICO	Silúrico	Formación Catavi (cuarcitas lúlitas) Formación Uncía(lúlitas)

Fuente: [Sánchez 1997; Mapa Geológico de Milluni]

2.4.7 Hidrografía

En el área de estudio se puede observar una serie de riachuelos producto del deshielo, de corto recorrido, no muy caudalosos y en su mayoría fluyen como aguas subterráneas dentro de los depósitos cuaternarios para desembocar en la Laguna de Milluni o en lagunas de Kellhuany, Laguna de Chacaltaya, Laguna Laram Kkota, y otras más pequeñas, las mismas que se comunican con otros riachuelos, hasta confluir aproximadamente a los 5.000 m.s.n.m. en las aguas nacientes del río Kaluyo, el cual cambia de nombre aguas abajo con el de Choqueyapu.

2.4.8 Geomorfología

El paisaje que presenta el área circundante al Glaciar de Chacaltaya presenta cambios abruptos en el terreno, con elevaciones que sobrepasan los 5.000 m.s.n.m., las crestas son irregulares y con pendientes fuertes. El modelamiento del

relieve se debe principalmente a procesos de glaciación, erosión y meteorización, sumando a factores climatológicos que juegan un rol importante.⁹

El drenaje de la zona es de tipo enrejado subparalelo, y es controlado por la litología. La acción de agua, principalmente actúa como agente de meteorización física en el proceso de desintegración de las rocas.

El Glaciar de Chacaltaya, en su movimiento a través del tiempo, fracturado y destruido el material rocoso (por la acción abrasiva del hielo), acumulándolo e incorporándolo al paisaje, como depósitos glaciares no diferenciados, sin estratificación y de considerable volumen, conocidos como morrenas.

Las morrenas evidencian los movimientos del Glaciar, tienen una topografía ondulada, cuyos muros alcanzan una altura alrededor de los 10 m. reduciéndose gradualmente hacia la parte central del valle en forma escalonada. Una característica importante, es que gran parte de los clastos de las morrenas recientes rodaron por efecto de la gravedad, hasta confundirse con el material de morrenas mucho más antiguas. A pesar de ello, en la zona se pudieron distinguir los siguientes tipos de morrenas:

❖ **Morrenas Superficiales**

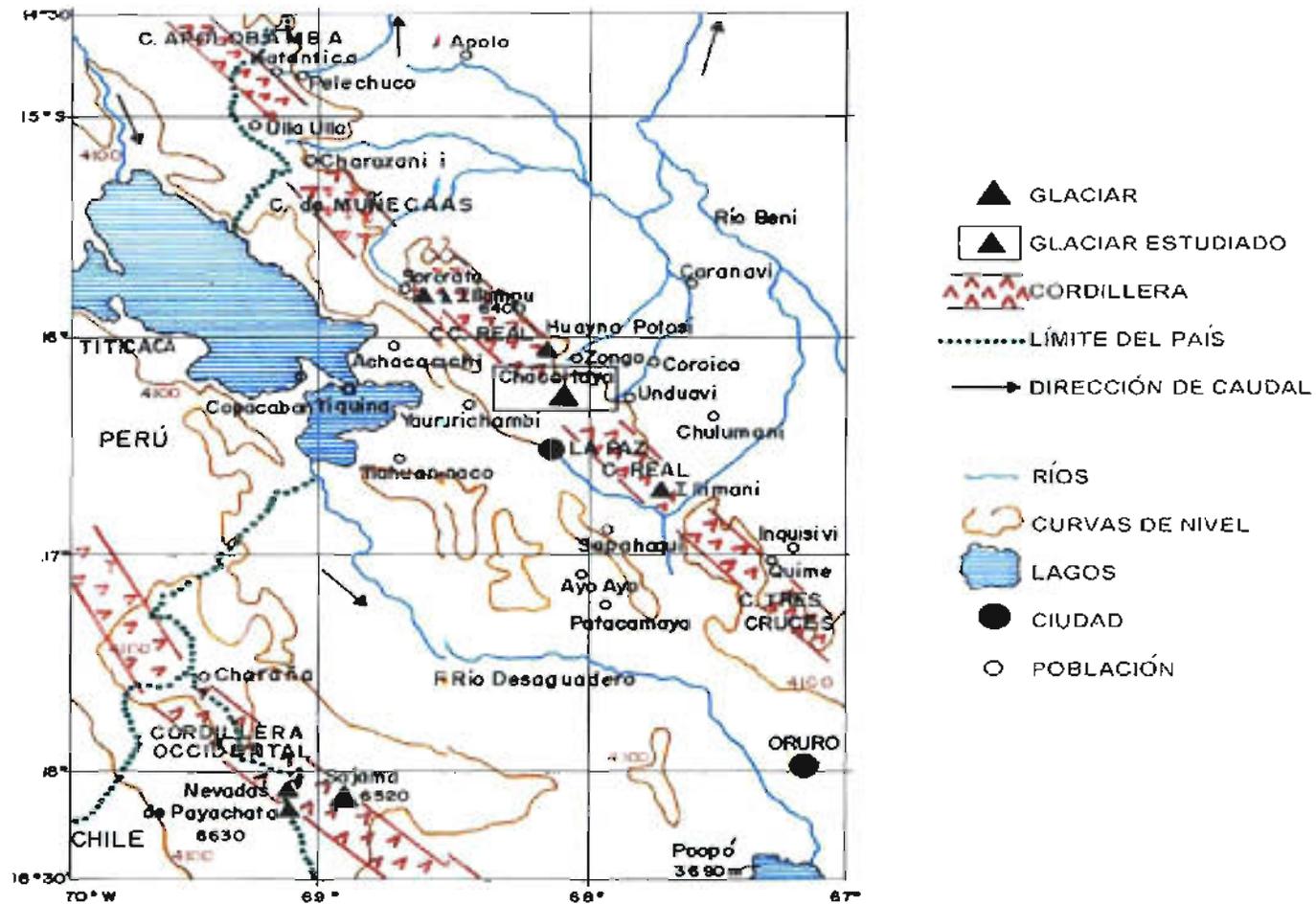
Se forman en los márgenes laterales del Glaciar, alimentados por detritos que proporcionan los valles laterales situados a niveles medios del Glaciar. Estas morrenas son longitudinales, alargadas en dirección Norte – Sur y paralelas al eje del valle.

❖ **Morrenas Finales**

Se manifiestan en el área en forma de arcos morrénicos, que estacan lagos como el Laram Khota. Actualmente estas morrenas, se encuentran erosionadas y sólo quedan remanentes de regular desarrollo.

⁹ La periodicidad de las precipitaciones y el cambio brusco diario de temperatura en la zona, son factores fundamentales para el desarrollo de los procesos geomórficos.

Figura 2.7. Ubicación del Glaciar en Estudio



Fuente: [Ramiro Cartagena, 1998].

Como producto del deshielo se forman ríos y aguas de escurrimiento de corto recorrido y poco caudaloso, fluyen como aguas subterráneas en gran parte dentro de los depósitos cuaternarios para desembocar en lagunas, que a su vez se comunican con el río Kaluyo o con el lago Milluni. Tanto las aguas de escurrimiento como los ríos, dan origen a los procesos de erosión transporte y deposición de detritos.

Por encima de los 5.000 m.s.n.m., el suelo se congela por la noche y cuando la temperatura aumenta en el día, sólo la parte superior se deshela (quedando suelo congelado o *permafrost*), entonces la sobrecarga (detritos), fluye hacia abajo por acción de la gravedad, y por el continuo aporte de agua proveniente del deshielo, generándose así deslizamientos lentos (solí fluxión), que a veces llegan a cubrir parte del camino que une Chacaltaya con la ciudad de La Paz, dificultando además, la transitabilidad al lugar. Estos deslizamientos constituyen taludes de derrubio conocidos comúnmente como “salleríos”. [CAR98].

2.5 METODOLOGIA PARA EI DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Un proceso de software detallado y completo suele denominarse “Metodología”. Las metodologías se basan en una combinación de los modelos de procesos genéricos (cascada, evolutivo, incremental, etc.). Adicionalmente una metodología debería definir con precisión los artefactos, roles y actividades involucrados, junto con prácticas y técnicas recomendadas, guías de adaptación de la metodología al proyecto, guías de uso de herramientas de apoyo, etc. Habitualmente se utiliza el término “método” para referirse a técnicas, notaciones y guías asociadas, que son aplicables a una (o algunas) actividades del proceso de desarrollo, por ejemplo suele hablarse de métodos de análisis y/o diseño.

La comparación y/o clasificación de metodologías no es una tarea sencilla debido a la diversidad de propuestas y diferencias en el grado de detalle, información disponible y alcance de cada una de ellas. A grandes rasgos, si tomamos como criterio las notaciones utilizadas para especificar artefactos producidos en actividades de análisis y diseño,

podemos clasificar las metodologías en dos grupos: Metodologías Estructurales¹⁰ y Metodologías Orientado a Objetos.

2.5.1 Metodología Orientadas a Objetos

Actualmente se encuentran en una etapa de madurez el enfoque Orientado a Objetos (OO) como paradigma del desarrollo de sistemas de información. La tecnología OO constituye la base de la reutilización de código por medio de componentes.

En 1995 Booch y Rumbaugh proponen el Método Unificado con la ambiciosa idea de conseguir una unificación de sus métodos, que posteriormente se reorienta a un objeto más modesto, para dar lugar al Unified Modeling Language (UML), la notación OO más popular en la actualidad.

El lenguaje de Modelado Unificado (UML) es el estándar adoptado por el Object Management Group (OMG) y mundialmente aceptado para la descripción de todos los niveles de desarrollo de software. Utilizando UML se puede tener un lenguaje de comunicación que todos los interesados del proyecto puedan entender y por tanto es tan solo una parte de un método de desarrollo de software.

2.5.2 Lenguaje de Modelado Unificado (UML)

El lenguaje de Modelado Unificado (UML) es la creación de Grady Booch, James Rumbaugh e Ivar Jacobson. UML es un lenguaje de modelado estandarizado que consiste en un conjunto de diagramas, tiene el objetivo de colaborar a los diseñadores de productos software en el desarrollo de sistemas de información, realizando las siguientes tareas: especificación, visualización, plan de la arquitectura, construcción, simulación y documentación. UML se desarrollo originalmente con la idea de promover la comunicación y productividad entre los

¹⁰ Estas metodologías comenzaron en los años 70's, son particularmente apropiadas en proyectos que utilizan para la implementación lenguajes de 3ra y 4ta generación.

diseñadores orientados a objetos logrando rápidamente incursionar dentro de cada tipo y desarrollo del producto software. [LAR99].

UML es un estándar de facto para el modelado orientado a objetos y continua siendo refinado en nuevas versiones por el Grupo de Gestión de Objetos (OMG). Cabe mencionar que UML es sólo un lenguaje y por tanto es parte de un método de desarrollo de software, independientemente del proceso. [SOM05].

UML esta compuesto por diversos elementos gráficos que se combinan para conformar diagramas, debido a que es un lenguaje de modelado, cuenta con reglas para combinar tales elementos. La finalidad de los diagramas es presentar diversas perspectivas de un sistema, a los cuales se los conoce como modelo. Los diagramas UML de un sistema son similares a un modelo a escala de un edificio junto con la interpretación del artista acerca del edificio. [SCH97].

A continuación se listan los diagramas que componen el UML:

- ❖ **Diagramas de Clases:** Muestran un conjunto de clases, interfaces y colaboraciones, así como sus relaciones. Estos diagramas son los más comunes en el modelado de sistemas orientados a objetos y cubren la vista de diseño estática o la vista de procesos estática (sí incluyen clases activas).
- ❖ **Diagramas de Objetos:** Muestran un conjunto de objetos y sus relaciones, son como fotos instantáneas de los diagramas de clases y cubren la vista de diseño estática o la vista de procesos estática desde la perspectiva de casos reales o prototípicos.
- ❖ **Diagramas de Casos de Usos:** Muestran un conjunto de casos de uso y actores (tipo especial de clases) y sus relaciones. Cubren la vista estática de los casos de uso y son especialmente importantes para el modelado y organización del comportamiento.

- ❖ **Diagramas de Secuencia y de Colaboración:** Tanto los diagramas de secuencia como los diagramas de colaboración son un tipo de diagramas de interacción. Constan de un conjunto de objetos y sus relaciones, incluyendo los mensajes que se pueden enviar unos objetos a otros. Cubren la vista dinámica del sistema. Los diagramas de secuencia enfatizan el ordenamiento temporal de los mensajes mientras que los diagramas de colaboración muestran la organización estructural de los objetos que envían y reciben mensajes. Los diagramas de secuencia se pueden convertir en diagramas de colaboración sin pérdida de información, lo mismo ocurren en sentido opuesto.
- ❖ **Diagramas de Estados:** Muestran una máquina de estados compuesta por estados, transiciones, eventos y actividades. Estos diagramas cubren la vista dinámica de un sistema y son muy importantes a la hora de modelar el comportamiento de una interfaz, clase o colaboración.
- ❖ **Diagramas de Actividades:** Son un tipo especial de diagramas de estados que se centra en mostrar el flujo de actividades dentro de un sistema. Los diagramas de actividades cubren la parte dinámica de un sistema y se utilizan para modelar el funcionamiento de un sistema resaltando el flujo de control entre objetos.
- ❖ **Diagramas de Componentes:** Muestra la organización y las dependencias entre un conjunto de componentes. Cubren la vista de la implementación estática y se relacionan con los diagramas de clases ya que en un componente suele tener una o más clases, interfaces o colaboraciones.
- ❖ **Diagramas de Despliegue:** Representan la configuración de los nodos de procesamiento en tiempo de ejecución y los componentes que residen en ellos. Muestran la vista de despliegue estática de una arquitectura y se relacionan con los componentes ya que, por lo común, los nodos contienen uno o más componentes.

El modelado de objetos se encuentra descrito en el diagrama de Clases, este diagrama es considerado como el principal para capturar todas las reglas que gobiernan la definición y uso de los objetos. *Sin embargo para modelar en producto software no es suficiente definir la herramienta, es necesario definir en primera instancia el método de desarrollo, que este caso particular es el modelo de desarrollo rápido (RAD).*

2.5.3 El Modelo Desarrollo Rápido de Aplicaciones (RAD)

El desarrollo de aplicaciones rápidas (RAD) es un modelo de proceso de software incremental que resalta un ciclo de desarrollo corto. El modelo RAD es una adaptación a “alta velocidad” del modelo en cascada en el que se logra el desarrollo rápido mediante un enfoque de construcción basado en componentes. Si se entienden bien los requisitos y se limita en ámbito del proyecto, el proceso RAD permite que un equipo de desarrollo cree un “sistema completamente funcional” dentro de un periodo muy corto (por ejemplo de 60 a 90 días).

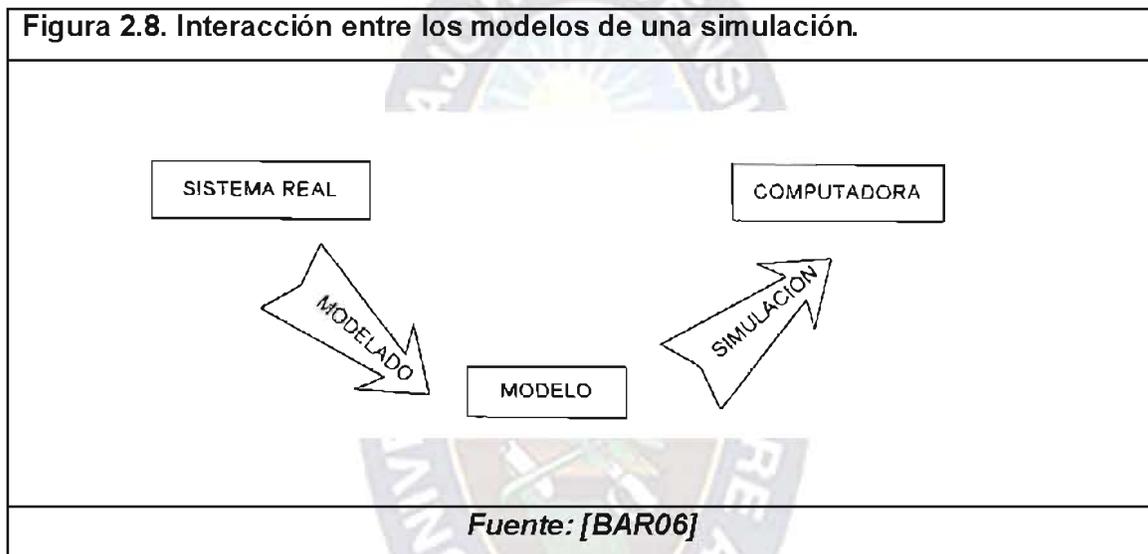
Como otros modelos de proceso, el enfoque RAD cumple con las actividades genéricas de Marco de Trabajo que son: La *comunicación* trabaja para entender el problema de negocios y las características de información que debe incluir el software. La *planeación* es esencial porque varios equipos de software trabajan en paralelo sobre diferentes funciones del sistema. El *modelado* incluye tres grandes fases –modelado del negocio, modelado de datos y modelado del proceso- y establece representaciones del diseño que sirven como base para la actividad de construcción del modelo RAD. La *construcción* resalta el empleo de componentes de software existente y la aplicación de la generación automática de código. Por último, el *despliegue* establece una base para las iteraciones subsecuentes, si éstas son necesarias. [PRE06].

2.5.4 Modelos de Simulación

Una simulación, como la palabra lo indica, pretende “simular” un proceso de un sistema real a través de un modelo que posteriormente es aplicado a una computadora (Figura 2.8). Es un entorno ambiental, que permita realizar un

análisis completo de los factores involucrados en dicho proceso, sin necesidad de recrearlo físicamente.

Una forma de coadyuvar a una planificación de un sistema es aprender de los errores cometidos anteriormente. Este aprendizaje implica que los encargados de tomar decisiones, pueden comparar – un modelo – con la realidad. Antes de encarar la simulación se debe tomar en cuenta definiciones concretas de sus componentes importantes como son modelos y sistemas.



2.5.5 Sistema

Como consecuencia de la determinación de los fines del estudio y de las características (aptitudes y actitudes) del investigador, sobre la realidad, se define un *sistema*. De acuerdo con una acepción del diccionario de la Lengua Castellana, “*Sistema es un conjunto de reglas o cosas, que ordenadamente contribuyen a un fin*”. Tal definición contiene los tres ingredientes básicos que configuran el concepto sistema:

- ❖ Existe un fin.
- ❖ Existe un Conjunto de cosas o normas.
- ❖ Tal conjunto está ordenado.

Para clarificar la idea que tiene un observador, sobre establecer diferentes sistemas, presentamos dos razones para ello. La primera, la finalidad, que puede ser diferente de un observador (o científico) a otro; y segunda, el entrenamiento del observador que, usualmente, será distinto. [MAR86].

2.5.5.1 Sistemas Dinámicos

Un sistema se llama dinámico si su salida en el presente depende de una entrada en el pasado. En un sistema dinámico la salida cambia con el tiempo cuando no esta en su estado de equilibrio.

Un sistema dinámico es aquel en el que el estado actual del sistema depende del estado anterior. El sistema dinámico más sencillo que podemos describir es:

$$y_t = f(y_{t-1})$$

Donde y es el valor de una variable y f es una función. Es decir el valor actual de y está determinado por su valor anterior, el tiempo t es una variable discreta.

2.5.5.2 Sistemas Complejos

El término de “Sistema Complejo” y “Complejidad” se prestan a muchas confusiones. Según algunos autores hay hasta 30 definiciones diferentes del concepto de complejidad. Por ejemplo para el padre de la vida Artificial Chris Langton, la Complejidad “es la ciencia que trata de describir a los sistemas que se encuentran al borde del caos”. El concepto de complejidad parece que no es el mismo para un informático, para un físico, un biólogo o un economista.

Un sistema complejo es aquel que está formado por un gran número de elementos idénticos, que interaccionan localmente y que dan lugar a algún tipo de comportamiento global que no se puede explicar a partir de las propiedades de un solo individuo sino como resultado de las interacciones de un colectivo. Algunos

ejemplos se sistemas complejos son: El cerebro, un ordenador, un hormiguero, un sistema social o económico.

2.5.6 Modelo

Una definición bastante generalizada de modelo es: *“una representación simplificada de la realidad en el que aparecen algunas de sus propiedades”*. De la definición se deduce que la versión de la realidad a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que queda representado por otro objeto o sistema de menor complejidad.

Los modelos se construyen para conocer o predecir propiedades del objeto real. Algunos autores llegan a incluir esta expresión de finalidad en la propia definición del modelo: un objeto **M** es un modelo de **X** para un observador **O**, si **O** puede utilizar **M** para responder a cuestiones que le interesan a cerca de **X**; o bien: *“un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica”*.

Es decir, con un modelo se intenta conocer la realidad representándola de forma más simple. La construcción de un modelo es un proceso denominado *modelo o modelación*.

En definitiva: *“Un modelo es una representación simplificada de un objeto o proceso donde se conservan algunas de sus propiedades”*.

❖ Ventajas de los Modelos

Los modelos se construyen para representar, conocer (estudiar) o predecir propiedades del objeto real. La representación simplificada permite cambiar las condiciones de estudio de forma favorable: Eliminando o simplificando componentes, variando las escalas espacial o temporal, Variando las condiciones de entorno (escenario), Evitando la actuación sobre objeto real.

❖ Riesgos

Existen varios tipos de error inherentes al proceso de modelación. Por ejemplo: por la selección de componentes (reducción de complejidad del sistema), error de generalización (la simplificación en la representación de los elementos): el trazado de una carretera se simplifica más o menos en función a la escala y no se conservan algunas de sus propiedades. El último riesgo es la inestabilidad del sistema, es decir el comportamiento de un modelo puede ser correcto sólo en dominio limitados de las variables; en otros valores el sistema genera resultados erróneos. [FEL02].

Los dos fines básicos del proceso del modelado son: primero, reproducir el comportamiento histórico (pasado) de los principales elementos (variables) del sistema; el segundo, disponer de un procedimiento con que simular el comportamiento futuro de dicho sistema, ante posibles y diversas hipótesis. [MAR86].

2.5.7 Simulación

Es una técnica numérica para conducir experimentos en un computador digital los cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos, que describen el comportamiento de un negocio o un sistema económico (o algún componente de ellos) u otro tipo de sistema en periodos extensos de tiempo real; dado que en la simulación no pretende resolver analíticamente las ecuaciones de un modelo, por lo general un modelo matemático construido para los propósitos de simular es de naturaleza distinta a un formado para técnicas analíticas. [GEO80].

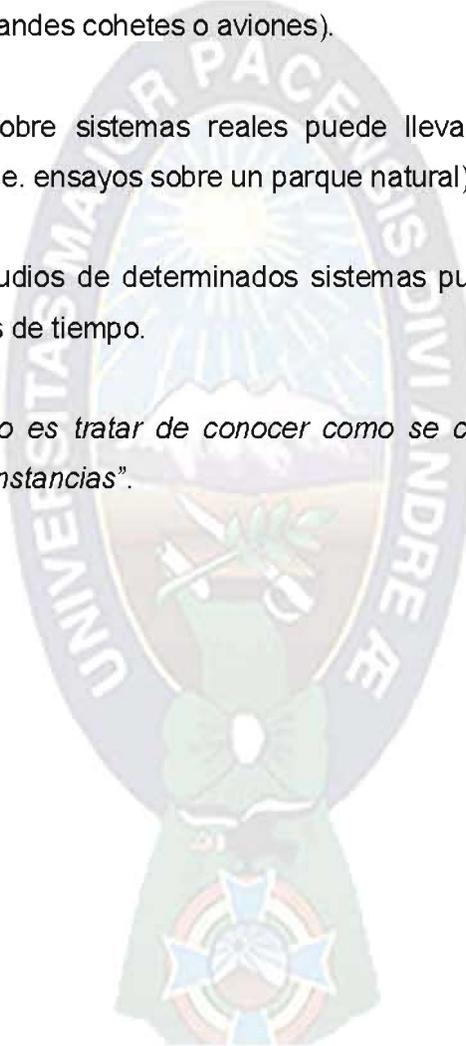
El objetivo inmediato de un modelo es representar esquemáticamente, pero de manera precisa y útil, la historia y estado actual de un sistema. Sin embargo, el fin último del modelado (sobre todo el modelado matemático) es proyectar hacia el futuro cuáles pueden ser los diferentes estados del sistema, ante diferentes

hipótesis (o “escenarios”). *Simulación* es la generación de posibles estados del sistema (o “imágenes”) por medio del modelo que lo representa. [MAR86].

La *simulación* se ha convertido en un procedimiento frecuente en la prospectiva de sistemas por alguna de estas razones:

- ❖ Ensayar sobre sistemas reales (prototipos) puede ser muy costosa (p.e. el caso de grandes cohetes o aviones).
- ❖ Ensayar sobre sistemas reales puede llevar a la destrucción de los mismos (p.e. ensayos sobre un parque natural).
- ❖ En los estudios de determinados sistemas puede ser interesante alterar las escalas de tiempo.

“Simular un modelo es tratar de conocer como se comportara el sistema bajo determinadas circunstancias”.



CAPÍTULO 3

CONSTRUCCIÓN Y FORMALIZACIÓN DEL AUTÓMATA CELULAR ACN2D



*El éxito es fácil de obtener,
lo que es difícil es merecerlo.
Albert Camus.*

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo nos enfocaremos en la construcción del modelo de simulación del deshielo del Glaciar Tropical Andino, *la montaña de Chacaltaya*. Esta simulación esta basada en la técnica de Autómatas Celulares, a la cual llamaremos ACN2D, para el cuál será necesario contar con datos proporcionados por un SIG e información climatológica, para posteriormente formar parte del ACN2D.

El capítulo 2 nos sirvió para exponer el marco teórico referente al presente trabajo, con lo cual nos proporcionó las bases teóricas y las herramientas necesarias para alcanzar nuestro objetivo.

A continuación se establece de manera general cada uno de los pasos, que se seguirá para la construcción y formalización del modelo ACN2D. Para luego hacerlo en forma más detallada.

3.2 DESCRIPCIÓN FORMAL DEL MODELO

El modelo de ACN2D nos permite generar la reducción de la mancha de hielo del Glaciar de Chacaltaya, a través de la simulación. A partir de un conjunto de imágenes digitalizadas del Terreno de Chacaltaya (MDT)¹¹, y datos estadísticos de los factores que influyen a este fenómeno. El ACN2D evolucionara a través del tiempo gracias a las reglas de transición que se establecerán, hasta que lleguen a un estado de equilibrio. En la Figura 3.1 se muestra el esquema del modelo.

3.2.1 Componentes

El modelo de *Simulación del Deshielo*, llega ha ser dividido en 2 partes, el primer componente es el Autómata Celular, quien se encarga del proceso de la simulación de la reducción de la mancha de hielo del glaciar de Chacaltaya bajo las reglas de transición. El segundo componente es la información de la zona de estudio, esta información es importante para el proceso de simulación, ya que sirve como entrada de información (MDT, precipitación, temperatura, etc.).

3.2.2 Variables

Cada componente descrito anteriormente, se encuentra formado por un conjunto de variables que determinan los sucesivos estados adoptados por el componente a través del tiempo. A continuación se detallan las variables que forman parte de cada componente. (Tabla 3.1).

¹¹ MTD, se define en el capítulo 2.

Figura 3.1 Estructura del Modelo Mediante el AC.

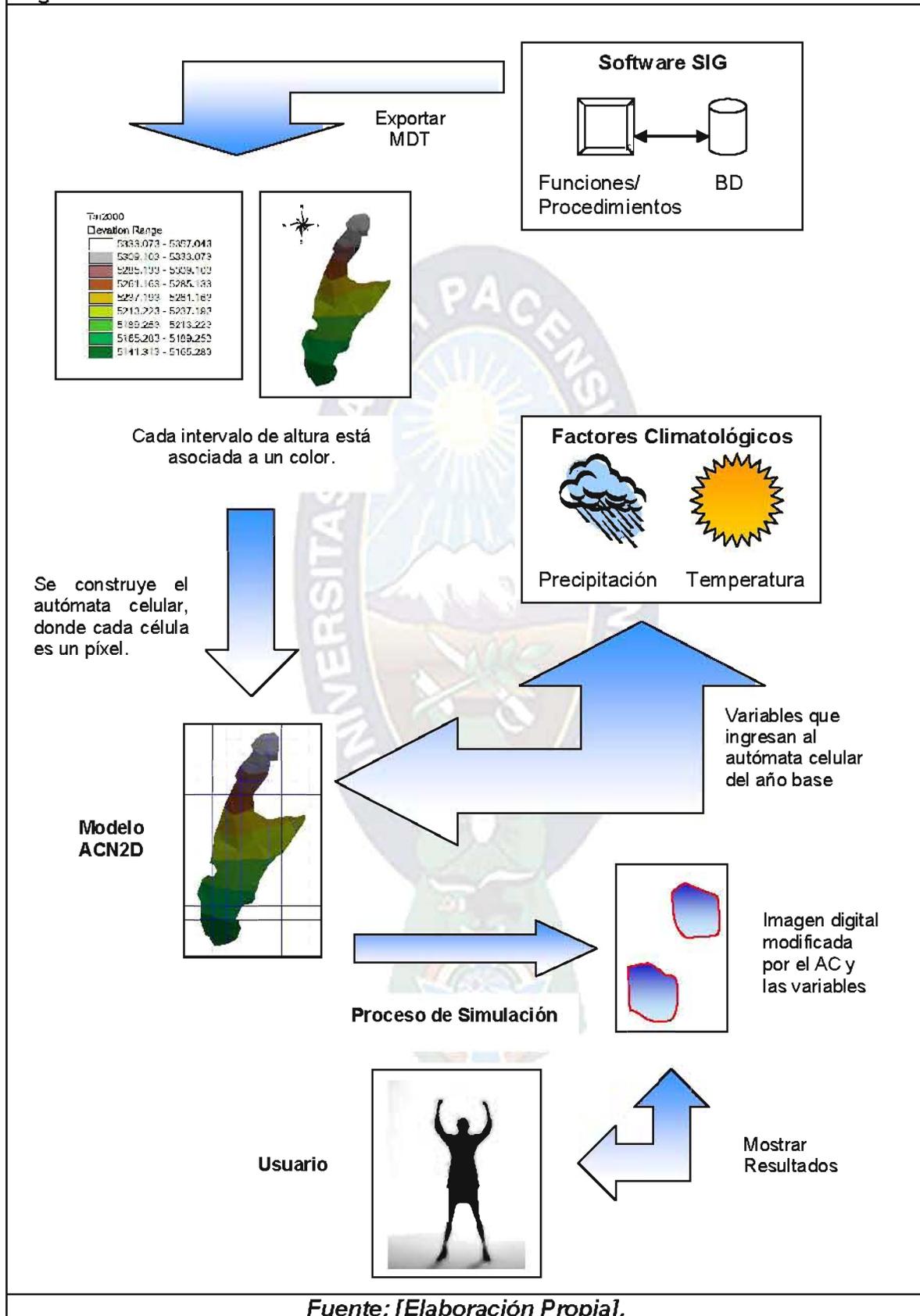


Tabla 3.1 Variables de cada Componente

VARIABLE	SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	RANGO ®
Retícula	(L)	Es el espacio sobre el cual evolucionará el Autómata Celular, para el presente trabajo consideramos espacios 2D.	{ n x m }
Vecindad	(N)	Para nuestro caso se considera la vecindad de Moore con radio 1.	{ r = 1 }
Conjunto de Estados	(S)	Son los estados por cada célula de la retícula, en nuestro caso utilizaremos 3 estados.	{ 0, 1, 2 }
Regla de Transición	(f)	Es la que define la dinámica del prototipo de un tiempo t a un tiempo t + 1.	{ k ² r }
Imagen(s) Digital	(Im)	Es la entrada al prototipo, el cual nos permitirá establecer los elementos principales del autómata como son las células.	{ n x m }

3.3 CONSTRUCCIÓN DEL AUTÓMATA CELULAR

La descripción formal de la simulación comprende esencialmente en la *Construcción del Autómata Celular*, el que nos permitirá llevar a cabo la simulación de la reducción de la mancha de hielo del glaciar en estudio.

Como ya se definió en el capítulo 2 del marco teórico, para la construcción de un Autómata Celular es necesario determinar los elementos que lo comprenden, es decir los elementos de la cuádrupla (*L* , *S* , *N* , *f*). Por lo tanto es necesario determinar lo siguiente: *reticulado o látice, conjunto de estados, tipo de vecindad, reglas de transición.*

3.3.1 Retícula (L)

Cuando se realizan simulaciones de determinados comportamientos en estudio, varios casos se utiliza mapas, imágenes satelitales o imágenes digitalizadas de zonas observadas. Para esto la información geográfica que poseen estas imágenes debe ser extraído y llevado a un medio en el que pueda ser estudiado y evaluado.

Para que el ACN2D pueda filtrar la información, en primer lugar se establece que estas imágenes digitalizadas se las debe ver como un sistema de coordenadas o georeferenciado, y que cada *píxel*¹² es una fuente de información que es importante al momento de construir el ACN2D. (Figura. 3.2).

3.3.1.1 Determinación de la Dimensión

Las estructuras matriciales que se pueden tomar para el modelado de un Autómata Celular son las *uni-dimensionales*, *bi-dimensionales*, *tri-dimensionales*, etc. Correspondientes a: ***D=1***, ***D=2***, ***D=3***, ..., etc. Respectivamente.

La dimensión que se considera aplicable al modelo de simulación es la ***bi-dimensionales (D=2)*** después de haber descartado otras dimensiones, por las siguientes razones. Como una opción para el modelado se tenía uni-dimensional ***D=1***, pero no se la puede adoptar debido a su incapacidad para representar el área geográfica. La opción tri-dimensiona ***D=3***, se la puede adoptar pero la representación en esta dimensión se hace más compleja, de esta manera descartamos las dimensiones mayores o iguales a tres.

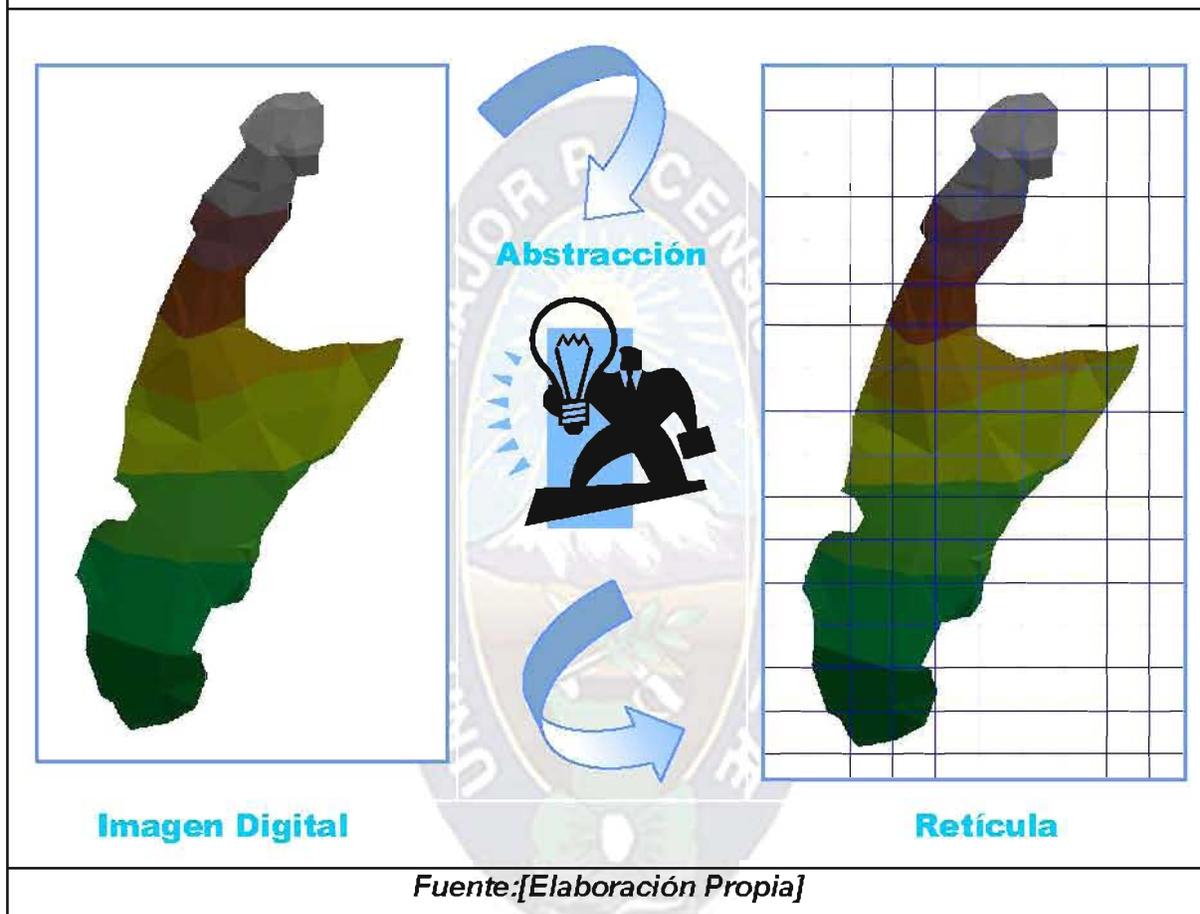
3.3.1.2 Determinación del Borde

Un aspecto importante para la retícula son las condiciones límite y la solución que se da en este caso de células frontera. Para el presente trabajo se ha visto por

¹² Píxel: tiene una intensidad de luz que en las computadoras alcanza de 0 y 255 tonalidades. Es información necesaria para el proceso de simulación

conveniente la utilización de Bordes Absorbentes, los cuales no consideran vecinos mas allá del retículo definido.

Figura 3.2 Abstracción de la Imagen Digital.



Entonces sea el Autómata Celular ACN2D donde:

El número de *filas* (n), será el número de pixeles requeridos para la representación de la longitud de la imagen digital, por tanto n pertenece a \mathbb{Z}^+ y $n \geq 1$.

El número de *columnas* (m), será el número de pixeles requeridos para la representación del ancho de la imagen digital, por tanto m pertenece a \mathbb{Z}^+ y $m \geq 1$.

Los índices de la *fila (i)* y *columna (j)*, representan el número de filas y columnas actual. Por lo cual i, j pertenecen a Z^+ y $(i, j) \geq 1$ e $i \leq n, j \leq m$, es decir $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ y $j = \{1, 2, 3, \dots, m\}$.

Los elementos simbolizados por la *matriz ACN2D(i,j)*, representan los valores de la celda en la *posición i,j*.

La *dimensión* de ACN2D será $(n \times m)$, y representa el número de celdas del ACN2D, correspondiente con el número de píxeles requeridos para representar la imagen digital, por tanto $n \times m$ pertenecen a Z^+ .

3.3.2 Conjunto de Estados (S)

La determinación del conjunto de estados (**S**) para el ACN2D requiere conocer todos los valores de la vecindad (**N**) presentes en nuestro prototipo de simulación, representado con imágenes digitales del Terreno en estudio (**Im**), que obedece al modelo de datos ráster de un SIG. (Figura 3.3)

El conjunto de estados (**S**) para cada celda del ACN2D. Será:

$$S = \{0, 1, 2\}$$

Es decir un tiempo t una celda del ACN2D puede estar en los siguientes valores:

$$ACN2D(i, j)^t = \begin{cases} 0, & \text{si la celda no forma parte del área cubierta de nieve} \\ 1, & \text{si la celda forma parte del área cubierta de nieve} \\ 2, & \text{si la celda representa una influencia de cambio de estado} \end{cases}$$

Donde $ACN2D^t$, representa a una celda en el tiempo t .

Figura 3.3 Conjunto de estados para ACN2D			
Estado		Descripción	
Área fuera de la nieve (0)			Una célula en estado 0, indica que esta fuera del área cubierta de nieve.
Área cubierta de Nieve (1)			Una célula en estado 1, nos indica que forma parte de área cubierta de nieve, y tiene que someterse al análisis de píxel.
Influencia de No Nieve (2)			El la célula que representa una influencia importante de sus vecinos, para que su estado original sufra una transición a otro estado.
<i>Fuente: [Elaboración Propia].</i>			

3.3.3 Tipo de Vecindad (N)

Como se pretende generar el la reducción de la mancha de hielo, a partir de un punto inicial, y debido que puede ir en estás direcciones $\{ NE, E, SE, S, SO, O, NO, N \} = 8$, es decir al *nor este, este, sur este, sur, sur oeste, oeste, nor oeste, norte*, se debe considerar los estados de la ocho celdas proximás a la célula central, para cambiar de estado se adopta la **vecindad de Moore**, con radio igual a 1 ($r=1$).

Por tanto definiremos la vecindad que denotaremos con (**N**) con la que trabajaremos de la siguiente manera. (Figura 3.4).

3.3.4 Conjunto de Reglas (f)

La determinación de las reglas de transición, son un aspecto muy importante en la construcción del ACN2D, debido a que estas determinan la dinámica del prototipo y la evolución de las células a partir de una configuración en un tiempo t a una distinta configuración en un tiempo $t+1$.

El estado de cada una de las celdas del ACN2D en el tiempo $t+1$ depende de la configuración del vecindario en el tiempo t y de un conjunto de atributos de las celdas del vecindario, que se encuentra en la matriz de píxeles, el cual estará generado por el modelo de datos del terreno (MDE) a través de un Sistema de Información Geográfico (ArcView). Además estas celdas estarán asociadas a los factores que influyen al retroceso del glaciar de Chacaltaya y su respectiva probabilidad.

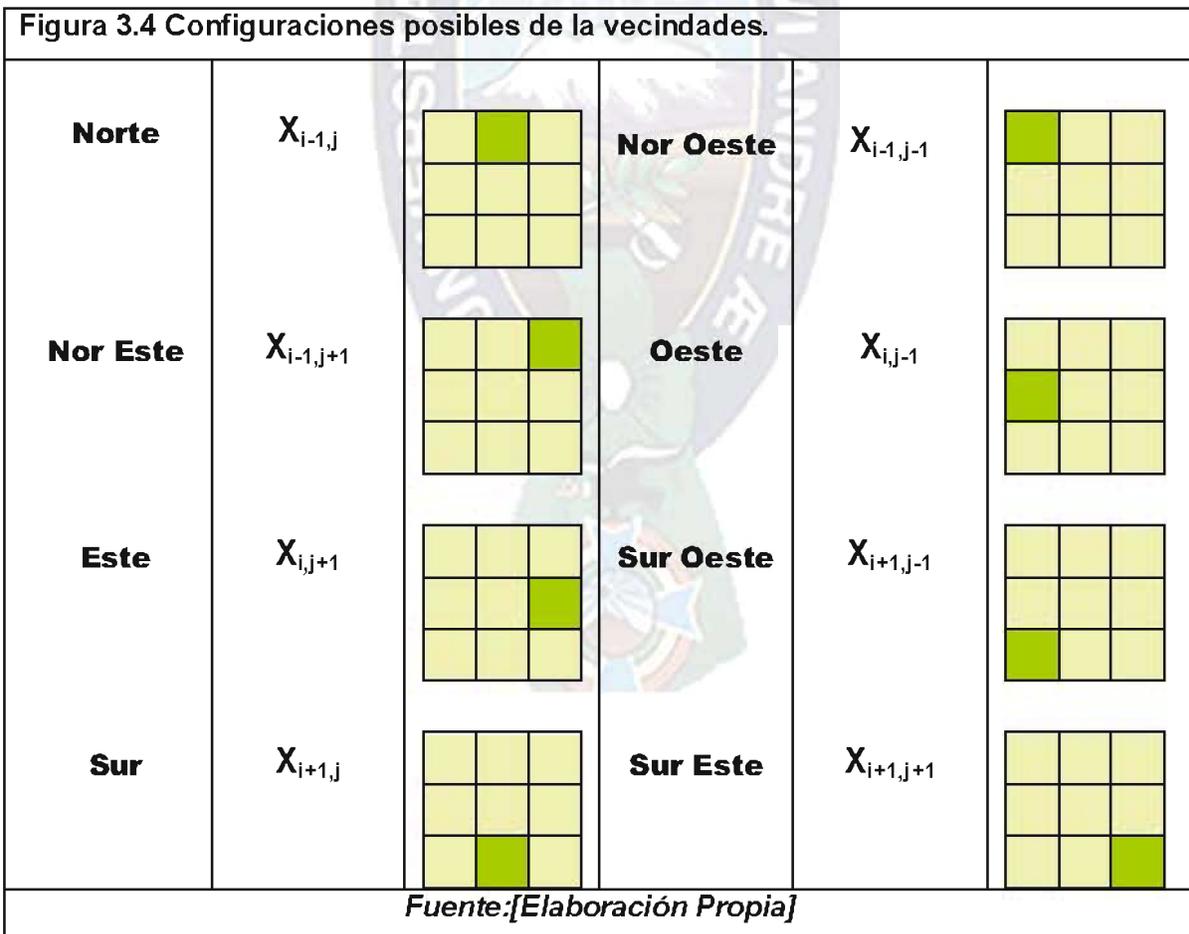
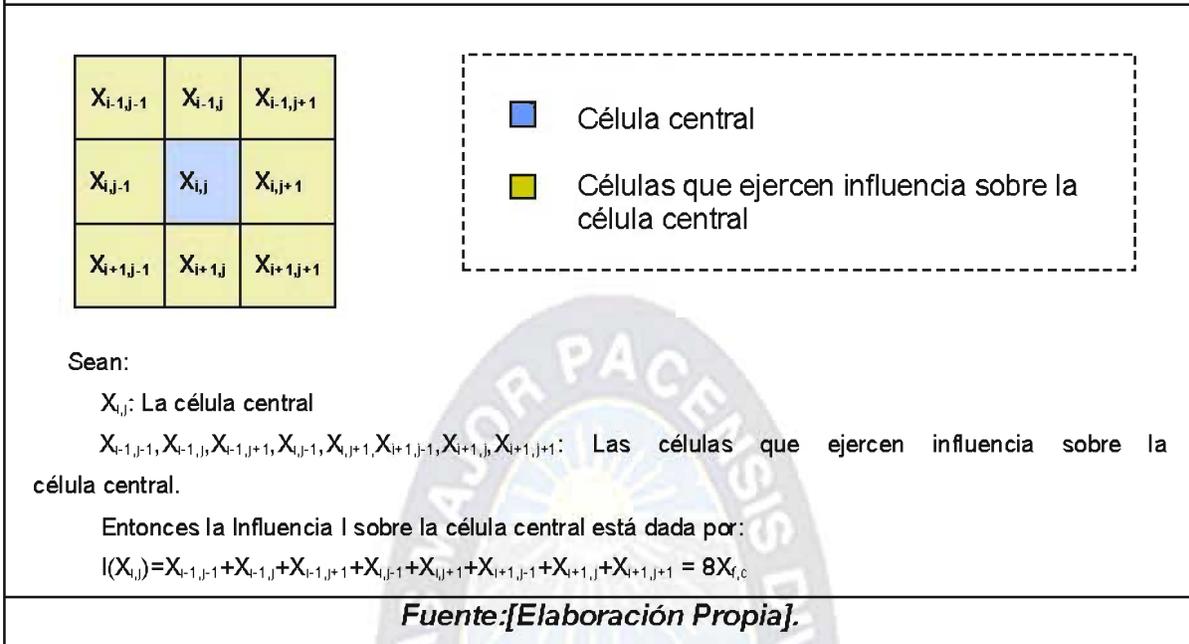


Figura 3.5 Influencia sobre la célula central.



Es el conjunto de células $X_{i-1,j-1}, X_{i-1,j}, X_{i-1,j+1}, X_{i,j-1}, X_{i,j}, X_{i,j+1}, X_{i+1,j-1}, X_{i+1,j}, X_{i+1,j+1}$ alrededor de la célula central $X_{i,j}$, el cuál se encarga de ejercer influencia, sobre esta. (Figura 3.5).

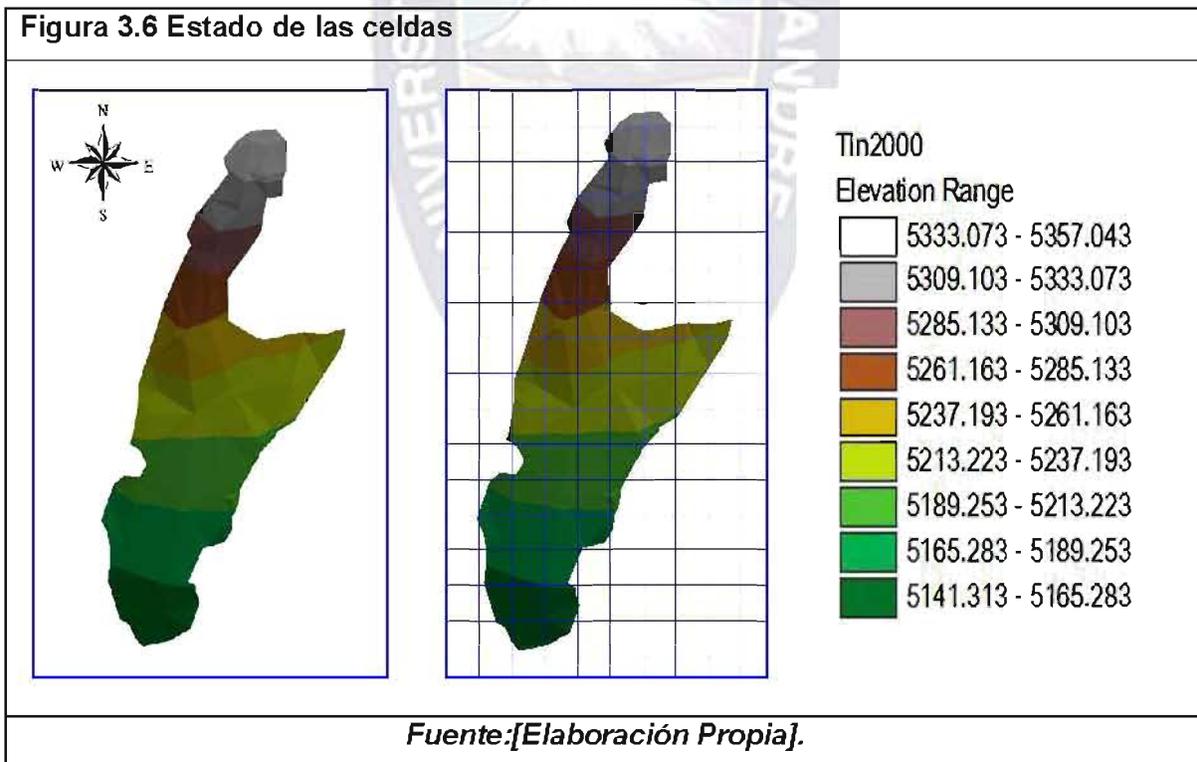
Como se ha establecido anteriormente la vecindad que se utiliza es la *vecindad de Moore*, la cuál esta formada por una célula central y ocho vecinas alrededor de esta. El número de estados que adoptará el autómata celular es $\{0, 1, 2\}$.

Reglas de evolución:

- ❖ Como inicio tenemos la imagen digital del terreno de in año base, un Modelo de Datos de elevación georeferenciado. Generado por un SIG.
- ❖ Como segundo paso se construye la retícula, es decir la matriz $\{n \times m\}$, para luego extraer la información de cada píxel.

- ❖ El tercer paso es el análisis de cada célula o pixel, en la *figura 3.6* se observa la altura promedio del terreno. Es decir el las coordenadas $z = (x,y)$ representa la posición del terreno.
- ❖ El eje **Z** es el atributo interpolado (altura promedio del terreno), ya que las imágenes digitales cuentan con la curvas de nivel del terreno.

Por medio de este intervalo de colores, que representan la altura promedio de la montaña del Chacaltaya, se observa que la máxima altura es de color blanco y tiene menor probabilidad que pierda nieve, por el contrario la mínima altura promedio es de color verde oscuro, es más probable que pierda nieve. Además por medio de la interpolación se ha dividido en nueve intervalos con sus respectivas alturas y colores, con lo cual se podrá obtener la evolución del Autómata celular.



Una vez construido el autómata celular se asocia los factores climatológicos que influyen al retroceso del glaciar de Chacaltaya como ser la precipitación promedio

por año y la temperatura promedio. Además se considera para las pruebas de la simulación la superficie y volumen por año.

Tabla 3.2 Precipitación y Temperatura promedio por año.

Año	Precipitación [mm]	Temperatura [°C]
2000	64.58	-0.5
2001	77.06	-0.1
2002	66.79	-0.8
2003	72.60	-0.1
2004	55.29	-0.1
2005	53.52	0.0
2006	69.56	-0.2
2007	66.32	0.3

Tabla 3.3 Superficie y Volumen promedio por año.

Año	Área	Volumen
	m2	m3
2000	51695	230111
2001	47860	230635
2002	47865	166008
2003	40409	120021
2004	29723	80196
2005	10035	29759
2006	7197	17789
2007	3501	9881

Una vez establecidos todos los elementos y las condiciones bajo las cuales se realizará la simulación del deshielo, estamos en condiciones de plantear las reglas de transición.

Sea:

Im: la imagen digital del terreno en estudio de dimensión $n \times m$.

L: la retícula regular cuadrada dispuesta sobre ***Im*** de dimensión $n \times m$.

- S:** los estados del Autómata Celular, $S = \{0, 1, 2\}$.
- N:** el conjunto finito de vecindades de Moore (cuyos elementos son un conjunto finito de células), que se representan como una matriz de dimensión $(n \times n) = \dim(N)$, donde N es subconjunto de Im y $\dim(N) < \dim(Im)$.
- V:** el conjunto finito de vecinos respecto a la célula central de la vecindad de Moore, con $V=8$.
- X_0 :** la célula central en estudio; donde $X_0 = X_{i,j}$.
- X_1, \dots, X_v :** los vecinos de la célula central, con $X_1, \dots, X_v = X_{i-1, j-1}, \dots, X_{i+1, j+1}$, para todo X_i en V .
- $f: S^n \rightarrow S$** es un conjunto finito de funciones o reglas de evolución que se trabaja en Im .

$$f^{t+1}(X_0) = \begin{cases} 0 & \text{si } X_0 = 0 \text{ y } N_{\min} \leq \sum P(X_i^t) \leq N_{\max} \\ 1 & \text{si } X_0 = 0 \text{ y } M_{\min} \leq \sum P(X_i^t) \leq M_{\max} \\ \alpha & \text{si } X_0 = \alpha \text{ con } \alpha \text{ pertenece a } \{0, 1, 2\} \end{cases}$$

De esta manera la cuádrupla (Im, S, N, f) del Autómata Celular ACN2D es un Autómata celular bi-dimensional que simula el deshielo del glaciar de Chacaltaya.

3.3.5 Asignación de Pesos de Probabilidad.

Sea la vecindad de Moore con radio igual a uno, entonces existen nueve células de las cuales la célula central $X_0 = X_{i,j}$ es la única que puede cambiar de estado

(convertirse a no nieve), las restantes ocho células $X_1, X_2, \dots, X_v = X_{i-1, j-1}, \dots, X_{i+1, j+1}$ son las sus vecinas las que ejercen influencia sobre esta.

1/8	1/8	1/8
1/8	X_0	1/8
1/8	1/8	1/8

Cada célula X_i (células vecinas de la célula central X_0) se encuentra en un estado s en un tiempo t , donde s pertenece a $S = \{0, 1, 2\}$, por lo que $X_i = s$. Por otro lado el estado s adopta una probabilidad $P(s)$ entonces $P(s) = P(X_i)$.

$$X_i = s \Rightarrow P(s) = P(X_i)$$

Además la sumatoria de las probabilidades de los ocho vecinos de la célula central debe ser menor o igual a uno, es decir:

$$\sum P(X_i) \leq 1$$

Esto hace suponer que la probabilidad $P(X_i)$ que adopten las ocho células vecinas debe ser $1/8 = 0.125 = M_{\max}$ como máximo en el mejor de los casos y $0 = N_{\min}$ como mínimo en el peor de los casos.

$$0 \leq P(X_i) \leq 1$$

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DEL PROTOTIPO



Los hombres que intentan hacer algo y fracasan están definitivamente mejor que los que tratan de no hacer nada y lo consiguen”.

Lloyd James

4.1 INTRODUCCIÓN

Después de haber terminado con la formalización del modelo, ahora debemos realizar la construcción de prototipo de la *Simulación del Deshielo Basado en Autómatas Celulares*, con el prototipo obtendremos los resultados que esperamos, los mismos no ayudarán a refutar o aceptar la hipótesis¹³ planteada en la tesis.

¹³ Hipótesis planteada en el Capítulo 1, sección 1:5.

La construcción del prototipo, implica hacer uso de la ingeniería de software, que nos ofrece métodos y técnicas para desarrollar software (en nuestro caso un prototipo ACN2D) de calidad y éxito.

Para el desarrollo del prototipo haremos uso de la metodología del Desarrollo Rápido de Aplicaciones (RAD)¹⁴, está compuesto básicamente de cuatro fases que pasaremos a detalle más adelante: *requerimientos, análisis, diseño, construcción y prueba*, esta metodología de desarrollo de software está enmarcado dentro de los modelos de proceso incrementales. Para el modelado del análisis se utilizará el Lenguaje de Modelado Unificado (UML), con la herramienta case *Rational Rose*.

4.2 REQUERIMIENTOS

En esta fase se establecen los requerimientos para poder desarrollar el prototipo.

- ❖ Analizar y diseñar el modelo para la construcción de la aplicación.
- ❖ Construir un prototipo de la aplicación planteada.
- ❖ Diseñar un modelo de simulación dentro de los objetivos de la presente investigación.
- ❖ Realizar las pruebas correspondientes, con la información que se tiene del glaciar de Chacaltaya.
- ❖ Evaluar la precisión y error del modelo de simulación para aceptar o rechazar la hipótesis.
- ❖ Realizar un reporte sobre la información que se obtuvo.

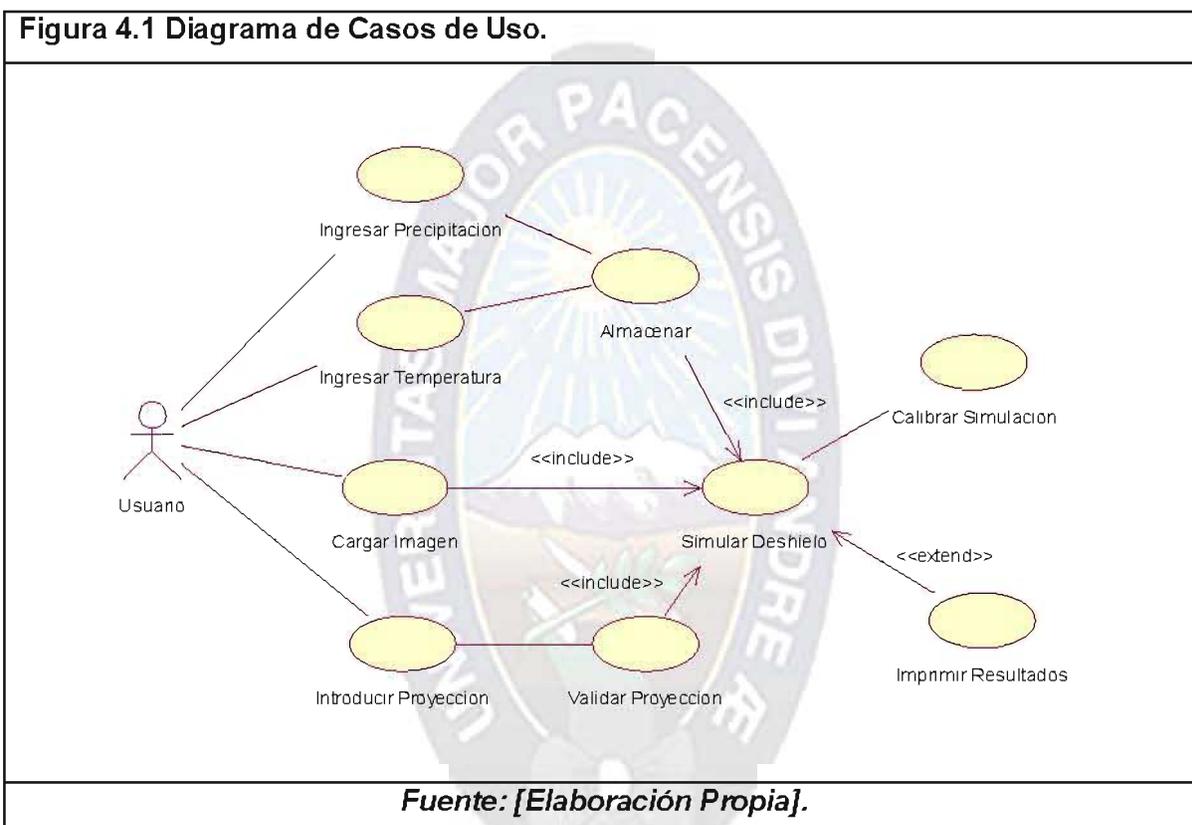
4.3 ANÁLISIS

El diagrama de casos de uso nos sirve como base para los primeros elementos del modelo de diseño, durante el análisis orientado de objetos. Los casos de uso representan diferentes niveles de abstracción de las entidades, atributos que interactúan en el sistema. **[PRE06]**. Para la presente investigación se desarrollo un diagrama de uso general del

¹⁴ RAD: para más información ver el capítulo 2, sección 2:5.

prototipo de *Simulación del Deshielo Basado en Autómatas Celulares*. Representado en la (Figura 4.1), la descripción textual de los elementos del diagrama de casos de uso se describe a continuación. (Tabla 4.1).

4.3.1 Diagrama de Casos de Uso



4.3.2 Descripción del Actor

Tabla 4.1 Descripción del Actor.

Actor:	Usuario
Tipo:	Primario
Descripción:	Es un actor primario y representa a todas las personas que cuenten con un cierto grado de conocimiento sobre el tema del retroceso del glaciar. (Ej. Un SIG, glaciólogo, ingeniero civil, etc.).

Fuente: [Elaboración Propia].

4.3.3 Descripción de los Casos de Uso

Tabla 4.2 Descripción de los Casos de Uso.

Nombre del Caso de Uso:	Ingresar Precipitación
Propósito:	Introducir la precipitación promedio de cada año para poder almacenar en la base de datos.
Precondición:	El usuario de ingresar los datos correctos del año y el promedio.
Poscondición:	Los datos son guardados en la base de datos.
Limitaciones:	Solamente se guardan y actualizan los datos.
Presunciones:	Ninguna identificada.

Nombre del Caso de Uso:	Ingresar Temperatura
Propósito:	Introducir la temperatura promedio de cada año para poder almacenar en la base de datos.
Precondición:	El usuario de ingresar los datos correctos del año y el promedio.
Poscondición:	Los datos son guardados en la base de datos.
Limitaciones:	Solamente se guardan y actualizan los datos.
Presunciones:	Ninguna identificada.

Nombre del Caso de Uso:	Cargar Imagen
Propósito:	Cargar una imagen digital de terreno (MDT) del año base en el prototipo, la cuál será modificada por el autómata celular.
Precondición:	Que exista la imagen digital del terreno del año base y también que se cuente con la información de los factores climatológicos de ese año.
Poscondición:	El usuario obtendrá esa imagen procesada por el autómata celular.
Limitaciones:	Solamente se deben cargar imágenes del Chacaltaya.
Presunciones:	Contar con una imagen digital.

Nombre del Caso de Uso:	Introducir año de proyección
Propósito:	Introducir el año de proyección, es decir el año horizonte que queremos simular.
Precondición:	Debe ser un año mayor al o los años con los que se tiene información
Poscondición:	Esté año se guarda en la base de datos para el reporte.
Limitaciones:	Ninguna identificada.
Presunciones:	Ninguna identificada.

Nombre del Caso de Uso:	Almacenar
Propósito:	Almacenar la información de los factores climatológicos en la base de datos, para poder consultarlas después.
Precondición:	La base de datos no acepta registros nulos.
Poscondición:	Los datos se almacenan para realizar una consulta de tipo (JOIN).
Limitaciones:	No se podrá eliminar los registros por la interfaz pero si modificarlos.
Presunciones:	Los datos de los factores climatológicos son reales.

Nombre del Caso de Uso:	Validar Proyección
Propósito:	Validar el año de proyección ya que no se podrá realizar una proyección al pasado, ni la información correspondiente.
Precondición:	El año de proyección debe ser real y correcto.
Poscondición:	Una vez que el año de proyección este limpio, entonces se podrá hacer la simulación.
Limitaciones:	Ninguna Identificada.
Presunciones:	El año de proyección debe ser introducido.

Nombre del Caso de Uso:	Simular el Deshielo.
Propósito:	Procesar la información que se tiene (factores climatológicos, factores topográficos), para que el autómatas celular los procese y se pueda realizar la

	simulación.
Precondición:	Se debe hacer la consulta a los factores climatológicos, contar con el año base y el año de proyección.
Poscondición:	La simulación al año horizonte y visualizada.
Limitaciones:	Solamente simula el glaciar de Chacaltaya.
Presunciones:	Que en la base de datos exista la información correspondiente.

Nombre del Caso de Uso:	Calibrar Simulación.
Propósito:	Una vez realizada la simulación por el autómata celular, se podrá calibrar los resultados para un fin correcto.
Precondición:	Resultados de la simulación.
Poscondición:	Resultados modificados.
Limitaciones:	El calibrado se realizará otra vez por el autómata celular.
Presunciones:	Un resultado correcto.

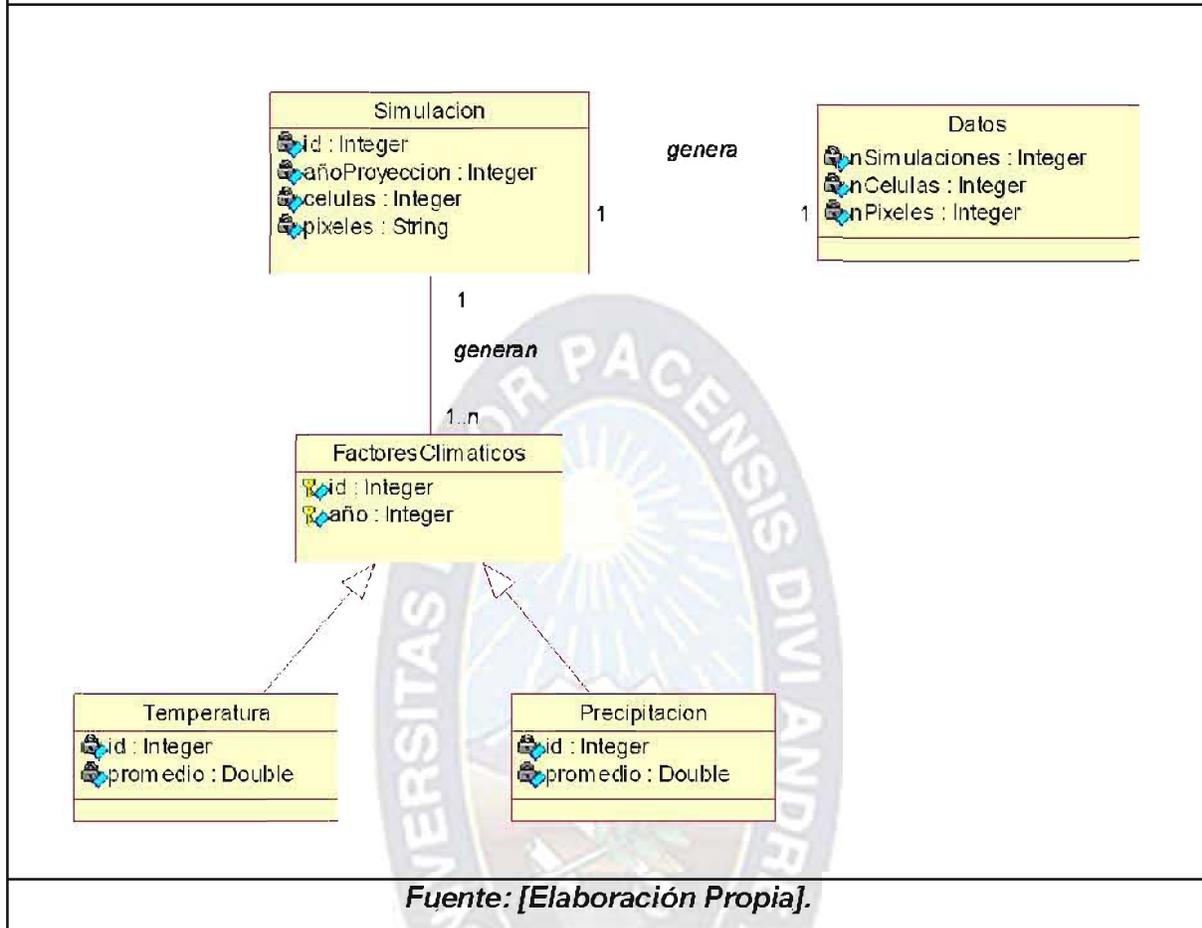
Nombre del Caso de Uso:	Imprimir resultados.
Propósito:	Se podrán realizar el reporte de la simulación para el usuario final.
Precondición:	Los resultados deben ser almacenados en la base de datos, si se quiere.
Poscondición:	Un reporte sobre el retroceso del glaciar de Chacaltaya con los datos correspondientes.
Limitaciones:	No identificada.
Presunciones:	No identificada.

Fuente: [Elaboración Propia].

4.3.4 Modelado de Objetos

El modelado de objetos representa la descomposición, asociaciones, atributos u objetos individuales presentes en el dominio del problema, en UML es representado por el Diagrama de Clases. (Figura 4.2).

Figura 4.2 Diagrama de Clases



La descripción de los conceptos y atributos del modelo de objetos se lo describe en la siguiente tabla. (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Descripción del Modelo de Objetos.

Concepto	Atributo
Factores Climatológicos	Año: Corresponde al año con el cual se tiene la información de temperatura y precipitación.
Temperatura	Promedio: Es el promedio de la temperatura de cada año desde el 2000 al 2007 y esta medido en grados [°C].
Precipitación	Promedio: Es el promedio de la precipitación de cada año desde el 2000 al 2007 y esta medido en [mm].

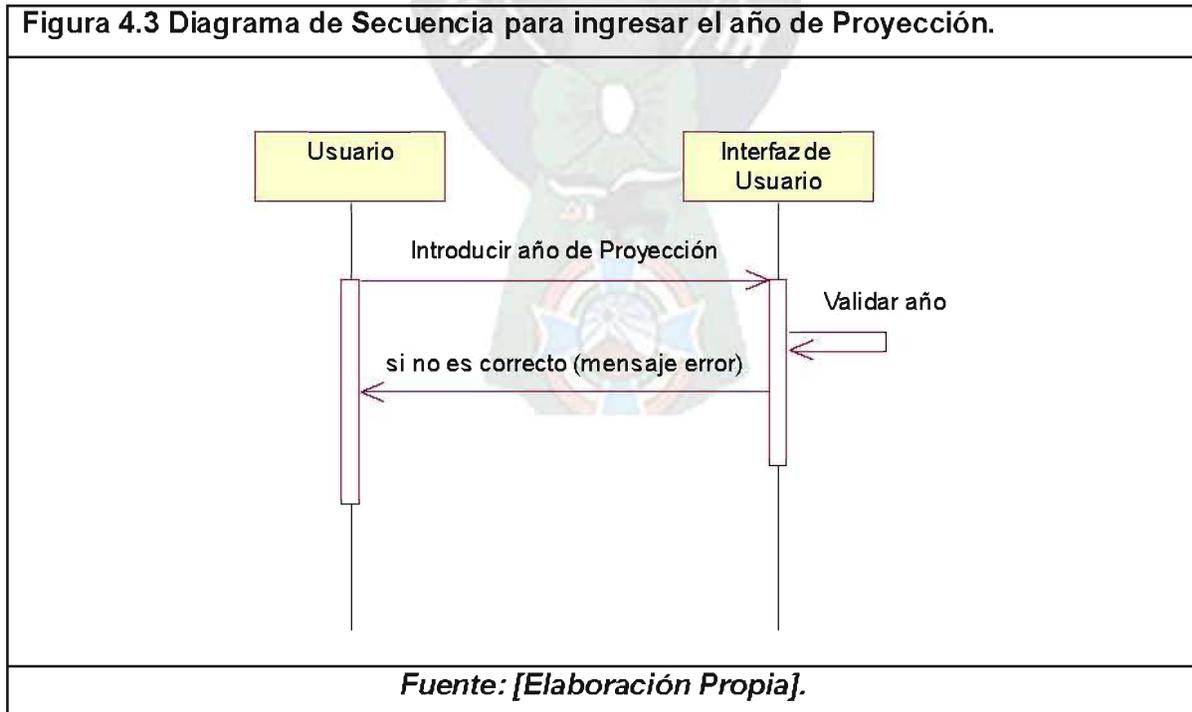
Simulación	<p>Año de Proyección: Es el año al que se va a simular.</p> <p>Células: Son las células que serán procesadas.</p> <p>Píxeles: Representa al color de las elevaciones y esta asociada a un código.</p>
Datos	<p>N Simulaciones: Representa al número de simulaciones que realizará el autómata celular.</p> <p>N Células: Representa el número de células que han sido modificadas, asociadas a un píxel.</p> <p>N Píxeles: Representa el número de píxeles que han sido modificados, asociados por su código.</p>

Fuente: [Elaboración Propia].

4.3.5 Diagrama de Secuencias

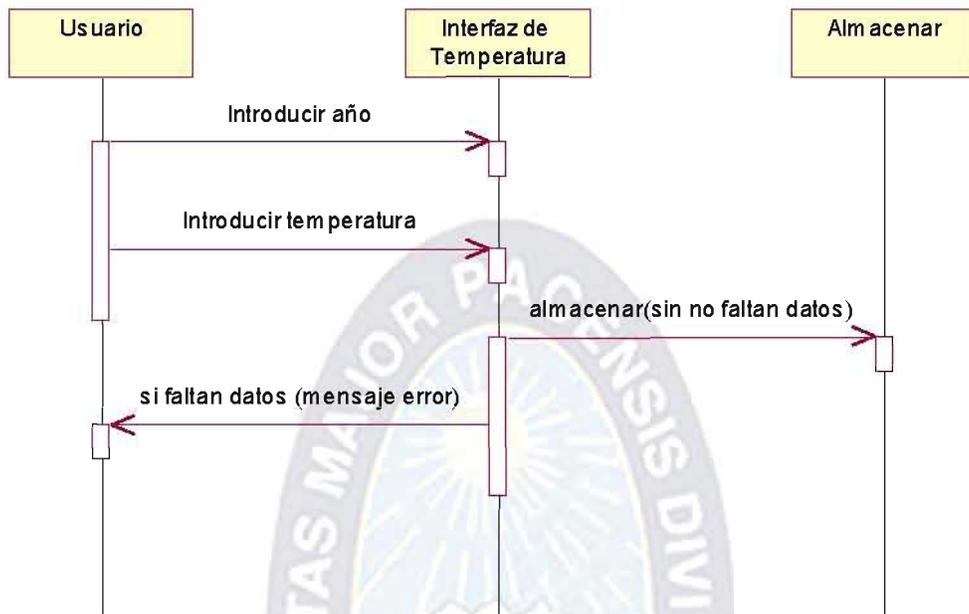
El diagrama de secuencia representa el escenario del caso de uso, eventos generados por los actores y eventos internos. A continuación se exponen los diagramas de secuencia de los casos de uso más relevantes.

Figura 4.3 Diagrama de Secuencia para ingresar el año de Proyección.



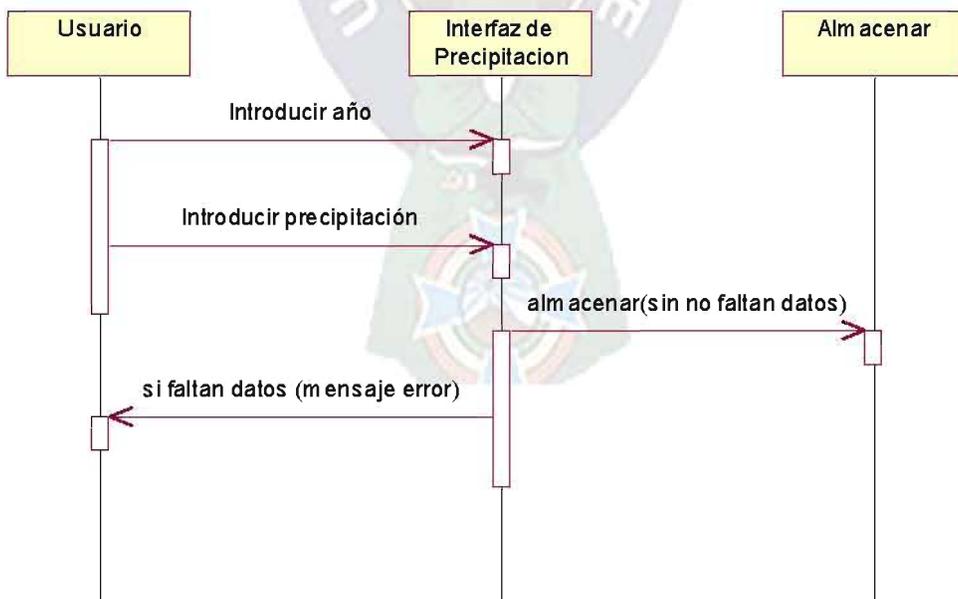
Fuente: [Elaboración Propia].

Figura 4.4 Diagrama de Secuencia para el ingreso de la temperatura.



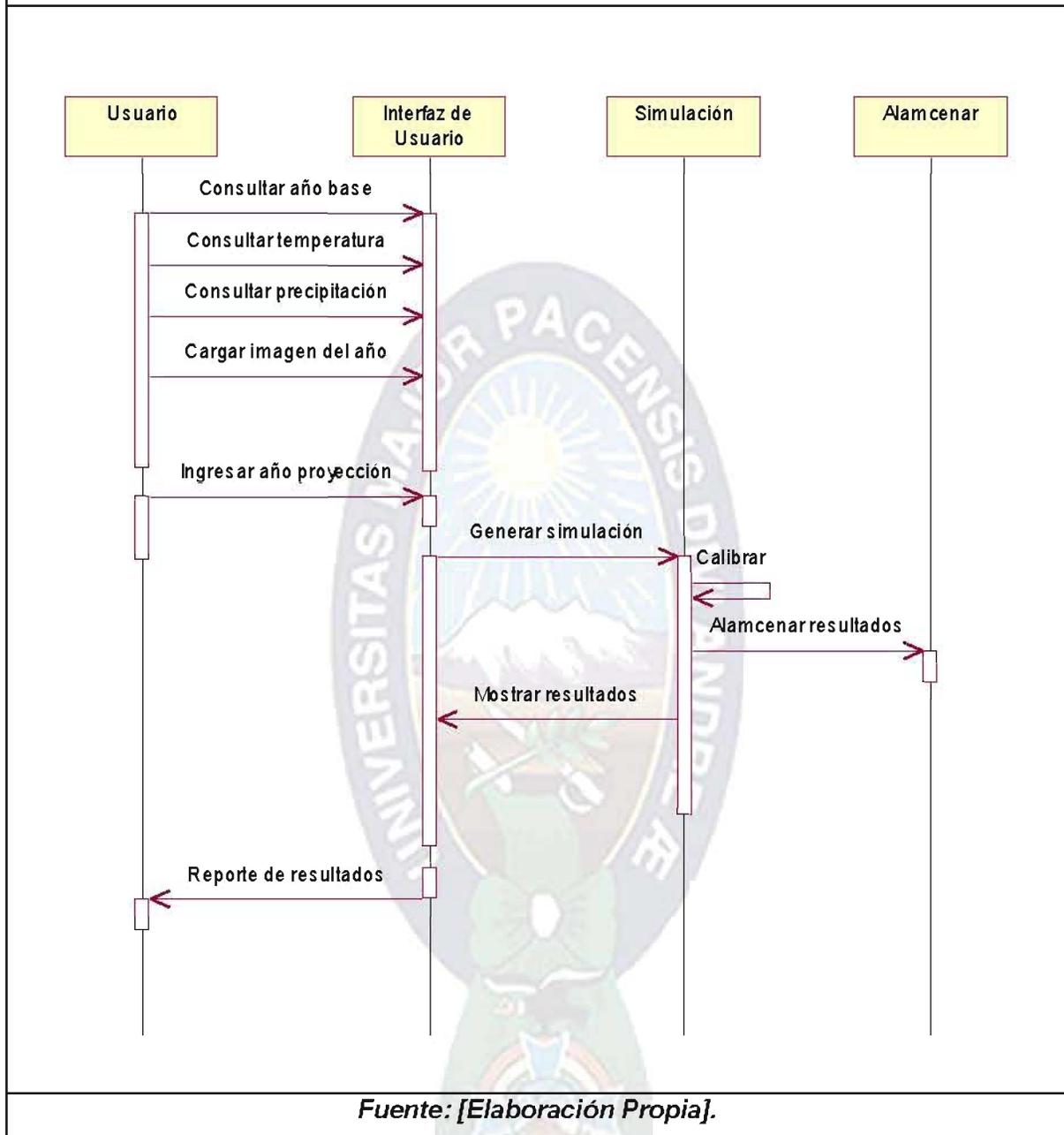
Fuente: [Elaboración Propia].

Figura 4.5 Diagrama de Secuencia para el ingreso de la precipitación.



Fuente: [Elaboración Propia].

Figura 4.6 Diagrama de Secuencia de la simulación.



Fuente: [Elaboración Propia].

Figura 4.7 Diagrama de Secuencia del calibrado.

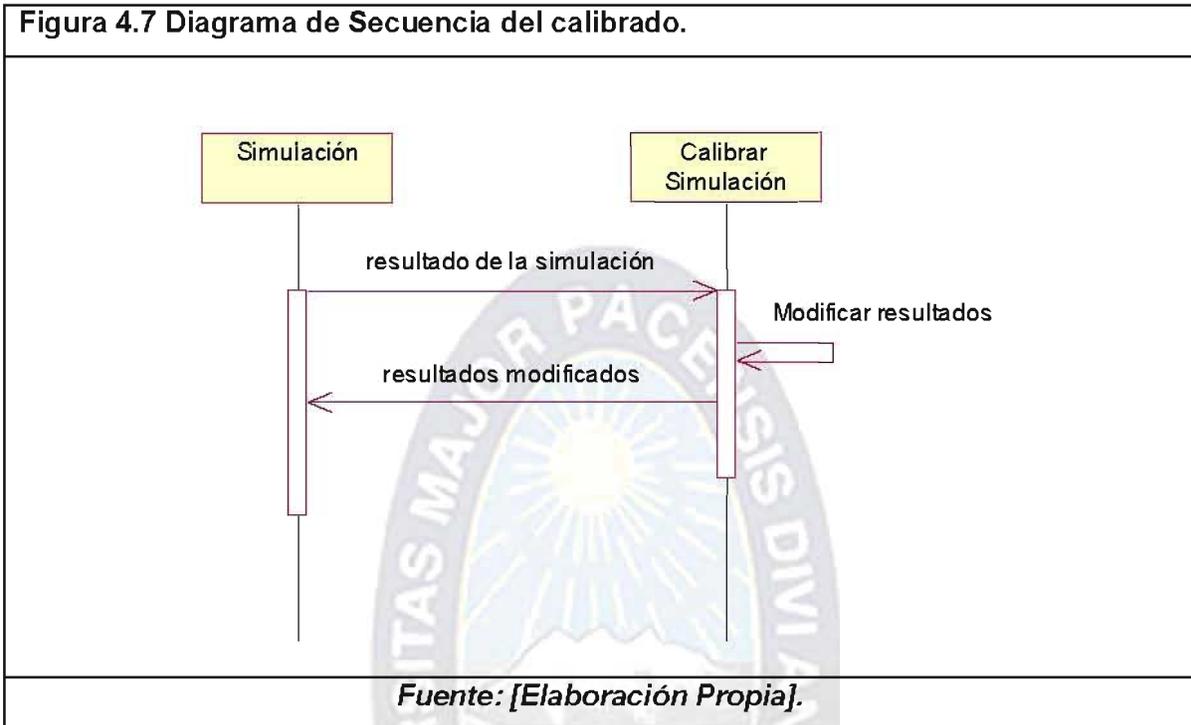
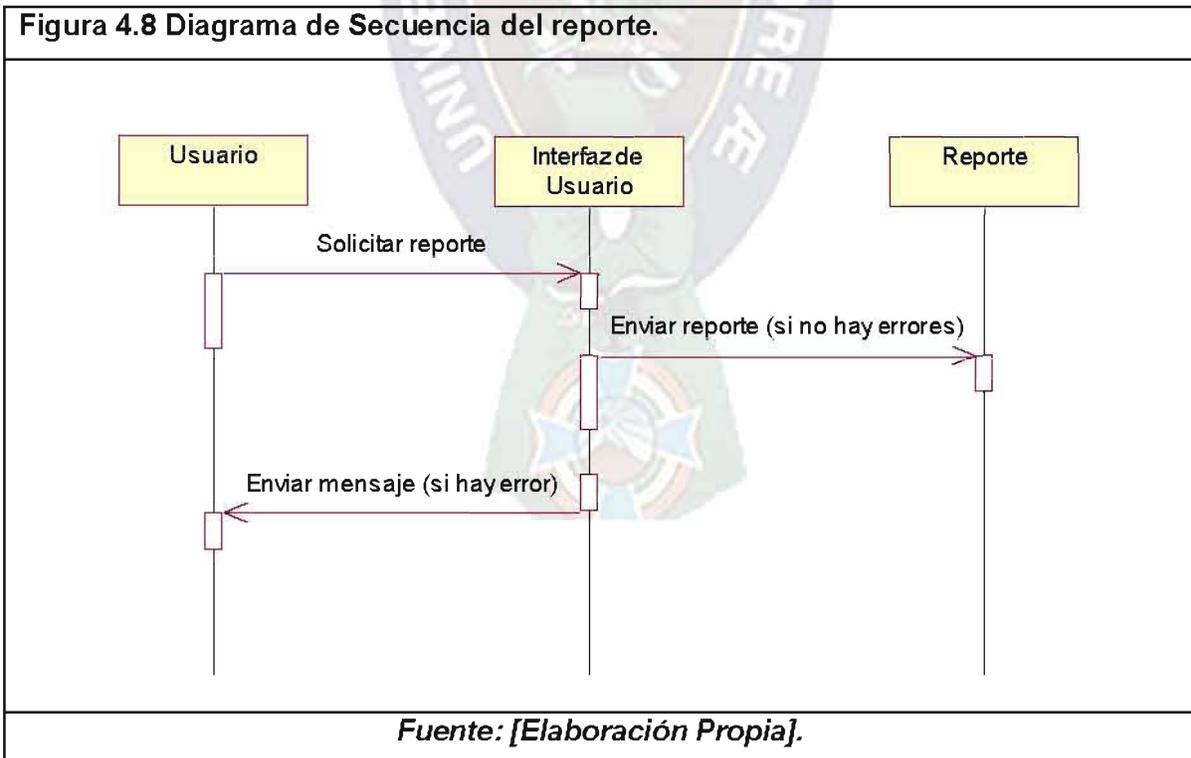


Figura 4.8 Diagrama de Secuencia del reporte.

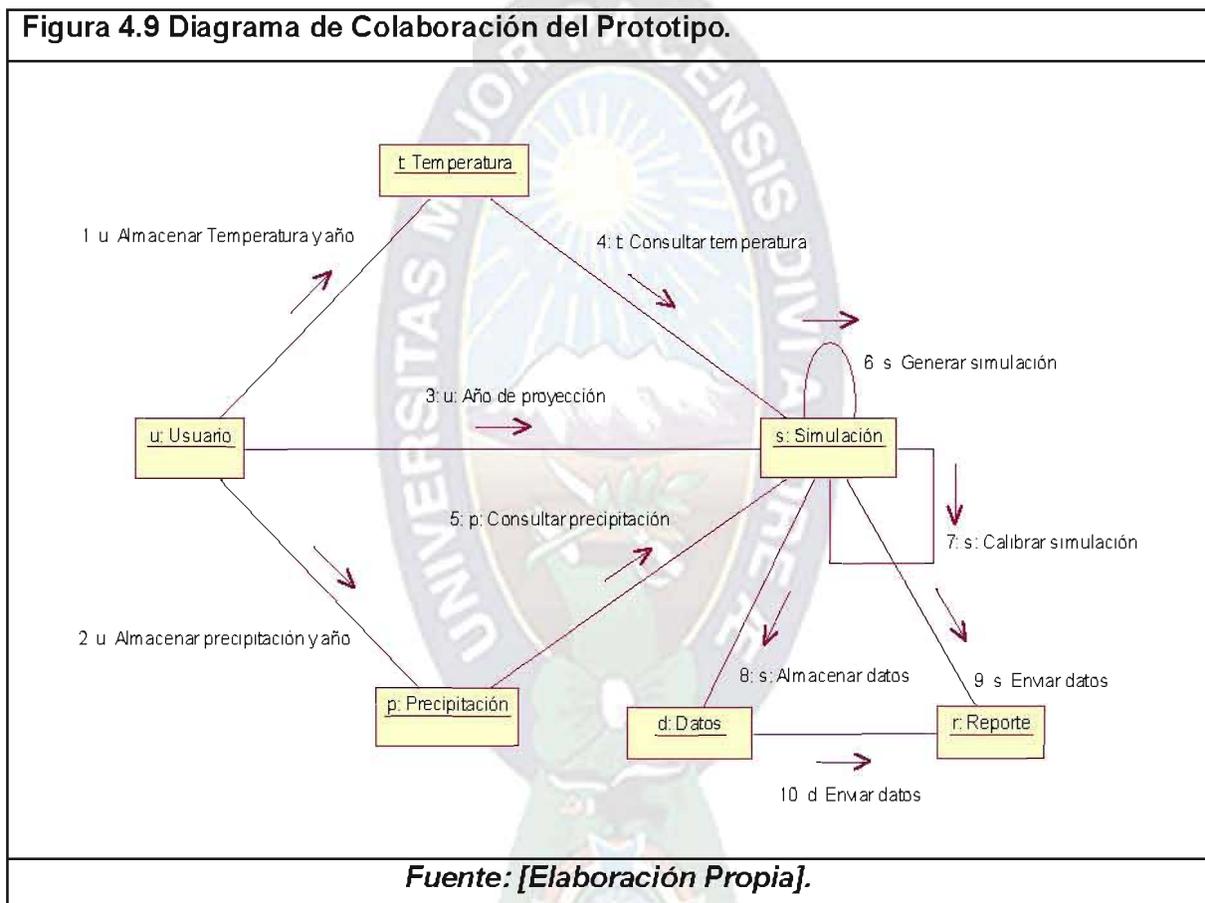


4.4 DISEÑO

4.4.1 Diagrama de Colaboración

Los diagramas de colaboración tienen por objeto definir las especificaciones del software en nuestro caso un prototipo, que cumpla con los requisitos funcionales. (Figura 4.9).

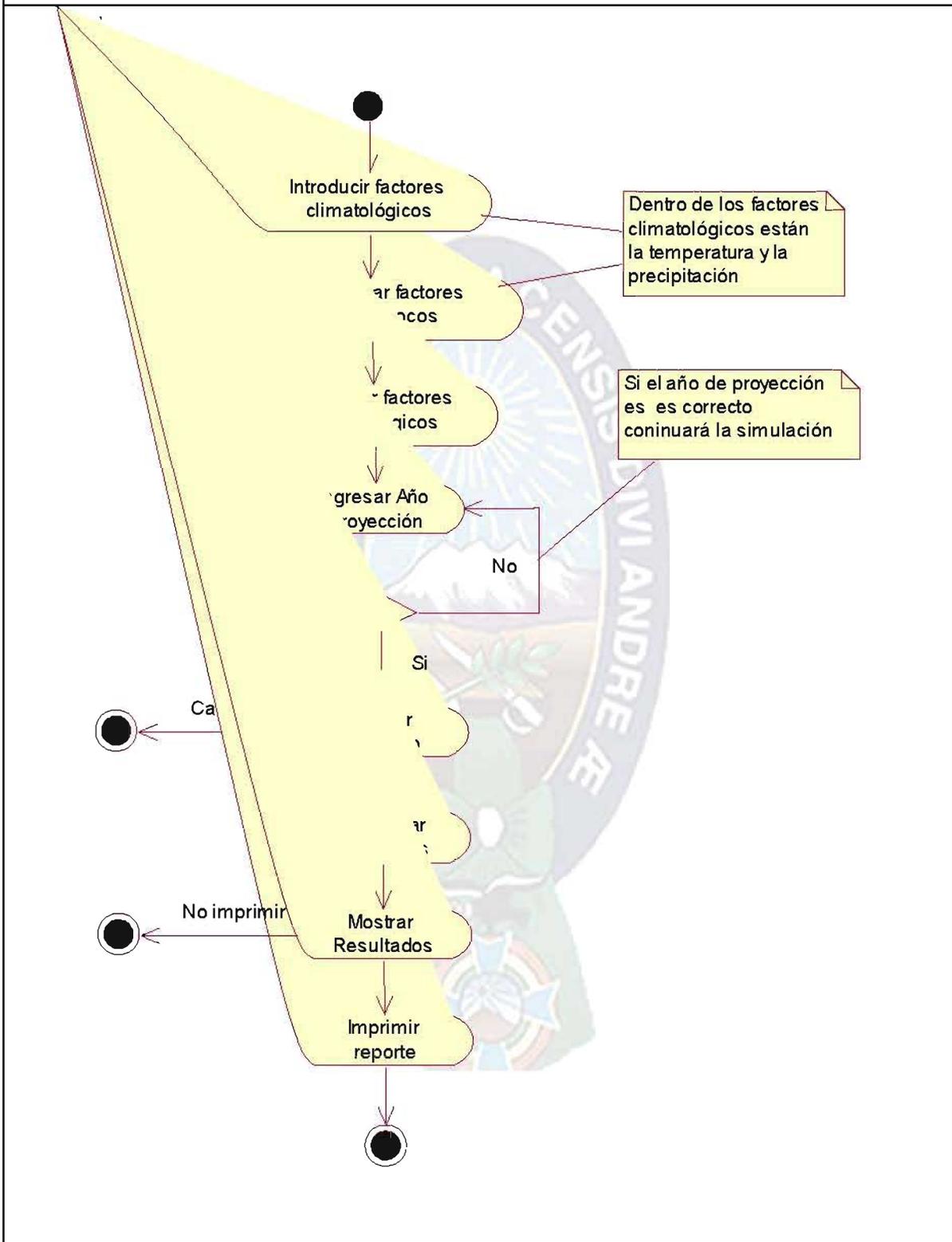
Figura 4.9 Diagrama de Colaboración del Prototipo.



4.4.2 Diagrama de Estado

Los diagramas de estado muestran diferentes estados de los objetos que se encuentran en el sistema y las transacciones de cada estado a otro estado. (Figura 4.10).

Figura 4.10 Diagrama de estado del Prototipo.



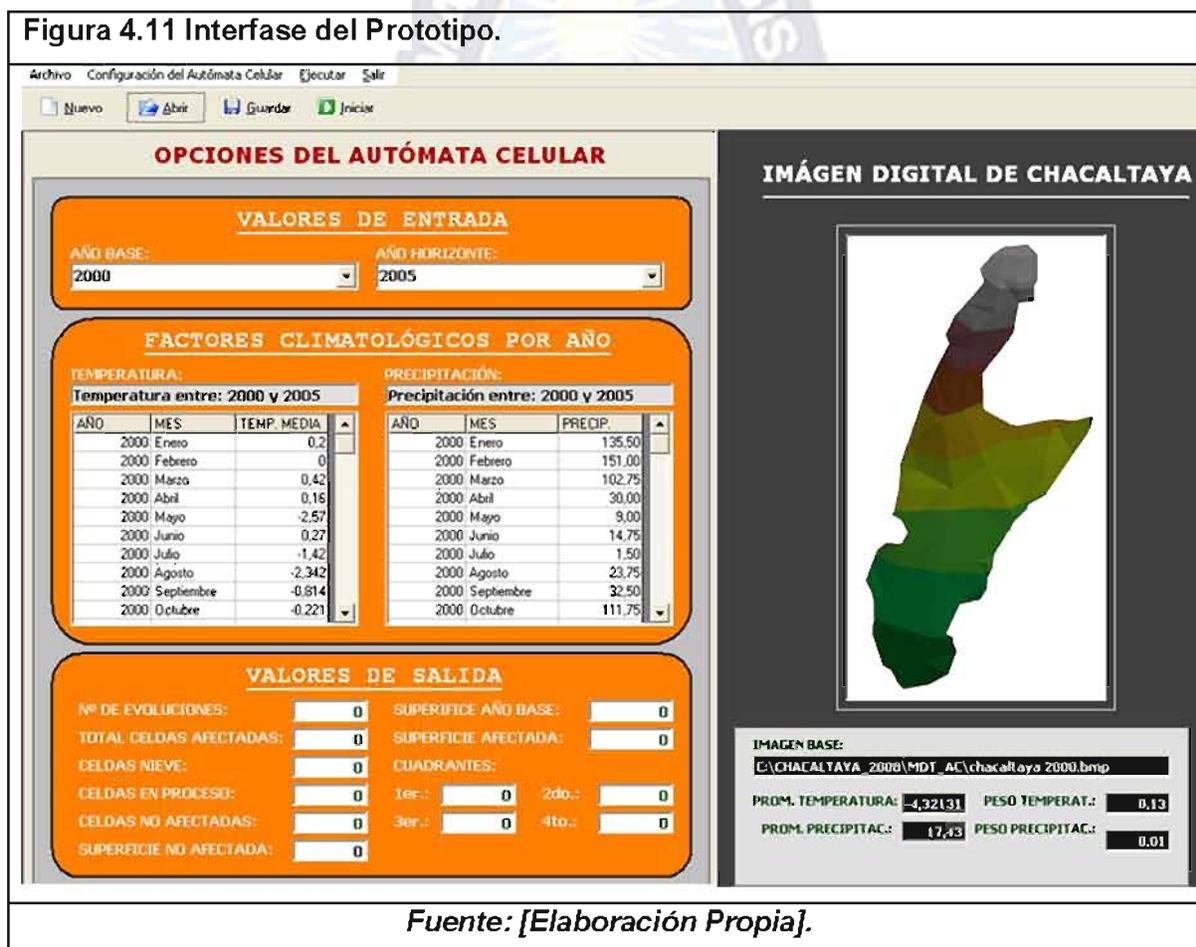
Fuente: [Elaboración Propia].

4.5 CONSTRUCCIÓN

El prototipo desarrollado nos permite experimentar y evaluar el modelo propuesto; el mismo presenta una interfase amigable al usuario y capacidades de visualización, análisis de información y procesamiento mediante autómatas celulares.

La generación de código se le efectuara de acuerdo al diseño planteado, como lo mencionamos en el capítulo 1, la herramienta para la programación del modelo será Visual Basic 6.0 y la plataforma en la cuál se ejecutará es el Sistema Operativo Windows XP.

Figura 4.11 Interfase del Prototipo.



4.6 PRUEBAS

“La Simulación del Deshielo Basado en Autómatas Celulares” da paso a realizar las pruebas de la simulación, con el objetivo de determinar la precisión del modelo y si los resultados obtenidos son confiables.

Se realizaron aproximadamente 650 simulaciones con el modelo hasta el punto de calibrar los parámetros de entrada y los intervalos de los años base y horizonte. A continuación se presentan los resultados más significativos devueltos por el prototipo.

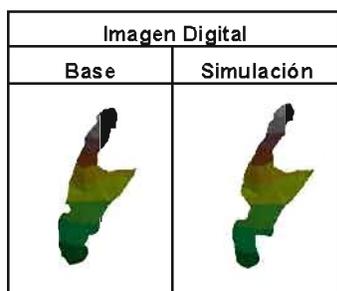
a) Prueba N° 01

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2000	2002	-6,88	0,21	22,25	0,01

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m2)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
65	7641	7143	498	24080	51695	3834	47860	912	1841	3725	665



(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2000 y con una proyección al año 2002, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de -6.88, 22.25 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 65 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 7641, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 3725 celdas afectadas y el menor es el cuarto cuadrante con 685 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 47865 m² y el volumen es de 166008 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 47860 m². Por tanto el error de la *prueba 01* es de: 0.05.

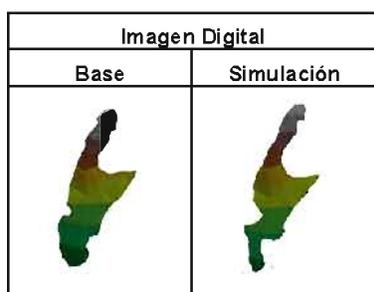
b) Prueba N° 02

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2000	2003	-5,74	0,17	39,85	0,02

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
88	12413	12016	397	19201	51695	11291	40404	1605	3151	5787	1473



(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2000 y con una proyección al año 2003, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de -5.74, 38.85 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 88 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 12413, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 5787 celdas afectadas y el menor es el cuarto cuadrante con 1473 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 40409 m² y el volumen es de 120021 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 40404 m². Por tanto el error de la *prueba 02* es de: 0.05.

c) Prueba N° 03

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2002	2004	-3,23	0,1	28,5	0,02

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
87	11720	11161	559	14578	47860	18139	29720	1057	3559	4510	2035

Imagen Digital	
Base	Simulación
	

(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2002 y con una proyección al año 2004, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de -3.23, 28.50 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 87 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 11720, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 4510 celdas afectadas y el menor es el primer cuadrante con 1057 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 29723 m² y el volumen es de 80196 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 29720 m². Por tanto el error de la *prueba 03* es de: 0.03.

d) Prueba N° 04

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2002	2005	-2,55	0,08	24,4	0,02

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
219	32718	20587	12131	5097	47860	37827	10032	4411	5044	8111	3021

Imagen Digital	
Base	Simulación
	

(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2002 y con una proyección al año 2005, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de -2.55, 24.40 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 219 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 32718, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 8111 celdas afectadas y el menor es el cuarto cuadrante con 3021 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 10035 m² y el volumen es de 29759 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 10032 m². Por tanto el error de la *prueba 04* es de: 0.03.

e) Prueba N° 05

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2003	2004	-0,96	0,04	38	0,02

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
61	7724	7372	352	13845	40404	10684	29719	1217	2044	3311	800

Imagen Digital	
Base	Simulación
	

(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2003 y con una proyección al año 2004, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de -0.96, 38.00 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 61 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 7724, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 3311 celdas afectadas y el menor es el cuarto cuadrante con 800 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 29723 m² y el volumen es de 80196 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 29719 m². Por tanto el error de la *prueba 05* es de: 0.04.

f) Prueba N° 06

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2003	2006	-0,97	0,04	26,75	0,02

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
61	17004	16860	144	4267	40404	33210	7193	4068	4132	6968	1692

Imagen Digital	
Base	Simulación
	

(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2003 y con una proyección al año 2006, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de -0.97, 26.75 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 61 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 17004, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 6968 celdas afectadas y el menor es el cuarto cuadrante con 1692 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 7197 m² y el volumen es de 17789 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 7193 m². Por tanto el error de la *prueba 06* es de: 0.04.

h) Prueba N° 07

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2005	2006	-0,67	0,05	44,58	0,03

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
57	4963	4673	290	7831	10032	2835	7196	239	1299	3139	0

Imagen Digital	
Base	Simulación
	

(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2005 y con una proyección al año 2006, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de -0.67, 44.58 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 57 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 4963, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 3139 celdas afectadas y el menor es el cuarto cuadrante con 0 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 7197 m² y el volumen es de 17789 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 7196 m². Por tanto el error de la *prueba 07* es de: 0.01.

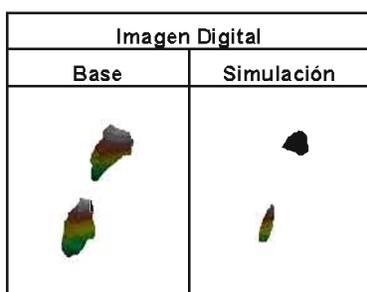
i) Prueba N° 08

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2005	2007	0,35	-0,03	31,38	0,02

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
63	9103	8868	235	3530	10032	6532	3499	721	3501	4646	0



(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2005 y con una proyección al año 2007, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de 0.35, 31.38 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 63 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 9103, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 4646 celdas afectadas y el menor es el cuarto cuadrante con 0 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 3501 m² y el volumen es de 9881 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 3499 m². Por tanto el error de la *prueba 08* es de: 0.02.

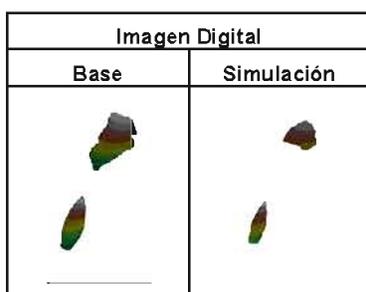
j) Prueba N° 09

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2006	2007	0,41	-0,03	41,83	0,03

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
70	6453	6027	426	4494	7194	3694	3499	800	3344	1883	0



(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2006 y con una proyección al año 2007, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de 0.41, 41.83 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 70 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 3501, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el tercero con 1883 celdas afectadas y el menor es el cuarto cuadrante con 0 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de 7197 m² y el volumen es de 9881 m³, por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 3499 m². Por tanto el error de la *prueba 09* es de: 0.02.

k) Prueba N° 10

(Entrada de Datos)

Año Base	Año Horizonte	Temperatura		Precipitación	
		Promedio	Peso	Promedio	Peso
2007	2013	-2,32	0,14	15,6	0,01

(Salida de Datos)

N° Evoluciones	Celdas				Superficie (m ²)			Cuadrante			
	Total Afec.	Nieve	En Proc.	No Afec.	Año Base	Afectada	No Afectada	1°	2°	3°	4°
73	4909	4867	42	88	3499	3478	20,01	0	2829	20,38	0

Imagen Digital	
Base	Simulación
	

(Interpretación)

Para esta prueba se tuvo como entrada de información el año base igual a 2007 y con una proyección al año 2013, el promedio de temperatura y precipitación en el intervalo de esos años es de -2.32, 15.60 respectivamente, asociados a sus pesos respectivos.

Se logro obtener el resultado en 73 evoluciones donde el total de celdas que han tenido influencia por los factores de deshielo es de 4909, en la imagen el cuadrante que estuvo

en mayor proceso fue el segundo con 2829 celdas afectadas y el menor es el primero y el cuarto cuadrante con 0 celdas.

Comparando los resultados con el Método Glaciológico o Directo del Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) la superficie al año horizonte es de aprox. 30 m², por otra parte el Modelo de Simulación responde a los siguientes resultados superficie de 20.21 m². Por tanto el error de la *prueba 10* es de: 0.0979.

Por tanto la confiabilidad del modelo se basa en la sumatoria de los errores en relación con el total de pruebas.

$$e = \sum e_i / n$$

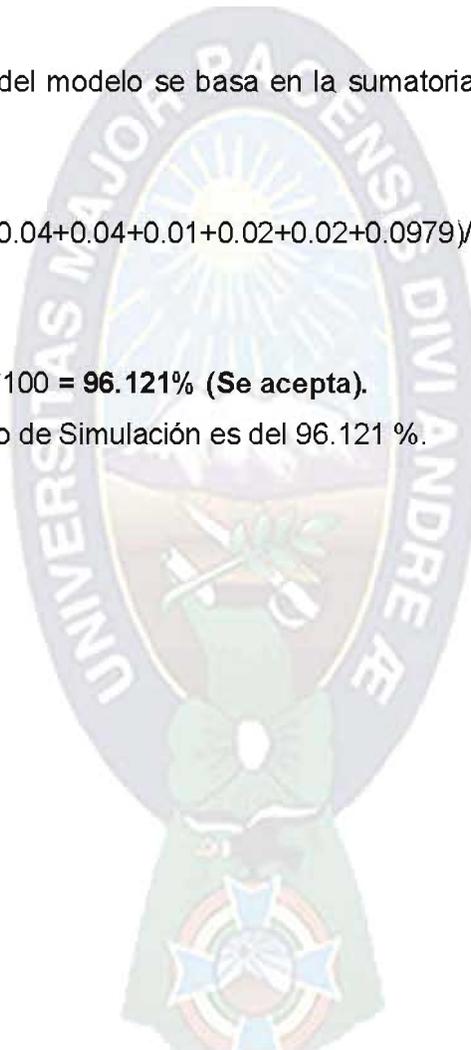
$$e = (0.05 + 0.05 + 0.03 + 0.03 + 0.04 + 0.04 + 0.01 + 0.02 + 0.02 + 0.0979) / 10$$

$$e = 0.03879$$

$$p = 1 - e \Rightarrow 0.96121$$

$$\text{Porcentual (\%)} = 0.96121 * 100 = \mathbf{96.121\% \text{ (Se acepta)}}.$$

La confiabilidad del Modelo de Simulación es del 96.121 %.



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

*Lo importante no es
llegar primero, sino saber llegar.
Anónimo.*

5.1 CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente trabajo de tesis se muestra la aplicación de una herramienta de la inteligencia artificial, para aplicar a un fenómeno natural como es el descongelamiento de uno de los glaciares tropicales andinos que hay en Bolivia “Chacaltaya”. Luego de mostrar los resultados, se concluye que el modelo propuesto cumple con los objetivos que se plantearon en el primer capítulo.

5.1.1 Estado de la Hipótesis

La hipótesis planteada es la siguiente:

“El Modelo de Simulación del Deshielo Basado en Autómatas Celulares podrá realizar la predicción sobre el deshielo del glaciar de Chacaltaya utilizando como herramienta un Autómata Celular Bi-Dimensional”.

En el capítulo anterior, en la sección 4.6 se prueba que los datos obtenidos después de la simulación al retroceso de la mancha de hielo del glaciar de Chacaltaya, tiene un 96.12 % de nivel de confianza. Por lo que la hipótesis queda probada y el descongelamiento del glaciar de Chacaltaya tiene un margen de error de 0.0388.

5.1.2 Estado de los Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- ❖ Plantear un modelo analítico basado en autómatas celulares para el estudio del deshielo en las montañas.
- ❖ Establecer un modelo de simulación del deshielo en el glaciar de Chacaltaya.
- ❖ Implementar un prototipo para la Simulación del Deshielo del nevado de Chacaltaya.
- ❖ Establecer reglas de evolución para el autómata celular que reflejen el comportamiento del deshielo.

Los cuales se cumplieron de la siguiente manera:

El primer y segundo objetivo, se alcanza con el desarrollo del tercer capítulo, donde se construye el Autómata Celular denominado ACN2D, en toda su extensión, modelando el comportamiento del fenómeno natural del descongelamiento del glaciar de Chacaltaya.

El tercer objetivo se logra desarrollando el cuarto capítulo “Desarrollo del prototipo”, con el cual se establecen las fases del desarrollo del prototipo y así alcanzar un software de calidad para la simulación del deshielo de Chacaltaya.

Finalmente, se han establecido las reglas de evolución del ACN2D, gracias a la investigación de la problemática definida en el capítulo 2. Los Autómatas Celulares son una herramienta poderosa para modelar sistemas dinámicos de comportamiento complejo.

5.2 RECOMENDACIONES

Como consecuencia de la presente tesis de grado surgen algunos tópicos que pueden ser ampliados para futuros trabajos de investigación, en este sentido se plantean las siguientes recomendaciones:

Por parte de los glaciares se recomienda:

Establecer un sistema integral, donde formen parte los tres glaciares más importantes en Bolivia (Chacaltaya, Zongo y Tuní Condoriri), que son monitoreados por el (IRD) a través del (IHH) y el (SENAMHI), por la cual estas instituciones tiene bastante información de estos, para poder establecer en que año de proyección estos glaciares pueden dejar de existir, por medio de la herramienta de los Autómatas Celulares.

Por parte al modelo presentado:

Para el presente trabajo, se estableció dos factores importantes que influyen al retroceso del glaciar (factores topográficos y climatológicos), entre los factores climatológicos sólo se uso a la precipitación y la temperatura, pero sería de gran ayuda asociar al modelo de simulación nuevos factores climatológicos como son: radiación solar, albedos, fenómeno ENSO, etc.

Por parte del Software:

Se recomienda trabar directamente con las imágenes digitales del terreno georeferenciados para poder trabajar de manera Tri-Dimensional, para observar de una manera más clara las elevaciones de la montaña, en nuestro caso se exporto en un

formato JPEG del Sistema Información Geográfico ArcView, para poder trabajar con el Autómata Celular.

Una vez que se pueda trabajar directamente con el SIG, sería interesante plantear un nuevo modelo de simulación basado en Autómatas Celulares pero Tri-Dimensional.



BIBLIOGRAFÍA

- [ARG00] ARGOTE, Cusi Milenka Linneth, ***“Simulación del Crecimiento Urbano en un Eje preferencial de la Ciudad de La Paz Aplicando Autómatas Celulares”***, Tesis de Grado de la Carrera de Ingeniería de Sistemas de la Escuela Militar de Ingeniería 2000, La Paz – Bolivia.
- [ARL95] ARGOLLO, Jaime y MOURGUIART, Philippe, ***“Actividad Glacial en el Valle de Milluni (Última Glaciación – Actual)”***, 1995. En aguas Glaciares y Cambios Climáticos en los Andes Tropicales. La Paz: ORSTOM.
- [BOU90] BOURGUES, Jack, ***“Análisis Hidrológico en la Cuenca Andina”***, 1990. La Paz: ORSTOM.
- [CAR98] CARTAGENA, Chávez Ramiro Luís, ***“El Glaciar De Chacaltaya: Estudio Del Balance Glaciológico Contribución Al Análisis Del Retroceso De Un Glaciar Tropical”***, 1998. Tesis de la carrera de Geografía. UMSA: La Paz - Bolivia.
- [CLA02] CLAURE, Torrez Gerardo Alex, ***“Modelo de Dinámica Urbana Basado en Autómatas Celulares”***, 2002. Tesis de la Carrera de Informática. UMSA: La Paz – Bolivia.
- [DEL88] DELFIN, Pino Ichazo, ***“Tratado de Ortografía Práctica”***, 1988. Tercera Edición, Editorial: Don Bosco.
- [ECO95] ECO, Humberto, ***“Como de hace una Tesis”***, 1995. Traducida por Lucía Baranda y Alberto Claveria Ibáñez. Barcelona: GEDISA.
- [FLE02] FELICISMO, Pérez Ángel Manuel, ***“Sistemas de Información Geográfica Curso de Ingeniería en Geodesia y Cartografía”***, Universidad de Extremadura – España 2002.

- [FRA94] FRANCOU, Bernard y CARTAGENA, Ramiro, ***“Programa de Estudios Glaciológicos en Chacaltaya”***, 1994. En Revista Anual del Club Andino Boliviano. La Paz: Club Andino Boliviano.
- [FRA98] FRANCOU, Bernard, RAMIREZ, Edson y MENDOZA, Javier, ***“El Glaciar de Chacaltaya (Cordillera Real de Bolivia) Investigaciones Glaciológicas 1991 - 97”***, 1998. En: Informe No. 29. La Paz: ORSTOM – COBEE.
- [GAL01] GALVIZ, Casas José, ***“Autómatas Celulares”***, 2001.
<http://132.248.129.151/icc1/ac/ac.html>.
- [GON99] GONZALES, Vargas Luis Fernando, ***“Una Introducción a los Autómatas Celulares”***, 1999.
<http://yupana.automata.edu.bo.co/publicaciones/yupana/005/autocelular>.
- [HOW80] HOWARD, Daniel B. y SÁNCHEZ, Renato C. ***“Fundamentos de la Geología”***, de la Universidad Boliviana Tomás Frías.
- [JIM99] JIMÉNEZ, Morales Francisco, ***“Autómatas Celulares y Vida Artificial”***, 1999.
<http://complex.us.es/~jimenez/CA/ac/ac.html>.
- [LAR96] LAROUSSE, ***“Diccionario Enciclopédico Larousse”***, 1996. Mexico: Larousse.
- [RAM96] RAMÍREZ, Edson, FRANCOU, Bernard, ***“El Glaciar De Chacaltaya (Bolivia): Tendencias Del Balance de Masa y Retroceso Medido 'Desde 1940’”***, 1996. Misión ORSTOM. La Paz – Bolivia.
- [RAM07] RAMÍREZ, Edson, MENDOZA, Javier, ***“Regional Grupo de Trabajo de Nieves y Hielos para América Latina (PHI-UNESCO)”***, 2007. IHH, IRD, SENAMHI. La Paz – Bolivia.

- [REY99] REYNAGA, René & SANDY, Vladimir, ***“Construcción de Reglas de Autorreplicación Universal en Autómatas Celulares”***, Revista YATICHAWI, Volumen 2, Número 1 Mayo de 1999, La Paz – Bolivia.
- [ROC91] ROCHE, Alain, ***“Estudio de la Climatología e Hidrología de Bolivia”***, 1991. La Paz: ORSTOM.
- [RON88] RONCHAL, Josyane, ***“Variabilidad del Tiempo en Bolivia y la Anomalia Climática de Invierno”***, 1988. La Paz: ORSTOM-PHICAB & SENAMHI.
- [ROD00] RODRIGUEZ, Rotorio Mario, ***“Introducción a los Autómatas Celulares 2000”***.
- [ROQ03] ROQUE, Jorge Lourdes Araceli, ***“Modelo Dinámico Estocástico para Incendios Forestales Basado en Autómatas Celulares”***, 2003. Tesis de la carrera de Informática. La Paz – Bolivia.
- [OCE91] OCEANO UNO, ***“Océano Uno: Diccionario Enciclopédico Ilustrado”***, 1991. Obra: Grupo Editorial Océano.
- [MAC07] MACHICADO, Mónica y GARCIA, Eduardo ***“Bolivia Losing Glacier to Warming”***, Reuters, Junio del 2007. <http://www.msnbc.msn.com/id/19095038>
- [SOR03] SORUCO, Sologuén Alvaro Wladimir, ***“El Glaciar De Zongo (Cordillera Real): Investigaciones Glaciológicas: Años Hidrológicos 2000 Al 2002”***, 2003. Tesis de Grado de la carrera de Geología. UMSA: La Paz – Bolivia.
- [TAM96] TAMAYO, William, ***“Influencia de los Glaciares en el Comportamiento de Cuencas de Alta Montaña. Estudio de Casos en Perú y Bolivia”***, 1996. Tesis de Grado. Huaraz: Universidad Mayor de Ancash – Santiago Nuñez de Manolo.

- [TEL07] TELMA, Jemio Miriam, "***Deshielo: Del Exceso a la Escasez de Agua en La Paz***", Premio al Reportaje sobre la Biodiversidad, Mayo del 2007.
<http://www.biodiversityreporting.org/article.sub>
- [UEX02] Departamento de Informática de la UEX "Autómatas Celulares", 2002
<http://atc.unex.es/pacof/asignaturas/IntroduccionComputadoras/Materias/automatas/automatas.html>.
- [VAL02] VALLE, Aranibar, Iby Fabiola, "***Análisis Hidrológico De Un Glaciar Tropical En Proceso De Retroceso Acelerado - Chacaltaya***", 2002. Proyecto de Grado de la carrera de Ingeniería Civil. UMSA: La Paz – Bolivia.
- [WOL82] WOLFRAM, Stephen, "***Cellular Automata as Simple Self-Organizing Systems***", 1982.
- [WEI97] WEISS, Albert, "***El Niño***", 1997. San José: Department of Water Resources Nicholas Graham, Sripps Institution of Oceanography.
- [YAÑ00] YAÑES, Fernando, "***Métodos, Técnicas y Herramientas de la Investigación Científica***", Carrera de Ingeniería de Sistemas, Escuela Militar de Ingeniería 2000, La Paz – Bolivia.

www.esmas.com/nationalgeographic/reportajes/631145.html

www.es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero

ANEXOS

FUNCIONAMIENTO DE LOS GLACIARES

1 CONCEPTOS

1.1 Balance de Masas

Es la diferencia existente entre los aportes o ingresos al glaciar generalmente producidos por las precipitaciones sólidas (ganancia) y las salidas o gastos, producto de la evaporación, sublimación o fusión de las masas de hielo del glaciar (pérdida).

1.2 Balance Neto

El balance de masas al finalizar el año TT, es representado por el balance neto b_n .

1.3 Balance Anual

Si t_1 y t_2 , son los tiempos de dos sucesos mínimos y t_m el tiempo de intervención máxima, el intervalo entre t_1 a t_2 es llamado el balance anual. La duración del balance anual no siempre será exactamente 365 días, puede variar un poco, sin embargo, la medida de la duración del balance anual puede quedar en 365 días.

2 FUNCIONAMIENTO DE LOS GLACIARES

El estudio del funcionamiento de los glaciares se refiere al estado de salud de los mismos, vale decir si crecen o disminuyen en tamaño, y como lo hacen con relación al tiempo. Para conocer el funcionar de los glaciares hay que realizar un estudio del balance de

pérdidas y ganancias de su masa glaciar en el transcurso del tiempo, a través de técnicas específicas y puntuales, como ser:

2.1 Técnicas de Estudio del Balance de Masas

La medida del balance de masas de un glaciar consiste en evaluar la cantidad de masa de ensamblaje del glaciar, es decir, determinar la relación entre la cantidad de masa anualmente ganada (acumulación) y la cantidad de masa anualmente pérdida (ablación), por el glaciar.

En cada punto del glaciar y por unidad de superficie, el balance de masas “b” es la diferencia entre la ganancia debido a la acumulación “ A_c ” y la pérdida debido a la ablación “ A_b ”.

Por tanto:

(ec. 1)

$$b = A_c - A_b$$

El total acumulado puede ser expresado como la suma de la acumulación de invierno “ A_{cw} ” y la acumulación de verano “ A_{cs} ”. De la misma manera el total de ablación puede ser similarmente subdividido.

El balance de masas para el fin del balance anual es el balance neto “ b_n ” para el año que puede ser subdividido en balance de invierno “ b_w ”, y el balance de verano “ b_s ”.

De modo que:

(ec. 2)

$$b_n = b_w + b_s = A_{c1} - A_{b1}$$

Si consideramos que el balance de invierno es una ganancia y el balance de verano pérdida para el glaciar, tenemos:

(ec. 3)

$$b_n = A_{cw} + A_{bw} + A_{cs} + A_{bs}$$

El glaciar puede ser dividido al interior de una zona de acumulación donde el $b_n > 0$ y una zona de ablación donde $b_n < 0$. El límite entre las dos zonas es la línea de equilibrio.

Resulta de importancia conocer el balance anual al terminar el año, que es representado por el balance neto “ b_n ”, el mismo puede ser determinado en más de una forma, al finalizar el año.

Ahora bien, las técnicas o métodos de medida de los glaciares, establecidos por la UNESCO, para el estudio del Balance de Masas son las siguientes:

2.2 Método Cartográfico o Volumétrico

Es el método que analiza cartas geográficas de épocas diferentes, correspondientes a un glaciar; permitiendo definir la variación del volumen entre esos datos. También se necesita topografías detalladas del glaciar, que indiquen la posición de la línea de nieve, y la ayuda de fotografías aéreas.

Una de las mayores dificultades de este método radica en la restitución correcta de las zonas de nieves, debido a la estereoscopia y más si se trata de superficies glaciares relativamente pequeñas. A esta dificultad se adjunta, la cantidad de fotos que pueda significar la restitución, que es prácticamente un obstáculo.

2.3 Método Directo o Glaciológico

Este método se realiza por medio de balizas o denominadas también estacas, que son colocadas verticalmente sobre la superficie del glaciar (más en la zona de ablación que en la zona de acumulación), en una línea que sigue su eje longitudinal y que pueden ser medidas cada cierto periodo tiempo. La evaluación del balance en un punto consiste en

medir la baliza (representativa de ese punto) en diferentes fechas, su altura de emergencia por encima de la superficie del glaciar.

Las diferentes de las mediciones obtenidas dan el resultado de balance neto que puede ser positivo o negativo. Como estas mediciones son realizadas sobre el glaciar, pueden ser convertidas a su equivalente en agua, de acuerdo a la (ec. 1):

(ec. 4)

$$b_n = A_c + A_b$$

Donde:

b_n = Balance Neto

A_c = Precipitaciones Sólidas

A_b = Fusión + Sublimación

Según Patterson, el cálculo del balance neto, también puede ser expresado en relación a los balances propios de cada zona, vale decir las medidas realizadas en:

- 1°. La masa de nieve y hielo, acumulado durante el curso del balance anual, el cual queda al final del año, siendo éste el balance neto b_n en los puntos del área de acumulación S_{Ac} , y
- 2°. La masa de hielo perdido del área de ablación durante el año, siendo el balance neto b_n en los puntos del área de ablación S_{Ab} . Donde el balance total o anual neto B_n del glaciar será determinado con la siguiente relación:

(ec. 5)

$$B_n = \int_{S_{Ac}} b_n dS + \int_{S_{Ab}} b_n dS$$

Para apreciar la cantidad de agua sólida (nieve, granizo, escarcha) que acumula al cabo de los años, se puede cavar un pozo para encontrar la estratificación natural del nevado. La medición (espesor/densidad) de cada estrato permite evaluar la cantidad de equivalente agua que se acumula cada año. También se puede medir la estratificación

visible en los labios de las grietas profundas y, eligiendo los sitios de manera óptima, se llega a reconstruir las cantidades de agua precipitaciones anualmente en 10 - 20 años. Con la condición no obstante, de que los años particularmente secos no hayan transformado la sucesión regular de los estratos y hagan aparecer discontinuadas [Francou, 1992].

2.4 Método Hidrológico

En este método se asume que el glaciar es un reservorio de agua, el cual recoge una cierta cantidad en forma de precipitación, y lo regenera en forma de torrente emisario. [Letreguilly, 1984].

Este método determina exclusivamente el balance neto del glaciar en forma completa. Las mediciones son hechas sobre toda la base de la cuenca de drenaje que se extiende en el glaciar. Resulta de gran utilidad medir el caudal total de la base (P) y la cantidad de agua, hielo y nieve perdidos por evaporación (E), que puedan también ser medidos o estimados; esta medida será probablemente pequeña comparada con las otras mediadas. [Patterson, 1981].

Por tanto, como estas cantidades son totales sobre el balance anual y sin expresados como volúmenes de agua, el balance neto del glaciar (Bn) puede ser obtenido por la ecuación.

(ec. 6)

$$Bn = P - R - E$$

Así mismo B. Francou, en su texto "Estudios Glaciológicos e Hidrológicos de Glaciares en la Cordillera Real de Bolivia" (1992:12), indica que el Balance Neto, por el método hidrológico puede ser medido a través de la siguiente relación:

(ec. 7)

$$Bn = P - (F + S)$$

Donde:

P: Es la precipitación en el Glaciar

F: Fusión o Ablación

S: Sublimación (en una medida física)

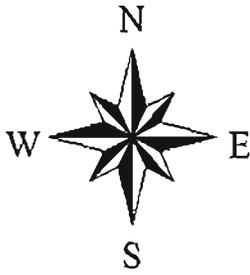
También se puede relacionar el balance Hidrológico con el balance Glaciológico, mediante la siguiente igualdad:

(ec. 8)

$$B_n \text{ Glaciológico} = \text{Balance Neto Hidrológico} + \text{Sublimación}$$

Si existe una ausencia de mediciones de acumulación en la parte superior del glaciar o una densidad muy variable según los años del sistema de balizas, que no permita una estimación del balance de masas y necesitamos apreciar la variación climática sobre el glaciar, Lliboutry, en 1974 propuso la aplicación del “Modelo Lineal de Variación de Balizas” (o Balance Glaciar), el mismo fue aplicado en los Alpes para ese año.

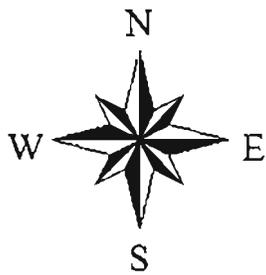
CHACALTAYA 2000



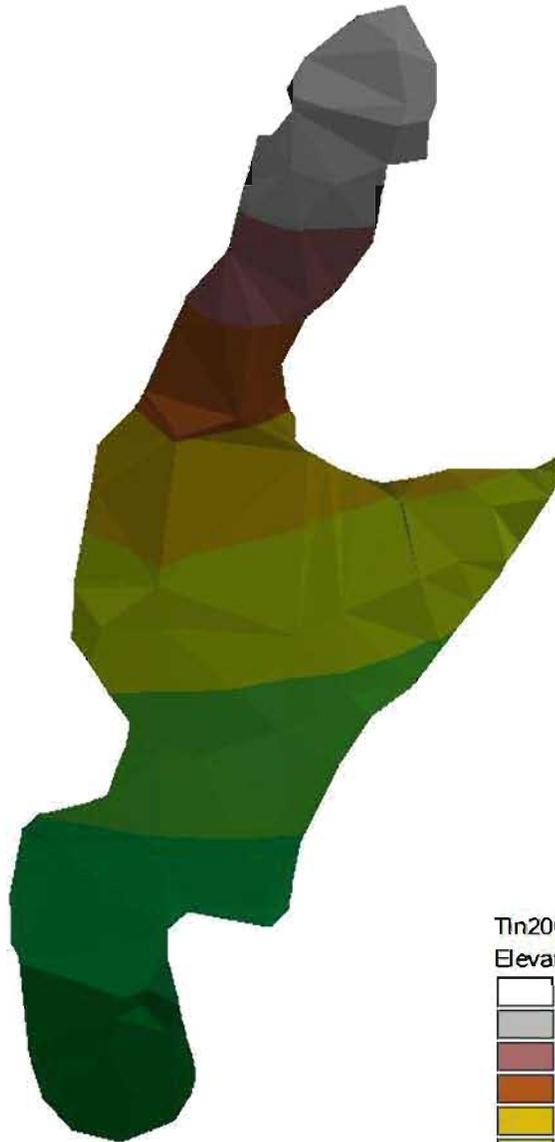
Tin2000
Elevation Range

Light Grey	5333.073 - 5357.043
Grey	5309.103 - 5333.073
Dark Red	5285.133 - 5309.103
Brown	5261.163 - 5285.133
Yellow	5237.193 - 5261.163
Light Green	5213.223 - 5237.193
Medium Green	5189.253 - 5213.223
Dark Green	5165.283 - 5189.253
Very Dark Green	5141.313 - 5165.283

Fuente: [Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH)].



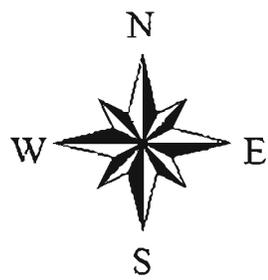
CHACALTAYA 2002



Tin2002
Elevation Range

White	5333.199 - 5356.817
Light Gray	5309.58 - 5333.199
Reddish Brown	5285.961 - 5309.58
Dark Brown	5262.342 - 5285.961
Yellow	5238.723 - 5262.342
Light Green	5215.104 - 5238.723
Medium Green	5191.486 - 5215.104
Dark Green	5167.867 - 5191.486
Very Dark Green	5144.248 - 5167.867

Fuente: [Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH)].



CHACALTAYA 2003

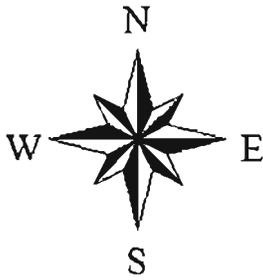


Tin2003
Elevation Range

Lightest Grey	5333.142 - 5356.833
Light Grey	5309.451 - 5333.142
Dark Red	5285.76 - 5309.451
Brown	5262.069 - 5285.76
Yellow	5238.378 - 5262.069
Light Green	5214.687 - 5238.378
Medium Green	5190.996 - 5214.687
Dark Green	5167.305 - 5190.996
Darkest Green	5143.614 - 5167.305

Fuente: [Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH)].

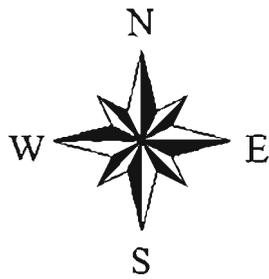
CHACALTAYA 2004



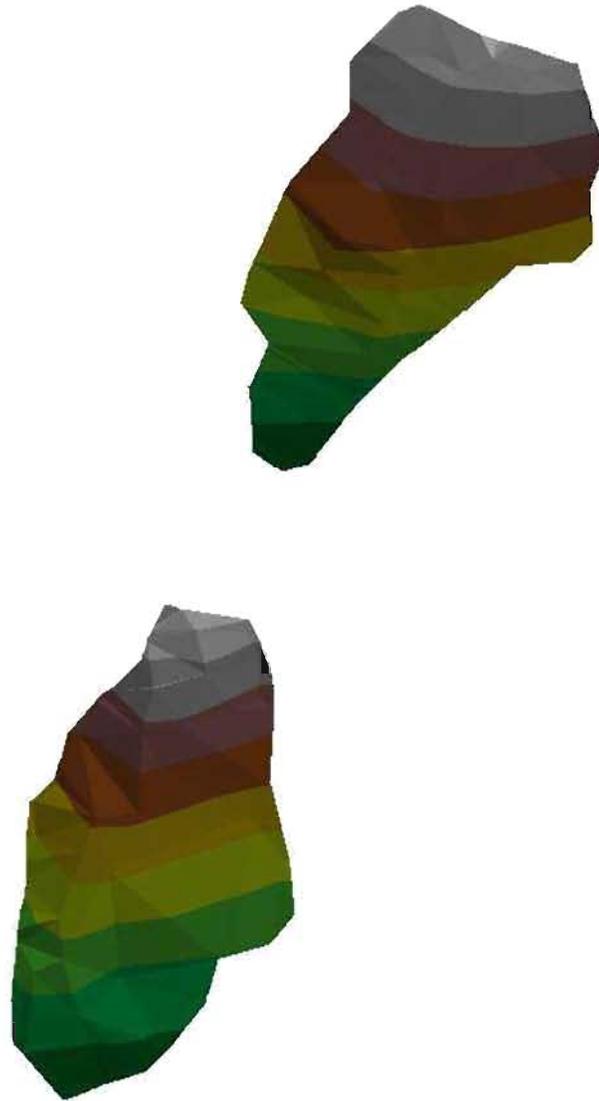
Tin2004
Elevation Range

White	5331.456 - 5351.917
Light Gray	5310.995 - 5331.456
Red	5290.534 - 5310.995
Brown	5270.072 - 5290.534
Yellow	5249.611 - 5270.072
Light Green	5229.15 - 5249.611
Green	5208.689 - 5229.15
Dark Green	5188.228 - 5208.689
Very Dark Green	5167.767 - 5188.228

Fuente: [Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH)].

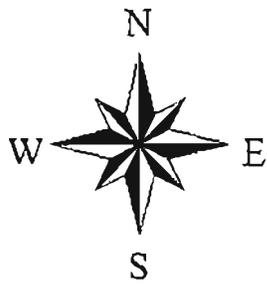


CHACALTAYA 2005

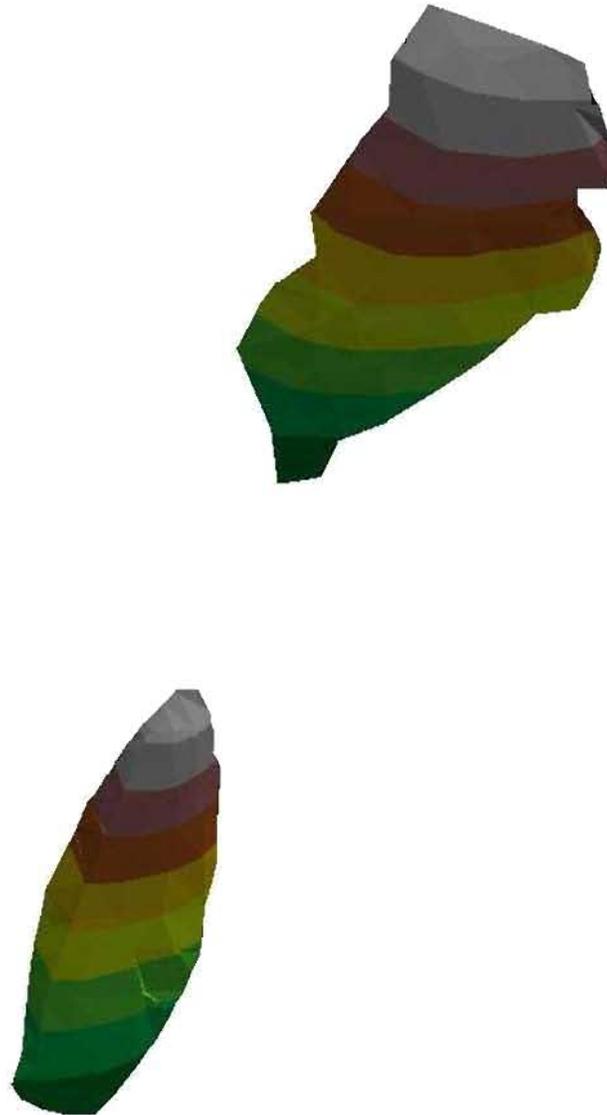


Tin2005_1	
Elevation Range	
5335.755 - 5342.233	
5329.362 - 5335.798	
5322.927 - 5329.362	
5316.491 - 5322.927	
5310.056 - 5316.491	
5303.621 - 5310.056	
5297.186 - 5303.621	
5290.75 - 5297.186	
5284.314 - 5290.75	
Tin2005_2	
Elevation Range	
5280.981 - 5288.889	
5285.074 - 5280.981	
5249.166 - 5285.074	
5243.259 - 5249.166	
5237.351 - 5243.259	
5231.444 - 5237.351	
5225.536 - 5231.444	
5219.629 - 5225.536	
5213.721 - 5219.629	

Fuente: [Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH)].

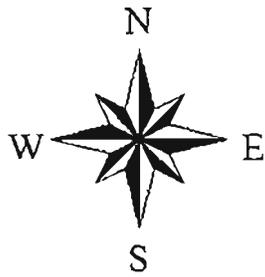


CHACALTAYA 2006

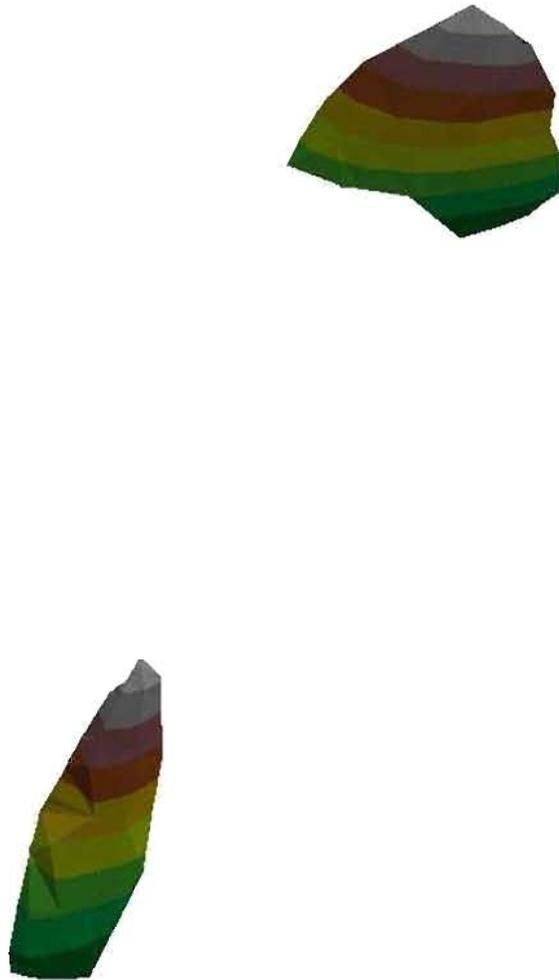


Tin2006_1	
Elevation Range	
5337.249 - 5343.296	
5331.202 - 5337.248	
5325.155 - 5331.202	
5319.108 - 5325.155	
5313.06 - 5319.108	
5307.013 - 5313.06	
5300.966 - 5307.013	
5294.919 - 5300.966	
5288.872 - 5294.919	
Tin2006_2	
Elevation Range	
5287.88 - 5293.763	
5283.006 - 5287.88	
5248.132 - 5283.006	
5243.258 - 5248.132	
5238.384 - 5243.258	
5233.51 - 5238.384	
5228.636 - 5233.51	
5223.762 - 5228.636	
5218.888 - 5223.762	

Fuente: [Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH)].



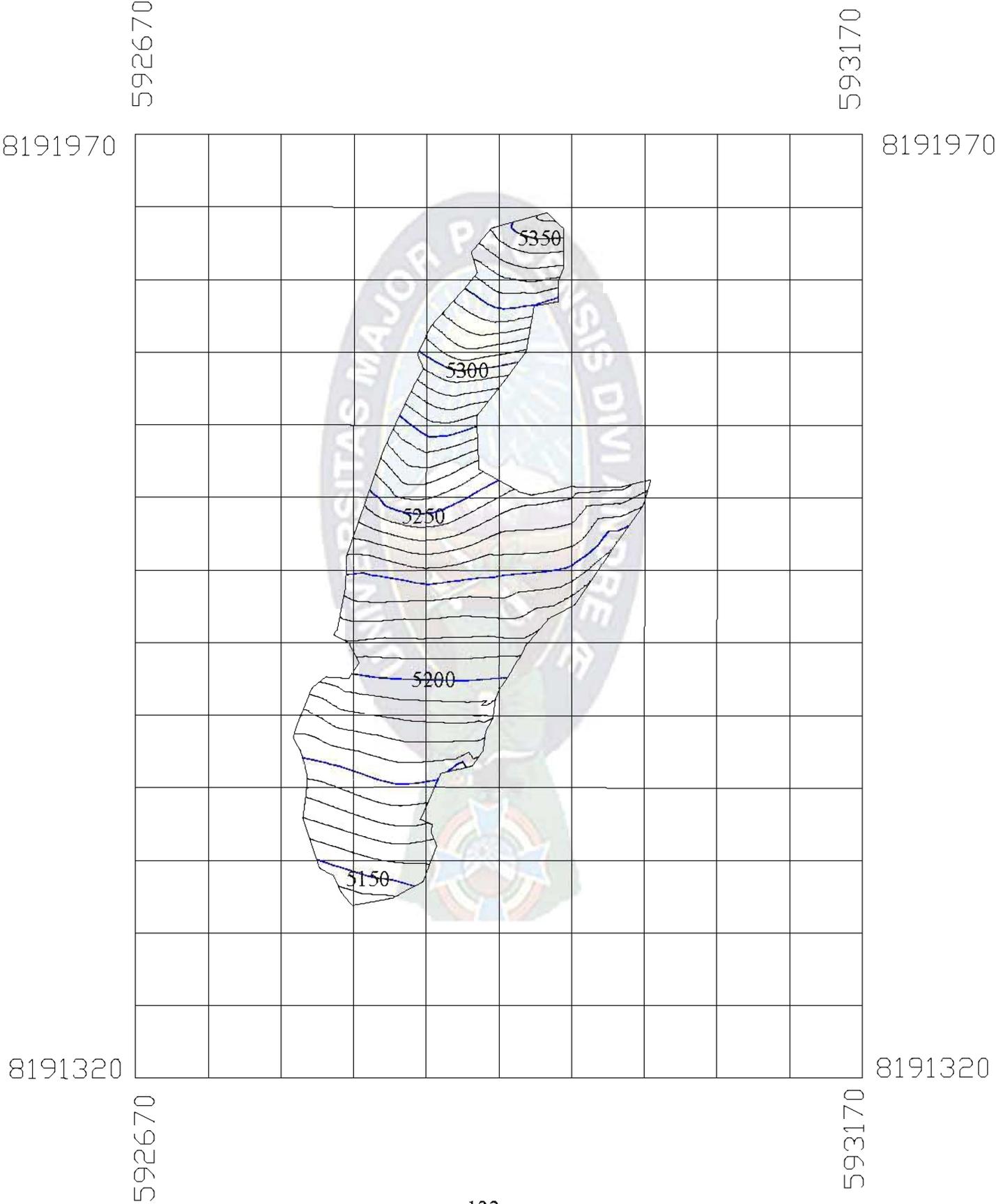
CHACALTAYA 2007



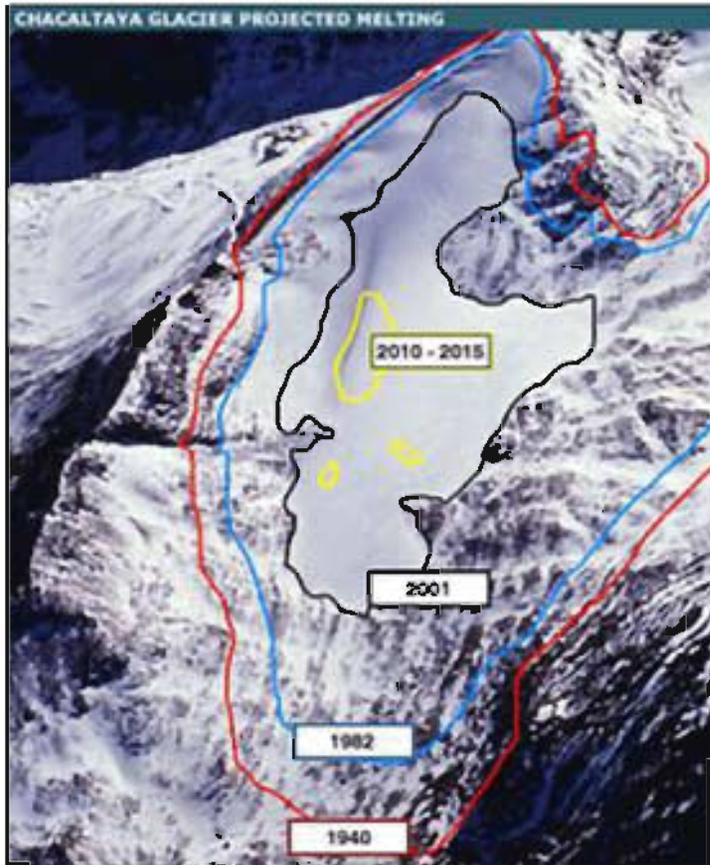
Tm2007_1	
Elevation Range	
[White]	5555.454 - 5556.585
[Light Gray]	5330.319 - 5333.454
[Light Brown]	5327.189 - 5330.319
[Brown]	5324.051 - 5327.189
[Yellow-Green]	5320.917 - 5324.051
[Yellow]	5317.782 - 5320.917
[Light Green]	5314.645 - 5317.782
[Green]	5311.514 - 5314.645
[Dark Green]	5308.379 - 5311.514
Tm2007_2	
Elevation Range	
[White]	5253.719 - 5257.467
[Light Gray]	5249.975 - 5253.719
[Light Brown]	5246.23 - 5249.975
[Brown]	5242.486 - 5246.23
[Yellow-Green]	5238.741 - 5242.486
[Yellow]	5234.996 - 5238.741
[Light Green]	5231.252 - 5234.996
[Green]	5227.507 - 5231.252
[Dark Green]	5223.763 - 5227.507

Fuente: [Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH)].

Imagen Topográfica del Glaciar de Chacaltaya del año 2000 Fuente: [IHH].



Fotografías del Glaciar de Chacaltaya



Proyecciones del Chacaltaya



Chacaltaya 1940-2007

Fuente:[IRD].

Fotografías del Glaciar de Chacaltaya



Glaciar de Chacaltaya en 1996



Glaciar de Chacaltaya en el 2006



Glaciar de Chacaltaya en 1996



Glaciar de Chacaltaya en 1998

Fuente:[IRD].

Fotografías del Glaciar de Chacaltaya



Glaciar de Chacaltaya en el 2000



Glaciar de Chacaltaya en el 2002



Glaciar de Chacaltaya en el 2003



Glaciar de Chacaltaya en el 2005

Fuente:[IRD].

Datos de la Temperatura por año del Chacaltaya en °C.

Fuente[IHH].

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	0,2	0,0	0,2	0,4	0,3	-2,6	-2,3	-1,4	-0,2	-0,8	0,8	-0,2
2001	-0,6	-0,2	-0,7	-0,8	-1,8	-2,4	-2,6	-2,2	-0,9	-0,2	0,9	-0,2
2002	0,1	0,0	0,1	-0,6	-0,6	-1,4	-4,1	-2,1	-1,1	-0,9	0,0	0,5
2003	0,4	0,4	-0,1	0,0	0,0	0,0	-1,1	-1,3	-1,7	0,5	0,8	0,9
2004	0,0	0,3	1,1	1,1	-0,9	-2,9	-2,0	-1,6	0,5	0,6	0,9	1,2
2005	0,6	0,2	1,6	0,6	0,5	-0,8	-0,7	-0,4	-1,6	-0,5	0,2	0,5
2006	-0,5	0,3	0,5	0,1	-0,7	-1,3	-1,3	-1,2	-0,4	0,4	1,0	0,9
2007	1,1	0,2	0,2	0,6	-0,2	0,3	-1,5	0,5	0,5	0,3	0,4	1,0

Datos de la Precipitación por año del Chacaltaya en mm.

Fuente[IHH].

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1994	41,5	155,0	84,0	68,5	5,0	0,0	0,0	5,0	27,5	58,5	76,5	107,5
1995	135,0	80,0	150,0	40,0	0,0	5,0	5,0	7,5	42,5	7,5	61,5	128,5
1996	167,5	80,0	62,5	60,0	5,0	0,0	10,0	0,0	57,5	20,0	107,5	125,0
1997	158,3	110,0	151,7	46,7	10,0	0,0	1,7	0,0	61,1	87,6	68,0	65,3
1998	127,0	114,9	90,9	62,5	1,5	26,0	1,3	17,5	43,2	63,6	84,5	75,0
1999	78,8	124,5	165,5	65,5	2,5	4,5	1,3	7,5	58,8	73,8	63,0	114,0
2000	135,5	151,0	102,8	30,0	9,0	14,8	1,5	23,8	32,5	111,8	24,5	138,0
2001	224,0	125,8	126,8	50,8	36,0	13,0	6,5	32,8	57,5	28,3	82,3	141,3
2002	109,0	94,5	148,0	66,0	6,0	24,1	8,0	13,4	60,0	135,5	48,0	89,0
2003	176,5	136,4	145,4	42,5	12,0	4,0	6,8	13,8	35,8	54,8	44,3	199,3
2004	161,8	88,5	65,3	44,8	0,0	0,0	10,8	21,3	41,3	51,0	65,0	114,0
2005	138,3	114,3	29,8	36,0	0,0	3,3	0,0	0,0	70,5	49,0	79,3	122,0
2006	176,8	113,3	70,3	62,5	4,0	2,5	0,5	15,5	44,1	82,2	129,5	133,8
2007	119,3	154,5	105,3	62,8	13,7	0,3	13,3	2,5	84,9	46,5	67,5	125,5

Datos del Promedio de cada año.

Año	Precipitación [mm]	Temperatura [°C]
2000	64.58	-0.5
2001	77.06	-0.1
2002	66.79	-0.8
2003	72.60	-0.1
2004	55.29	-0.1
2005	53.52	0.0
2006	69.56	-0.2
2007	66.32	0.3

Fuente:[Instituto de Hidráulica e Hidrología IHH].

Datos del área y volumen de cada año del Chacaltaya.

Año	Area	Volumen
	m2	m3
2000	51695	230111
2001	47860	230635
2002	47865	166008
2003	40409	120021
2004	29723	80196
2005	10035	29759
2006	7197	17789
2007	3501	9881

Fuente:[Instituto de Hidráulica e Hidrología IHH].