



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Visualización interactiva del
fenómeno El Niño

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

P R E S E N T A :

NOMBRE DEL ALUMNO
JOEL ESPINOSA LONGI

TUTOR

M. EN C. ALEJANDRO AGUILAR SIERRA



2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno
Espinosa
Longi
Joel
56 17 02 79
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Ciencias de la Computación
098050332

2. Datos del tutor
M en C
Alejandro
Aguilar
Sierra

3. Datos del sinodal 1
Mat
María Concepción Ana Luisa
Solís
González Cosío

4. Datos del sinodal 2
M en C
María del Carmen
Villar
Patiño

5. Datos del sinodal 3
Manuel René
Garduño
López

6. Datos del sinodal 4
Edgar
Garduño
Ángeles

7. Datos del trabajo escrito
Visualización interactiva del fenómeno El Niño
62 p
2007

Índice general

Introducción	v
1. El Niño - Oscilación del Sur	1
1.1. Condiciones normales	3
1.2. Condiciones de El Niño	4
1.3. Condiciones de La Niña	6
1.4. Impactos climáticos	7
1.5. Impactos en el ecosistema	8
2. Procesamiento y representación de datos	11
2.1. Temperatura subsuperficial del océano	12
2.1.1. Características y obtención de los datos	12
2.1.2. Construcción de la representación visual	14
2.1.2.1. <i>Marching Cubes</i>	15
2.1.2.2. Extracción pseudo-directa de isosuperficies	22
2.2. Temperatura superficial del océano	23
2.2.1. Características y obtención de los datos	23
2.2.2. Construcción de la representación visual	23
2.3. Presión atmosférica en el océano	25
2.3.1. Características y obtención de los datos	25
2.3.2. Construcción de la representación visual	25
2.4. Vientos alisios	26
2.4.1. Características y obtención de los datos	26
2.4.2. Construcción de la representación visual	27
2.4.2.1. <i>Line Integral Convolution</i>	27
2.4.2.2. Representación con dos tablas de colores	28
3. Composición final del sistema	31
3.1. La biblioteca gráfica	31
3.2. Diseño	33
3.2.1. Responsabilidades del controlador	35
3.2.1.1. Lenguaje scripting	36
3.2.2. Responsabilidades de la vista	38

3.2.2.1. Geoescenario	38
3.2.2.2. Manejo de la interacción	38
3.2.3. Responsabilidades del modelo	38
3.2.3.1. Gráficas de escena	39
Resultados	45
Conclusiones	57
Bibliografía	60

Índice de figuras

1.	Bisonte rupestre de la cueva de Altamira, que muestra una de las primeras formas de comunicación visual.	V
2.	Mapa Mundi por Claudio Ptolomeo.	VI
3.	Mapa de China (1137 A.C).	VI
4.	Características de un embrión humano por Leonardo da Vinci.	VII
5.	Características de la estructura y movimiento de un brazo por Leonardo da Vinci.	VII
6.	Representación de agua cayendo y pasando por obstáculos por Leonardo da Vinci.	VIII
7.	Diseño de una maquina voladora por Leonardo da Vinci.	VIII
8.	Imagen de corrientes en el Golfo de México, junto a un fragmento de los datos correspondientes.	IX
9.	Imagen de resonancia magnética de un cerebro sano.	X
1.1.	Localización de Tahiti y Darwin.	2
1.2.	Direcciones en las que se desvían las corrientes y los vientos, bajo el efecto de Coriolis.	3
1.3.	Condiciones Normales.	4
1.4.	Condiciones en presencia de El Niño.	5
1.5.	Condiciones en presencia de La Niña.	6
1.6.	Condiciones del clima en presencia de El Niño.	8
2.1.	Posiciones de las boyas de TAO/TRITON.	13
2.2.	Características de una boya.	13
2.3.	Configuración de un cubo del algoritmo <i>Marching Cubes</i>	16
2.4.	Configuraciones bajo simetrías y rotaciones del algoritmo <i>Marching Cubes</i> . Los puntos negros indican donde hay datos.	16
2.5.	Corte sobre el ecuador de datos interpolados con LibLip, donde se muestran las formaciones en forma de celda.	18
2.6.	Diagrama de Voronoi y Delaunay en 2D.	20
2.7.	Corte sobre el ecuador de datos interpolados por vecinos naturales.	22
2.8.	Tabla de colores, donde los colores mas rojos representan una mayor temperatura y los colores mas azules una menor.	24

2.9. Climatología para enero de la temperatura superficial del océano.	24
2.10. Datos de temperatura superficial del 5 de enero de 1997.	25
2.11. Anomalías de temperatura superficial correspondientes a la figura 2.10.	25
2.12. Climatología para el mes de enero de la presión atmosférica en el océano.	26
2.13. Datos de presión atmosférica del mes de enero de 1997.	26
2.14. Anomalías de presión atmosférica correspondientes a la figura 2.13.	26
2.15. Imagen base utilizada para LIC.	27
2.16. LIC de los datos de viento del 1 de enero de 1997.	28
2.17. Tabla de colores para los vientos que soplan de este a oeste.	29
2.18. Tabla de colores para los vientos que soplan de oeste a este.	29
2.19. Datos de viento del 1 de enero de 1997.	29
3.1. Arquitectura de Open Inventor.	32
3.2. Diagrama de componentes del sistema.	34
3.3. Diagrama de clases del sistema.	35
3.4. Símbolos para la gráfica de escena de Open Inventor.	39
3.5. Gráfica de escena de GeoSceneObjectSubST.	41
3.6. Gráfica de escena de GeoSceneObjectSST.	42
3.7. Gráfica de escena de GeoSceneObjectSLP.	43
3.8. Gráfica de escena de GeoSceneObjectWND.	43
3.9. Captura del sistema que muestra las anomalías de temperatura superficial del 1 de enero de 1997.	46
3.10. Captura del sistema que muestra las anomalías de temperatura superficial del 24 de diciembre de 1997.	47
3.11. Captura del sistema que muestra las anomalías de temperatura superficial del 24 de diciembre de 1998.	48
3.12. Captura del sistema que muestra la temperatura subsuperficial del 1 de enero de 1998.	49
3.13. Captura del sistema que muestra las anomalías de temperatura superficial y la temperatura subsuperficial del 1 de enero de 1998.	50
3.14. Captura del sistema que muestra las anomalías de presión atmosférica del 1 de enero de 1998.	51
3.15. Captura del sistema que muestra las anomalías de vientos alisios del 1 de enero de 1998.	52
3.16. Captura del sistema que muestra todas las variables al mismo tiempo del 1 de enero de 1998.	54
3.17. Captura del sistema que muestra las anomalías de vientos alisios del 24 de diciembre de 1998.	55

Introducción

La necesidad del ser humano por expresar y compartir ideas de situaciones cotidianas, favoreció el desarrollo del lenguaje y uno de los medios de comunicación utilizados fue la representación gráfica; un ejemplo son las pinturas rupestres, donde las imágenes muestran un intento de representación y de comunicación de los acontecimientos cotidianos ocurridos en ese tiempo (figura 1). Posteriormente las representaciones gráficas fueron utilizadas para la expresión del conocimiento, mediante la creación de mapas cartográficos como se muestra en la figura 2 que es uno de los mapas realizados por Claudio Ptolomeo, así como el antiguo mapa de China (1137 A.C) (figura 3). Las representaciones gráficas también fueron utilizadas en la creación de esquemas científicos, donde Leonardo da Vinci fue uno de los más notorios, ya que elaboró diferentes tipos de esquemas para representar sus ideas y observaciones: las características que presenta un embrión humano (figura 4), las características de la estructura y movimiento de partes del cuerpo humano (figura 5), las corrientes generadas por un flujo de agua (figura 6), así como planos de diversos artefactos (figura 7).

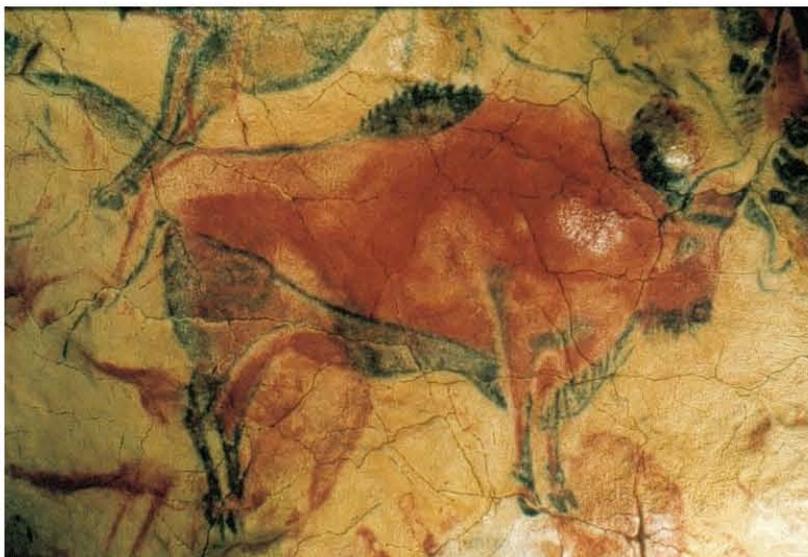


Figura 1: Bisonte rupestre de la cueva de Altamira, que muestra una de las primeras formas de comunicación visual.



Figura 2: Mapa Mundi por Claudio Ptolomeo.

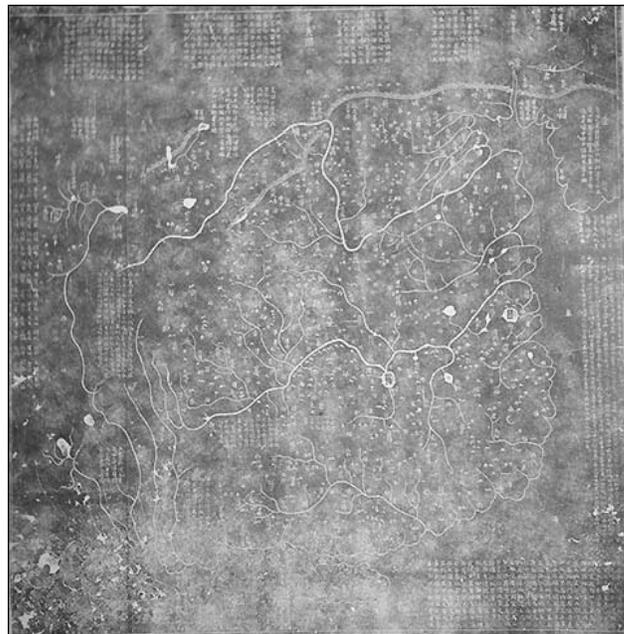


Figura 3: Mapa de China (1137 A.C.).



Figura 4: Características de un embrión humano por Leonardo da Vinci.

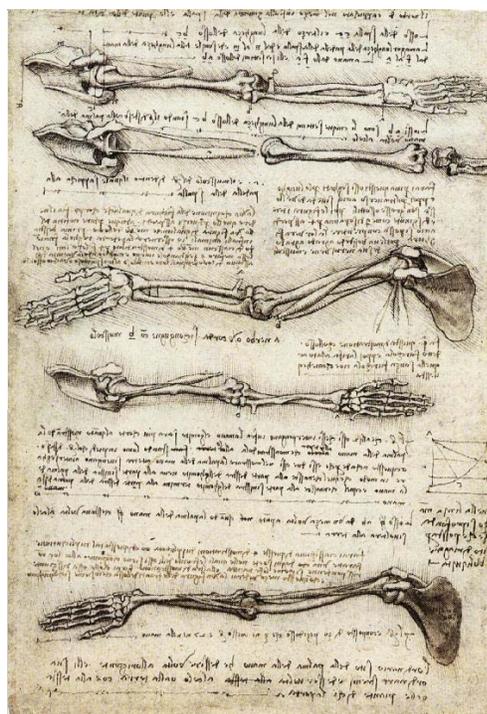


Figura 5: Características de la estructura y movimiento de un brazo por Leonardo da Vinci.

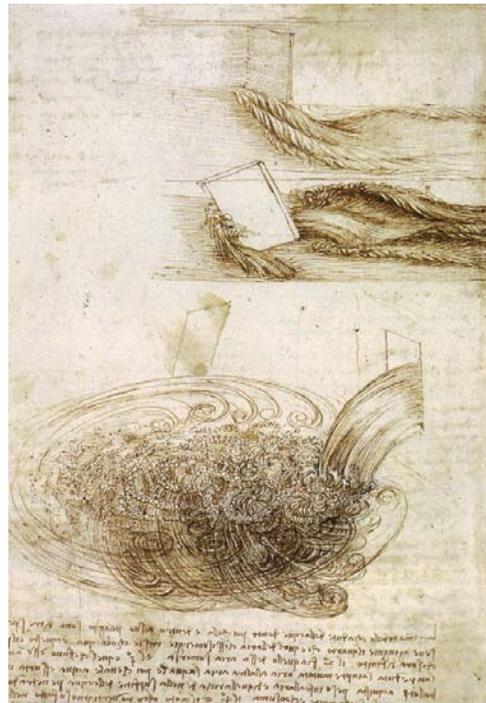


Figura 6: Representación de agua cayendo y pasando por obstáculos por Leonardo da Vinci.

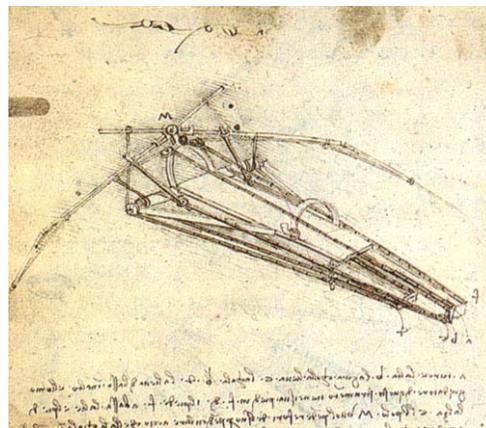


Figura 7: Diseño de una maquina voladora por Leonardo da Vinci.

Actualmente la visualización es una de las áreas de las Ciencias de la Computación, que permite crear representaciones visuales, ya sean imágenes, diagramas o animaciones, para la interpretación gráfica de la información. Citando un dicho muy conocido, *Una imagen dice más que mil palabras*, lo que significa que una representación visual brinda una forma más simple de interpretar la información; como se puede observar en la figura 8, es más fácil interpretar una imagen, que el conjunto de datos por sí solo.

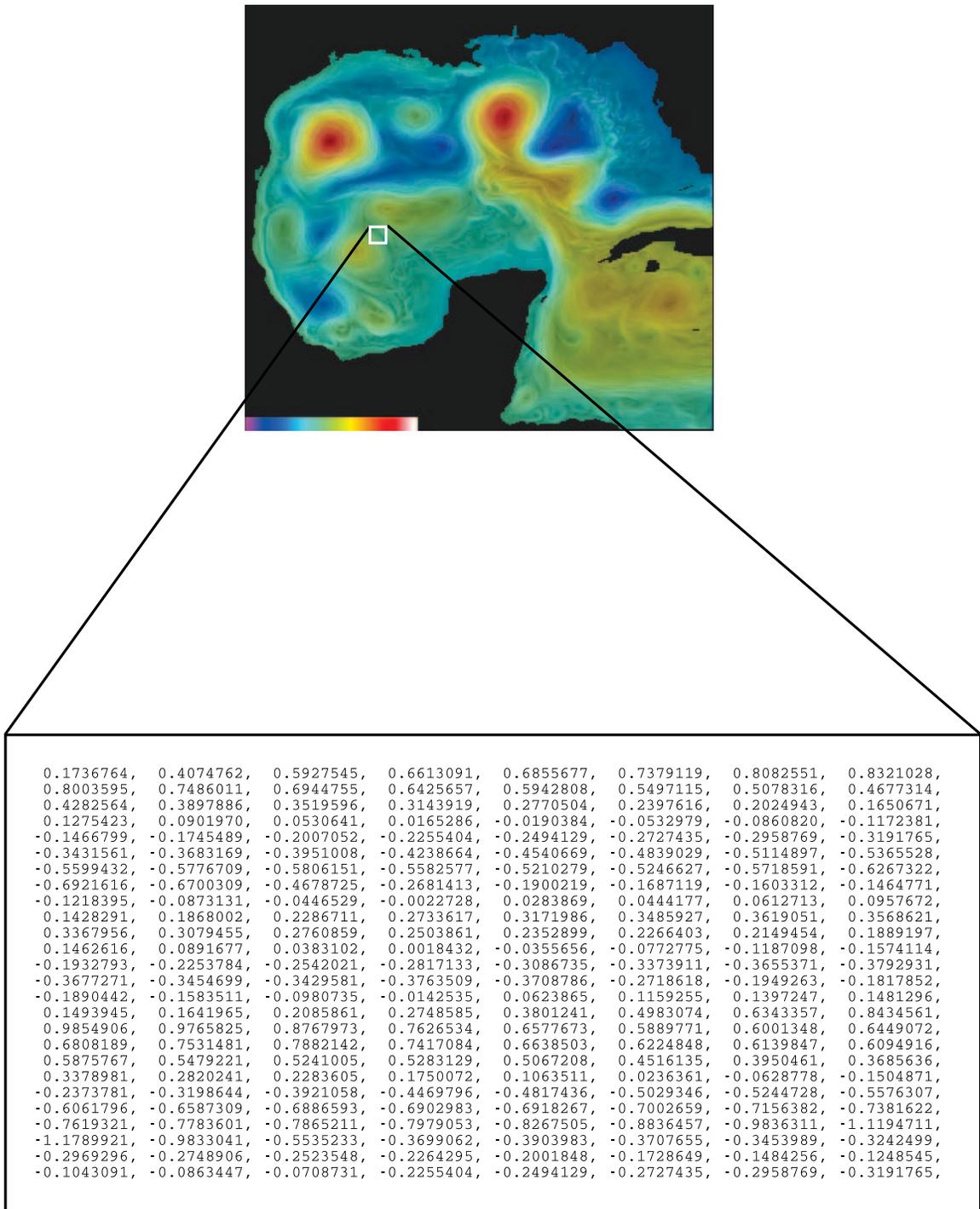


Figura 8: Imagen de corrientes en el Golfo de México, junto a un fragmento de los datos correspondientes.

Varias de las técnicas de visualización utilizadas antiguamente son extendidas y mejoradas actualmente; gracias al poder de procesamiento que brindan las computadoras y el desarrollo de algoritmos para la visualización. Por ejemplo, es posible generar visualizaciones de datos más sofisticadas que involucren una gran cantidad de información (cientos o miles de megabytes), permitiendo la comprensión de diversos procesos de la naturaleza que antes eran desconocidos o poco entendidos debido a su complejidad y a la cantidad de datos involucrados.

La visualización no es un área nueva, ha sido utilizada desde la antigüedad en un intento por representar y comprender lo que se encuentra a nuestro alrededor y los eventos que acontecen en la naturaleza. Para realizar una visualización es necesario contar con información, la cual puede provenir de las observaciones de un fenómeno real, de la simulación de un modelo numérico o simplemente de la medición en algún medio. Dependiendo del tipo de información con la que se cuente se tendrán diversas características que se quieran visualizar; por ejemplo, si se está trabajando con datos de un escáner de resonancia magnética (figura 9), dependiendo del tipo de enfermedad que se esté buscando será la característica que se desee mostrar y, por consiguiente, el tipo de técnica que se deberá utilizar para la visualización de esa información; cabe mencionar que los datos de resonancia magnética son un ejemplo de datos obtenidos a partir de la medición en un medio ya que estos no corresponden con un fenómeno generado en la naturaleza o una simulación, sino que provienen de mediciones realizadas en el cuerpo humano. Además de contar con un conjunto de datos es necesario conocer el tipo de características que se quiere visualizar, para así poder escoger el algoritmo adecuado que cumpla con las necesidades visuales requeridas. Es posible utilizar diferentes técnicas de visualización para el mismo conjunto de datos, lo que brinda diversas formas de visualizar las características requeridas y así resaltar distintos aspectos obteniendo diferentes resultados.

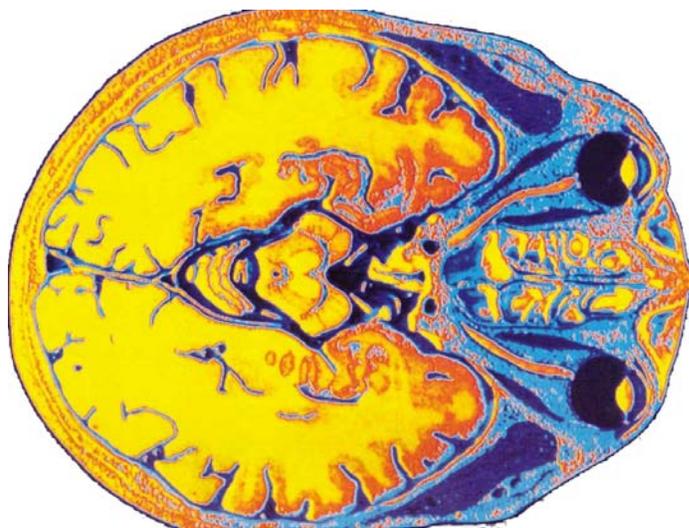


Figura 9: Imagen de resonancia magnética de un cerebro sano.

Algo deseable en visualización es poder interactuar con los datos y su representación. La visualización interactiva permite que el usuario produzca eventos o señales para comunicarse con la representación visual, modificando el estado o las características que presenta, además estos cambios deben ser visibles en la representación visual lo más rápido posible.

Los fenómenos naturales han presentado un misterio para los seres humanos ya que afectan el entorno en donde vivimos; antiguamente no podían ser explicados, por lo que fueron atribuidos a los dioses; hoy en día es posible explicar algunos de ellos, así como conocer sus impactos en la economía, la salud y otros sectores de nuestra vida. Dentro de los fenómenos naturales que causan un mayor impacto, están aquellos que repercuten en el clima mundial, ya que afectan completamente las condiciones y el comportamiento del ambiente causando alteraciones graves en todo el planeta. Un ejemplo de este tipo de fenómeno y en el que se basa este trabajo es el fenómeno de El Niño. Este fenómeno aunque se desarrolla principalmente en el Océano Pacífico ecuatorial, repercute de forma directa e indirecta en regiones de todo el planeta. El estudio y comprensión de este tipo de fenómenos es de gran interés, para entender los procesos que se encuentran en la naturaleza y poder generar medidas de prevención en contra de sus efectos negativos.

El propósito de este trabajo es elaborar las herramientas necesarias para realizar con base en un modelo didáctico, una visualización interactiva que permita observar las diferentes condiciones que presenta el océano Pacífico Ecuatorial, es decir, las condiciones normales, en presencia de El Niño y de La Niña, con la finalidad de ser utilizado en docencia. Este trabajo se realizó bajo el proyecto *Visualización Avanzada para la enseñanza de Ciencias Atmosféricas* para el observatorio de visualización de la UNAM, el IXTLI.

La tesis se encuentra organizada de la siguiente manera:

- El capítulo 1 explica el fenómeno *El Niño - Oscilación del Sur*, el cual se desea visualizar en este trabajo. Se explican las diferentes condiciones que presenta el Océano Pacífico ecuatorial así como las diferentes variables involucradas en dichas condiciones y los impactos que ocasiona. Las referencias principales para este capítulo son: [1], [2].
- El capítulo 2 explica la fuente de los datos, es decir, de donde se obtienen y la estructura que tienen. Además, se explican las técnicas utilizadas para generar los diferentes elementos visuales, correspondientes a cada variable involucrada en el fenómeno. Las referencias principales de este capítulo son: [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11].
- El capítulo 3 explica la composición final del sistema, en donde los componentes visuales obtenidos en el capítulo 2, se utilizan para construir la visualización final. Se muestra el diseño que presenta el sistema, es decir, las clases involucradas, la interacción que presentan entre ellas, así como las responsabilidades y funciones de cada componente. Se explica la parte gráfica, que se realiza con la ayuda de la biblioteca *Open Inventor*.

- El capítulo de resultados presenta las características finales del sistema, así como un ejemplo de como utilizar el sistema para impartir una clase.
- El capítulo de conclusiones presenta la utilidad del sistema, los problemas que ocurrieron, así como posibles direcciones para extender y/o mejorar el sistema.

Capítulo 1

El Niño - Oscilación del Sur

La corriente de El Niño, es el término que utilizaron los pescadores de las costas de Perú y Ecuador para referirse a las corrientes oceánicas cálidas provenientes del oeste del Océano Pacífico ecuatorial, que llegan hasta las costas de América del sur y se presentan en diferentes intervalos de tiempo. Los pescadores observaron que las aguas frías provenientes de la Antártica que pasan por Chile y recorren gran parte de la costa peruana, conocidas como la corriente de Humboldt, aumentaban su temperatura cerca del periodo de las fiestas navideñas, haciendo que los cardúmenes de peces se desplacen hacia el sur. Esta corriente obtuvo su nombre debido a que su aparición se relacionó con la llegada de El Niño Jesús. El término *evento de El Niño* se utiliza para referirse a los cambios relacionados con temperaturas anormalmente altas en el Océano Pacífico ecuatorial, en contraste, el término *evento de La Niña* fue creado para referirse a las condiciones donde se presentan temperaturas anormalmente bajas en el Océano Pacífico ecuatorial, que suceden generalmente después de un evento de El Niño.

La *Oscilación del sur o Austral*, es un vaivén en la presión atmosférica entre el sureste y suroeste del Océano Pacífico, en donde al presentarse una presión atmosférica alta en el sureste del océano, en el suroeste se presenta una presión atmosférica baja y viceversa; esta oscilación fue detectada por Sir Gilbert Walker alrededor del año 1930 y la bautizó como la Oscilación del sur. Se han definido varios índices, tanto atmosféricos como oceánicos, para poder cuantificar los cambios que ocurren durante esta oscilación, donde uno de los índices más utilizados es el conocido como *Índice de Oscilación del Sur* o *IOS*, el cual se calcula mediante la diferencia estandarizada de la presión atmosférica a nivel del mar entre Tahiti, localizado en medio del Océano Pacífico (18°S, 150°W) y Darwin localizado en la costa norte de Australia (12°S, 130°E) (figura 1.1).

El Niño-Oscilación del Sur o *ENOS* es una alteración del sistema global océano-atmósfera que se origina en el Océano Pacífico, en donde interactúan los eventos de El Niño, La Niña, (que representan la parte oceánica de la alteración) y la Oscilación del sur (que representa la parte atmosférica). Esta alteración presenta cambios en la presión atmosférica, en la velocidad de los vientos cercanos a la superficie del océano, en la localización de las lluvias y en la



Figura 1.1: Localización de Tahiti y Darwin.

temperatura del Océano Pacífico ecuatorial. El sistema formado por el océano y la atmósfera experimenta continuamente cambios en forma de oscilación, que se presenta en intervalos que van de 2 a 7 años. El evento de El Niño está relacionado con la fase negativa de la Oscilación del sur, es decir, cuando en Tahiti la presión atmosférica es baja mientras que en Darwin es alta; en cambio La Niña está relacionada con la fase positiva de la Oscilación del sur, es decir, cuando en Tahiti la presión atmosférica es alta mientras que en Darwin es baja. Un evento de ENOS se define de forma más precisa como la respuesta dinámica del Océano Pacífico al forzamiento prolongado de los vientos ecuatoriales de niveles bajos; así como a la presencia de aguas anormalmente cálidas frente a las costas de Ecuador y Perú, donde para que se consideren anormales deben mostrar una alteración de su valor normal superior a una desviación estándar, con una duración de por lo menos cuatro meses. Los eventos ENOS varían notablemente entre sí, principalmente en lo que respecta a su intensidad y duración, por lo que se clasifican según la intensidad que presentan, como débil, moderado, fuerte y extremadamente fuerte.

La mayoría de la radiación solar que llega al océano se absorbe en sus primeros 10 metros, donde olas, mareas y turbulencia mezclan rápidamente este calor en dirección descendente y se distribuye uniformemente en la capa superficial. A esta capa oceánica se le conoce como la *capa de mezcla*, la cual presenta temperaturas altas cercanas a la de la superficie del océano. En las profundidades del océano, se encuentran regiones de agua con temperaturas muy bajas, debido a que los rayos del sol no llegan a esas zonas, a estas capas oceánicas se les conoce como *capas profundas*. La zona de transición entre la capa de mezcla y las capas profundas se conoce como *termoclina*, que es una capa oceánica delgada que delimita el cambio de la temperatura. Las aguas cálidas localizadas en la capa de mezcla son generalmente pobres en

nutrientes, mientras que las aguas frías localizadas en la capa de aguas profundas cercanas a la termoclina poseen un alto contenido de ellos; la termoclina juega un papel importante en la vida marina, porque es una capa oceánica rica en nutrientes necesarios para la alimentación de diversas especies, ya que evita el flujo de nutrientes desde la capa de aguas frías hacia la capa de mezcla, ocasionando que los nutrientes se queden en ella. Las zonas oceánicas donde la termoclina presenta una baja profundidad o se encuentra poco definida, son más ricas en nutrientes.

1.1. Condiciones normales

Durante condiciones normales o sin presencia del fenómeno de El Niño o La Niña, los vientos cercanos a la superficie que soplan de este a oeste, conocidos como vientos *alisios*, trasladan y acumulan una gran cantidad de agua y calor hacia la parte oeste del Océano Pacífico ecuatorial, logrando aumentar el nivel del mar cerca de Indonesia hasta 30cm por encima de su valor normal y disminuyéndolo cerca de Perú y Ecuador. La rotación de la Tierra provoca que los vientos y las corrientes oceánicas que se desplazan siguiendo un meridiano se desvíen, lo que se conoce como el efecto de Coriolis (figura 1.2), este efecto propicia un fenómeno conocido como *surgencia*, en el que las aguas profundas y frías afloran hacia la superficie, disminuyendo la temperatura superficial del mar, desplazando los nutrientes contenidos en la capa profunda hacia la superficie, provocando un enriquecimiento de la capa superficial del océano y haciendo que la vida marina se encuentre allí.

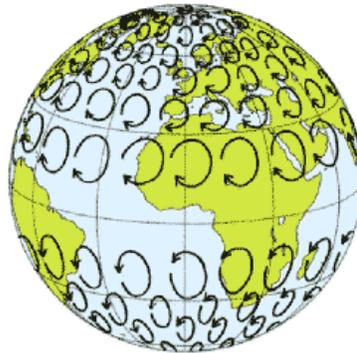


Figura 1.2: Direcciones en las que se desvían las corrientes y los vientos, bajo el efecto de Coriolis.

En el oeste del Océano Pacífico se presenta una presión atmosférica baja mientras que en el este una presión atmosférica alta, lo que ocasiona lluvias en el sureste de Asia, mientras que cerca de América son escasas, además esta diferencia de presión fortalece los vientos alisios y el transporte de agua cálida hacia el oeste.

La termoclina se encuentra ubicada cerca de la superficie en la parte este del Océano Pacífico, es decir en América, mientras que en la parte oeste se ubica a mayor profundidad, lo que permite una buena pesca cerca de Perú y Ecuador, debido a que los nutrientes se encuentran cerca de la superficie.

En la figura 1.3 se muestran las características de las condiciones normales: la termoclina es la línea divisoria entre la capa de mezcla y la de aguas profundas, para la temperatura superficial del océano el color rojo indica una temperatura alta y el azul una baja, las flechas sobre el ecuador indican la dirección en la que se desplazan las masas oceánicas debido a la influencia de los vientos cercanos a la superficie.

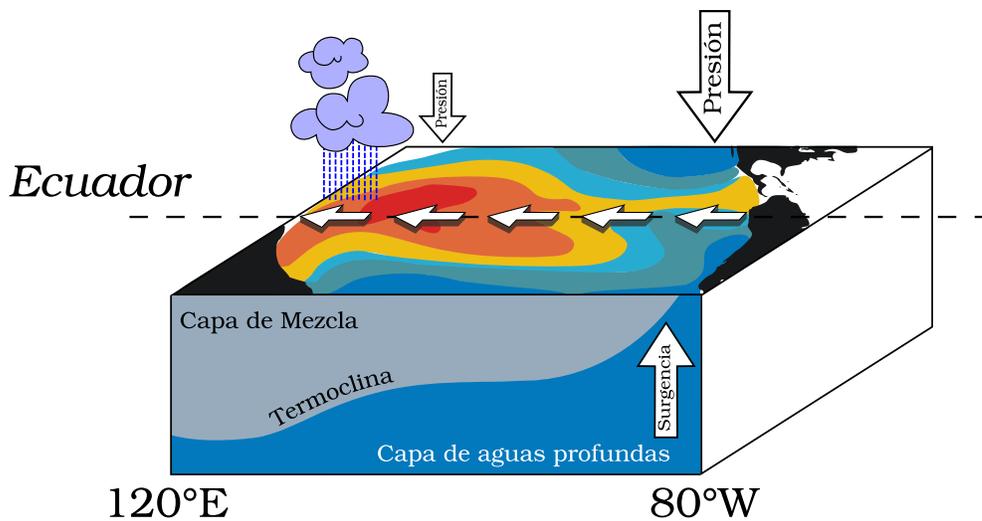


Figura 1.3: Condiciones Normales.

1.2. Condiciones de El Niño

En condiciones de El Niño se genera un aumento en la presión atmosférica a nivel del mar en la región de Oceanía y disminuye en el Pacífico tropical y subtropical junto a las costas de América del sur y América Central; esto contribuye a disminuir o anular la diferencia de presión a nivel del mar entre ambos extremos del Pacífico ecuatorial, los vientos alisios se atenúan debido al cambio en la diferencia en la presión, inclusive, llegando a invertir su dirección en el peor de los casos, esta atenuación ocasiona que las masas oceánicas de agua cálida desplazadas durante las condiciones normales, se desplacen lentamente de regreso hacia el este aumentando la temperatura del centro y este del Océano Pacífico. Las masas oceánicas después de alrededor de 6 meses alcanzan las costas de América del sur. Por la atenuación de los vientos alisios, disminuye la presencia de la surgencia a lo largo del Pacífico ecuatorial, lo que contribuye al aumento de la temperatura superficial del mar en esta zona.

Uno de los efectos más notables durante un evento de El Niño es el aumento de la temperatura superficial del océano en el Pacífico ecuatorial oriental, llegando a incrementarse hasta 4°C por encima del valor normal. Todos estos acontecimientos se auto-refuerzan, ya que el cambio en la presión atmosférica provoca un debilitamiento en los vientos alisios. El debilitamiento de los vientos propicia que el agua acumulada en el oeste se desplace hacia el este, y esto a su vez, logra que la surgencia disminuya, convirtiéndose en un ciclo que aumenta de manera drástica la temperatura del océano.

Durante estas condiciones, además del traslado de masas oceánicas de oeste a este, las precipitaciones también cambian su ubicación hacia América, debido a que la presión atmosférica baja en el lado este del Pacífico y sube en el oeste, lo que provoca graves sequías cerca de Indonesia y el norte de Australia, mientras que en América puede llegar a provocar lluvias excesivas e inundaciones.

Durante El Niño la termoclina desciende cerca de América mientras que en la parte oeste asciende, ocasionando un aumento de temperatura en la capa de mezcla. Este cambio en la termoclina por la disminución de la surgencia, causa que los nutrientes permanezcan en las aguas profundas, propiciando que la vida marina se encuentre lejos de la superficie del mar y la pesca disminuya. En la figura 1.4 se muestran las características de las condiciones de El Niño.

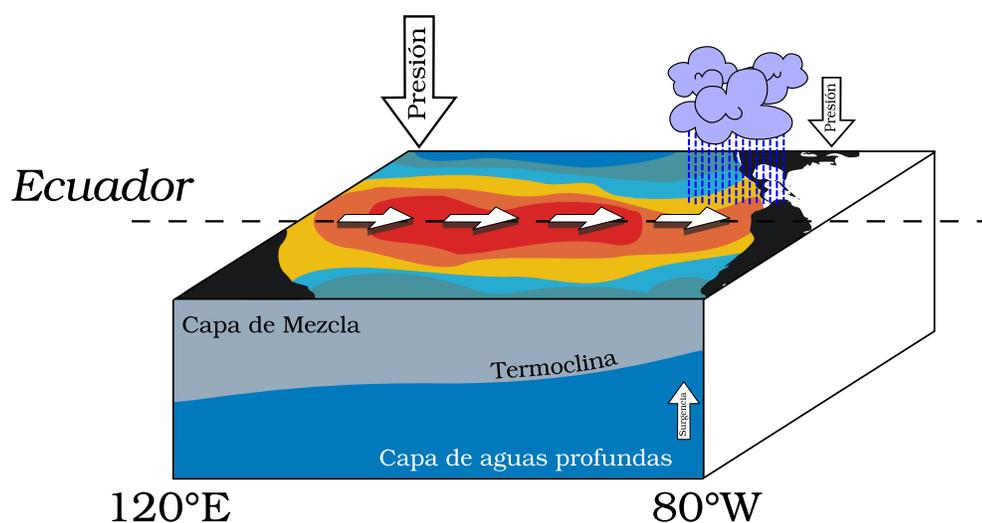


Figura 1.4: Condiciones en presencia de El Niño.

1.3. Condiciones de La Niña

Durante La Niña se presentan las condiciones inversas a las presentes durante un evento de El Niño; es decir, parecidas a las normales pero de manera más extrema: el aumento de la diferencia de presión entre la costa de América del sur y Oceanía hace que los vientos alisios aumenten su intensidad, desplazando una mayor cantidad de agua y calor hacia el oeste, cerca de Indonesia, y disminuyendo el nivel del mar en las costas de Colombia, Ecuador, Perú y norte de Chile. La surgencia de las aguas profundas se intensifica dando como resultado una temperatura superficial del mar por debajo del valor normal; la disminución de la temperatura es uno de los efectos más notables durante un episodio de La Niña, ya que puede llegar a unos 4°C por debajo del valor normal. Al igual que sucede durante El Niño estas condiciones se auto-refuerzan, y logran bajar la temperatura del Océano Pacífico drásticamente. Al presentarse estas condiciones, el cambio en la presión, los vientos y la temperatura del océano, generan precipitaciones extremas al oeste del océano y causan sequías en América.

Durante La Niña, la termoclina se desplaza de manera inversa a como lo hizo durante El Niño, ascendiendo cerca de América y descendiendo cerca de la India; pero haciéndolo de una manera más pronunciada que en condiciones normales, propiciando la disminución de la temperatura del océano. Durante La Niña la pesca puede sufrir una sobre explotación debido a que la vida marina se encuentra más cerca de la superficie. En la figura 1.5 se muestran las características de las condiciones de La Niña.

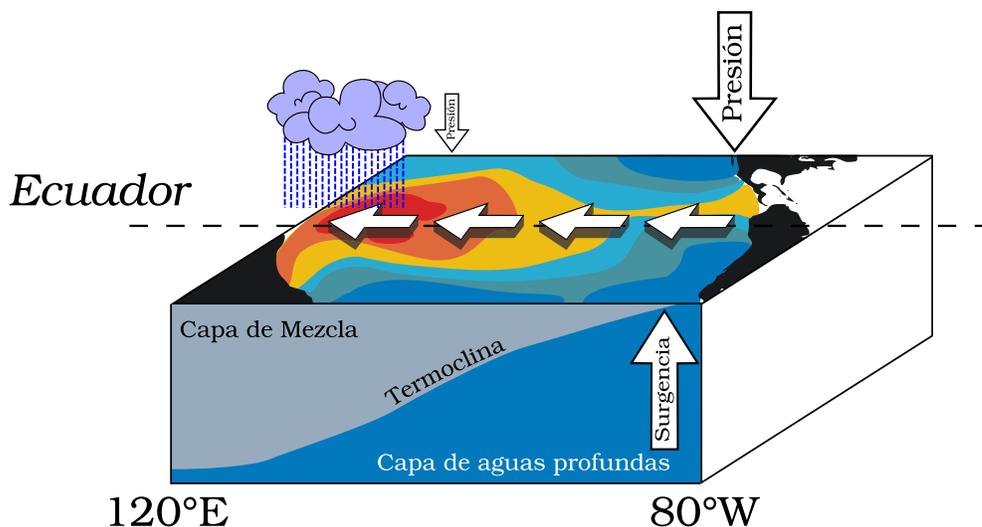


Figura 1.5: Condiciones en presencia de La Niña.

1.4. Impactos climáticos

Uno de los principales cambios climáticos que se observan durante El Niño es la inversión y el incremento en la intensidad de las precipitaciones, lo que genera sequías en regiones normalmente húmedas como en Australia e Indonesia y genera fuertes lluvias cerca del Pacífico central y al oeste de América del sur, llegando a causar severas inundaciones. La inversión y el aumento de la intensidad de las precipitaciones, junto con la transferencia de calor a la atmósfera debido al aumento de temperatura en el océano, generan cambios en la circulación atmosférica y cambios climáticos fuera del Pacífico tropical. El Niño presenta efectos globales que ocurren en el norte y sur del Océano Pacífico, así como en las cuencas oceánicas y sobre los continentes.

Durante El Niño, en América del norte hay lluvias invernales anormalmente abundantes en la costa oeste y en los estados cercanos al Golfo de México; en Centro América los inviernos tienden a ser menos fríos y en América del sur se presenta un exceso de lluvia en diversas zonas, durante el verano y el otoño las lluvias se intensifican en las costas al sur de Ecuador y norte de Perú, durante el invierno en la región central de Chile y durante la primavera en el sur de Brasil, Uruguay, Paraguay el noreste de Argentina y en las zonas cercanas al Ecuador, Uganda, Kenia y parte de Zaire las lluvias son anormalmente fuertes. Por otra parte, la ocurrencia de estos eventos suele asociarse con la falta de lluvias en la zona norte, principalmente en las Guyanas y regiones cercanas, así como en la región andina de Colombia y Venezuela, en el Altiplano y en el noreste de Brasil, mientras que en África, Sudáfrica, Mozambique y Zambia las lluvias escasean durante el verano.

La cantidad e intensidad de los huracanes se ve afectada, ya que tienden a disminuir durante un evento de El Niño de intensidad moderada o fuerte; en contraste durante La Niña los huracanes tienden a aumentar en cantidad e intensidad. Los cambios que ocurren hacen que durante La Niña los huracanes provenientes del Atlántico impacten América del norte con mayor frecuencia y fuerza generando pérdidas tanto humanas como económicas, mientras que durante El Niño suelen aparecer muy pocos huracanes.

Dentro de las diferentes manifestaciones registradas de El Niño, los eventos con mayor intensidad ocurrieron durante los periodos de 1982-1983 y 1997-1998, los cuales ocasionaron consecuencias globales dramáticas debido a su gran magnitud, mientras que existen otros eventos menos fuertes como el ocurrido durante 2004-2005, que tienen un impacto mínimo o poco notable, ya que su pequeña magnitud se ve opacada por el ruido climático de fondo en la atmósfera y el océano. La Niña también produce impactos climáticos fuertes que son opuestos a los generados por El Niño y generalmente se presentan después de un evento de El Niño.

El Niño afecta el clima de México generando una mayor precipitación durante el invierno y escasez de lluvias durante el verano, por lo que se relaciona la presencia de El Niño con la escasez de agua, lo que afecta de forma drástica la producción agrícola de granos básicos en diversas regiones del país.

Asociando El Niño y el clima de México, se puede decir en términos generales que las lluvias de invierno se intensifican durante El Niño en el noroeste y noreste de México, mientras que disminuyen hacia la parte sur. Los inviernos en presencia de El Niño resultan más fríos en casi todo el país, mientras que los veranos son más secos y cálidos que en veranos durante La Niña. En contraste, durante años normales el clima mexicano en invierno se encuentra parcialmente modulado por frentes fríos y lluvias invernales, tanto en la región de Baja California, Sonora y Chihuahua, como en la de Nuevo León y Tamaulipas, estados ubicados al norte del país. El impacto de El Niño en las lluvias de invierno de México no es siempre el mismo, ya que existen diferencias en las características regionales y temporales de las anomalías de lluvia y temperatura de un año con condiciones de El Niño a otro.

En México durante un evento de El Niño se inhibe la entrada de humedad por las costas del Pacífico y debilita la componente orográfica de la lluvia, que es importante en el total de lluvias que ocurren en la zona. La disminución de las lluvias en México durante El Niño, está asociada con la disminución en el número de huracanes en el Caribe y Golfo de México, siendo significativa esta relación.

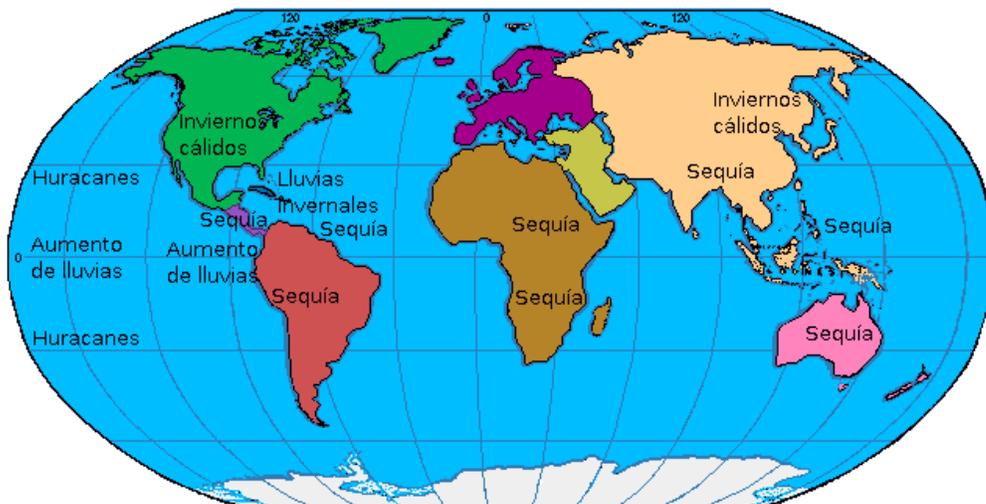


Figura 1.6: Condiciones del clima en presencia de El Niño.

1.5. Impactos en el ecosistema

La alteración de las condiciones ambientales que surgen como resultado de un evento de El Niño repercute en los patrones globales climáticos, con efectos en los niveles altos de la cadena alimenticia, tanto marina como terrestre. Durante el Niño, la producción primaria en el Pacífico ecuatorial oriental, que representa alrededor del 10% de la producción primaria

total del mundo, decrece considerablemente en respuesta al debilitamiento de la surgencia y al cambio de profundidad de la termoclina. Esta disminución de la producción modifica la fecundidad, mortalidad y distribución geográfica de los mamíferos marinos, aves marinas y especies de peces comercialmente importantes.

Los cambios en la temperatura y en la salinidad de las aguas, modifican las condiciones ambientales de los ecosistemas marinos, afectando las poblaciones de peces y de aves marinas, especialmente en las áreas del Pacífico americano y por consecuencia la actividad pesquera. Los cambios en la circulación atmosférica alteran el clima global, con lo que disminuye la agricultura, la pesca, las reservas de agua de las regiones, además de otras actividades económicas importantes en diversas regiones del mundo.

El impacto que ocasiona El Niño en el ecosistema del Pacífico se extiende desde el mar abierto hasta las costas oeste, norte y sur de América. Además perturba las teleconexiones atmosféricas, influenciando ecosistemas localizados lejos del Pacífico tropical, como por ejemplo en el océano Austral, donde el impacto del fenómeno modifica la abundancia y distribución de unos crustáceos de 3 a 5 cm de longitud, llamados *krill*. Estos crustáceos son una pieza clave en el ecosistema marino de la Antártica. Dentro de las poblaciones afectadas por El Niño se ven particularmente afectadas las localizadas en las regiones norte del trópico, las cuales necesitan muchos años para poder recuperarse completamente del impacto.

Los arrecifes de coral forman una estructura muy importante para el ecosistema de los mares tropicales; los corales dependen de una relación simbiótica con una alga unicelular (*Zooxanthellae*) que se encarga de realizar la fotosíntesis y de brindarles su color particular. Las temperaturas elevadas asociadas con un evento fuerte de El Niño causan un blanqueamiento en los corales del trópico, es decir, las algas de los corales disminuyen provocando que los corales pierdan su color y mueran, dándoles un color más claro o completamente blanco. El más grande y devastador episodio de blanqueamiento de corales ocurrió durante El Niño de 1997-1998, donde el 16 % de los arrecifes de coral del mundo fueron destruidos.

El Niño también presenta cierta influencia sobre los ecosistemas terrestres, principalmente con la alteración de las lluvias, el calentamiento de la superficie y la cantidad de luz solar disponible. Estos cambios afectan principalmente la producción de plantas y animales, así como las estrategias específicas que ciertos animales utilizan para su reproducción. Los efectos de El Niño y La Niña han sido documentados en diversos ambientes como los bosques tropicales, los bosques boreales, los manglares, los desiertos y las áreas semiáridas. Las especies afectadas por los efectos de El Niño pueden responder de formas inesperadas al fenómeno, pudiendo llegar a crear una fuerte competencia en las relaciones presa-depredador. También pueden llegar a ocurrir extinciones locales; por ejemplo, el caso de una avispa en Borneo que desapareció por completo como resultado de una falta extrema de agua, asociada con El Niño de 1997-1998.

Los efectos que provoca El Niño en materia ambiental en México, están asociados principalmente a la disminución de las precipitaciones, lo que causa menor humedad en el suelo, propiciando incendios forestales y generando pérdidas de miles de hectáreas de bosques.

La presencia de corrientes de agua más caliente de lo normal, que ocurren durante El Niño, provoca la migración de especies marinas regionales, llegando a causar una seria ruptura en la cadena alimenticia, así como una disminución en algunas de las poblaciones marinas. Por ejemplo, se genera una disminución en la captura de sardina y calamar gigante, mientras que también aumenta la mortandad entre mamíferos marinos como los lobos marinos y las focas. La ballena gris migra (debido a la falta de alimentos) y regresa hasta el siguiente invierno.

Durante 1997 la precipitación pluvial en México comenzó a descender y los efectos climáticos de El Niño comenzaron a notarse. Para 1998 algunos pronósticos de lluvia eran pesimistas, pues se estimaba que los niveles de precipitación serían inferiores a los que se tuvieron durante 1997. Ante la falta de lluvias y disminución de los niveles de agua en las presas, los agricultores intentaron mantener sus actividades agropecuarias, mediante extracción de agua del subsuelo con el uso de pozos, lo que llevó a una sobreexplotación y una grave escasez de agua. Sin embargo, en 1998 las lluvias se recuperaron para finales del verano, lo que permitió aminorar en parte los efectos del retraso en las lluvias.

Capítulo 2

Procesamiento y representación de datos

Como se explicó en el capítulo anterior las variables involucradas en el fenómeno de El Niño son:

- La temperatura subsuperficial
- La temperatura superficial
- La presión atmosférica
- Los vientos alisios

El modelo docente utiliza estas variables como recurso para explicar los acontecimientos en el Océano Pacífico ecuatorial, donde los elementos visuales de cada variable facilitarán la explicación y comprensión de las diferentes condiciones. Los elementos visuales estarán contenidos en un ambiente interactivo, que permita su observación y exploración en tiempo real.

Los datos que se utilizan para generar los elementos visuales corresponden al periodo de 1997-2000, debido a que los eventos de El Niño y de La Niña que ocurrieron durante estas fechas, fueron muy significativos y ocasionaron un gran impacto en el planeta. Las razones para escoger este periodo en particular, son la existencia y accesibilidad de los datos, así como la presencia de las diferentes condiciones del océano y además no existen datos precisos anteriores a este periodo.

Para el manejo de los datos se utilizan dos formatos de archivos, *Network Common Data Form* (NetCDF) y *Hierarchical Data Format* (HDF5).

- El formato de archivos NetCDF proporciona un conjunto de interfaces para la manipulación de datos orientados a arreglos, es decir, permite manejar de forma más fácil los datos que se encuentran distribuidos en forma de arreglo en una o varias dimensiones, también permite tener información extra, como las dimensiones o los intervalos

válidos donde están definidos los datos, además puede contener meta-datos los cuales sirven para la correcta interpretación de los datos, pues brindan el marco de referencia necesario para manejar los datos, por último proporciona la posibilidad de tener varios conjuntos de datos dentro del mismo archivo.

- El formato de archivos HDF5, es un formato de tipo jerárquico que permite almacenar dos tipos de objetos, los *datasets* o conjuntos de datos y los grupos. Un *dataset* es un arreglo multidimensional en donde se almacenan los datos en forma de una malla regular, donde cada dato de la malla representa un valor escalar referenciado geográficamente. Un grupo es una estructura que permite organizar la información de manera jerárquica. Este formato brinda la posibilidad de tener varios conjuntos de datos, estructurándolos por medio de grupos y cada uno de ellos conteniendo su propio *dataset*.

Ambos formatos de archivo se utilizan ampliamente para la manipulación, almacenamiento y distribución de datos científicos.

Durante el desarrollo de este proyecto se revisaron varios artículos de visualización para encontrar las técnicas que mejor se ajusten a la representación buscada, así como para un mejor manejo del tipo de datos correspondientes a cada característica. Las técnicas de visualización son utilizadas para generar de forma individual cada componente visual y posteriormente construir con ellos la visualización interactiva.

2.1. Temperatura subsuperficial del océano

La temperatura de las capas oceánicas localizadas debajo de la superficie del mar, (conocida como temperatura subsuperficial) permite observar la ubicación de la termoclina durante las diferentes condiciones y apreciar la alteración de la temperatura en el Océano Pacífico ecuatorial.

2.1.1. Características y obtención de los datos

Los datos de temperatura subsuperficial del océano se obtienen gracias a *The National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), por medio de *Tropical Atmosphere Ocean/TRIangle Trans-Ocean buoy Network* (TAO/TRITON). Este sistema consiste de un arreglo de boyas distribuidas de manera pseudo-uniforme sobre el Océano Pacífico ecuatorial (figura 2.1). Cada boya posee un cable con el que se une a una ancla y que incluye una serie de sensores que se encuentran repartidos a lo largo de la profundidad, con una distribución pseudo-regular (figura 2.2).

La creación del arreglo de boyas TAO/TRITON fue motivado por el evento de El Niño ocurrido durante 1982-1983, que causó un gran impacto en el planeta y no fue predicho ni

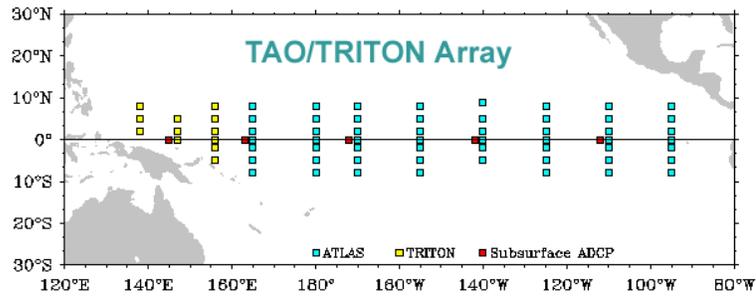


Figura 2.1: Posiciones de las boyas de TAO/TRITON.

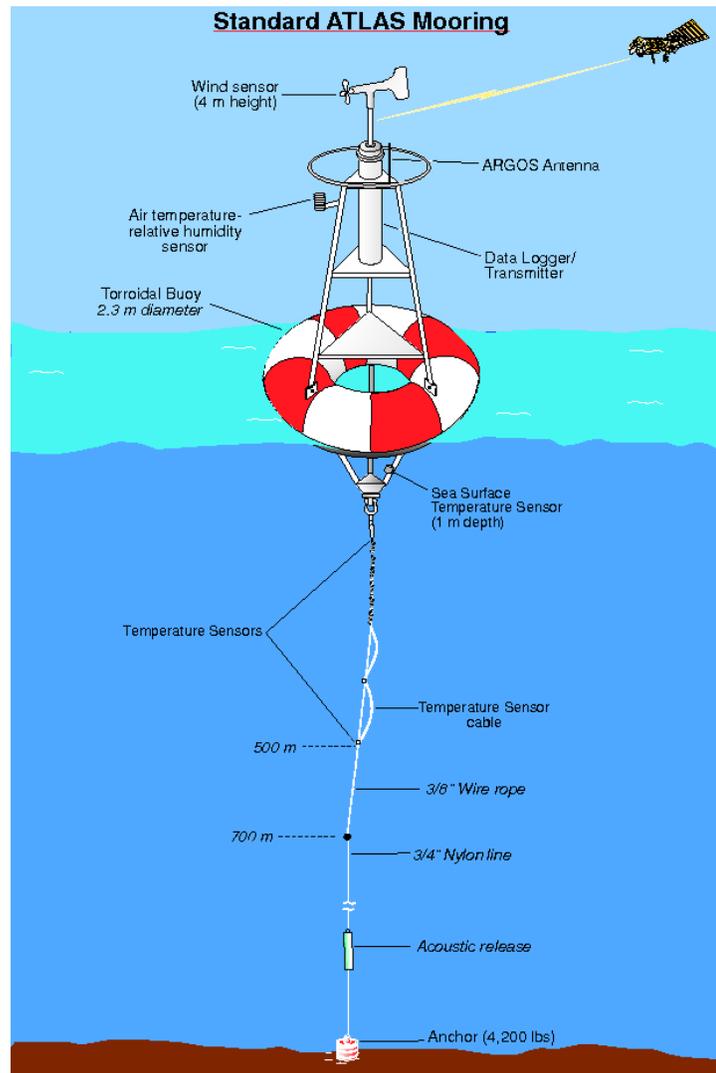


Figura 2.2: Características de una boya.

detectado oportunamente, sino hasta que ya se encontraba en su fase más intensa. La manifestación de un evento de estas proporciones dejó en claro la necesidad de tener información en tiempo real de lo que ocurre en el Océano Pacífico ecuatorial para predecir y mejorar la comprensión de los eventos que acontecen allí. Como resultado de estas necesidades, con el apoyo de NOAA y el programa *Equatorial Pacific Ocean Climate Studies* (EPOCS), el *Pacific Marine Environmental Laboratory* (PMEL) comenzó a desarrollar *Autonomous Temperature Line Acquisition System* (ATLAS), el cual es un sistema de medición, que consiste en un arreglo de boyas con un conjunto de sensores que miden varias variables como el viento sobre la superficie del océano, las temperaturas superficial y subsuperficial del mar, la humedad relativa, la presión superficial, la temperatura del aire; así como otros parámetros meteorológicos superficiales y oceánicos subsuperficiales. El sistema permite la transmisión de datos en tiempo real. El arreglo al principio consistía de muy pocas boyas, las cuales fueron aumentando lentamente gracias al apoyo del proyecto *Tropical Ocean Global Atmosphere* (TOGA), el cual mostró la importancia y efectividad que presenta el conjunto de boyas para el monitoreo del Océano Pacífico ecuatorial. Esto permitió su difusión a toda la comunidad interesada en el estudio climático, lo que ayudo a mejorar y aumentar la cantidad de boyas en el arreglo.

Los datos oceánicos proporcionados por las boyas de TAO/TRITON consisten en un conjunto de puntos distribuidos de forma no uniforme localizados en un espacio tridimensional, donde cada punto contiene un valor escalar que corresponde a la temperatura subsuperficial medida en esa posición. Lo que se obtiene es un campo escalar tridimensional formado por la información de temperatura subsuperficial del océano. Estos datos son adquiridos diariamente, permitiendo realizar un muestreo tanto espacial como temporal.

2.1.2. Construcción de la representación visual

A partir de los datos se quiere obtener una superficie que corresponda a un determinado valor de temperatura, a estas superficies se les conoce como isosuperficies, debido a que corresponden a un mismo valor dentro del campo escalar determinado por los datos. La finalidad de extraer estas isosuperficies, reside en mostrar el cambio que presenta la temperatura de las diferentes capas oceánicas y su variación durante las diferentes condiciones del océano. Además de la extracción de isosuperficies se obtendrán cortes longitudinales y latitudinales de los datos, para mostrar lo que ocurre con los cambios de temperatura para todas las capas oceánicas contenidas en un corte dado, teniendo así una noción del comportamiento de los datos observados como si conformaran un volumen, se pretende que esto proporcione un mejor apoyo visual para entender los cambios, sin la necesidad de utilizar técnicas de render de datos volumétricos (*Volumen Rendering*), ya que estas técnicas presentan una gran carga para que el sistema pueda ser interactivo.

Para el desarrollo del proyecto se revisaron algunos artículos al respecto y se implementaron principalmente dos aproximaciones para generar las isosuperficies: la primera se realizó extrayendo de forma pseudo-directa las isosuperficies; es decir, a partir de los datos

y un cierto valor de temperatura, se utiliza una interpolación simple en cada boya para localizar los vértices correspondientes a la isosuperficie. La otra forma se realizó utilizando el algoritmo de *Marching Cubes*.

De los principales problemas que se presentaron al intentar extraer las isosuperficies, esta la distribución de los datos ya que se encuentran repartidos en un arreglo no uniforme y la cantidad de información es relativamente poca. Esto presenta varios problemas debido a que la mayoría de los algoritmos que existen para la extracción de isosuperficies trabajan sobre datos distribuidos en una rejilla regular, lo que hace necesario el uso de algoritmos de interpolación para generar más datos y poder extraer las isosuperficies a partir de ellos.

2.1.2.1. *Marching Cubes*

El algoritmo de *Marching Cubes* fue diseñado por William E. Lorensen y Harvey E. Cline [12], para generar un conjunto de triángulos que definen una malla poligonal correspondiente a una isosuperficie, la cual es obtenida a partir de un campo escalar tridimensional y un isovalor dado.

El algoritmo consiste en recorrer el campo escalar, tomando 8 vértices vecinos conformando un cubo. Se verifica si el cubo contiene un pedazo de la malla, comprobando si la isosuperficie atraviesa el cubo, para revisar esto se examina si los valores de los vértices del cubo presentan al menos un valor menor y al menos un valor mayor al isovalor, si es así, entonces se determinan las aristas del cubo con las que intersecta la isosuperficie y se generan los triángulos necesarios a partir de las intersecciones, para así formar un trozo de la malla final; esto se repite para todos los cubos que conforman el campo y así obtener todas las partes de la isosuperficie, que al final se unen para completar la malla (figura 2.3).

Para determinar como se construyen los triángulos que conforman un fragmento de la malla, se deben localizar las intersecciones que hay entre la isosuperficie y las aristas del cubo, esto consiste en buscar las aristas que tienen un vértice con valor menor y el otro con valor mayor al isovalor, lo que determina que por esa arista pasa la isosuperficie. Las intersecciones que se encuentran, representan los vértices que conforman los triángulos del fragmento de malla en ese cubo. La forma en la que se pueden construir estos fragmentos a partir de las intersecciones presenta varias posibilidades, clasificando cada esquina del cubo como menor o mayor al isovalor, se tienen 256 ($2^8 = 256$) posibles configuraciones para determinar la forma en la que se construyen los triángulos, si se consideran rotaciones y simetrías el número de posibles configuraciones se reduce a 15 casos (figura 2.4), los cuales son los que se utilizan principalmente en la implementación del algoritmo para la construcción de los fragmentos.

Uno de los requisitos necesarios para utilizar este algoritmo, es que los datos se encuentren localizados en una rejilla regular tridimensional, para poder utilizarlo con los datos de temperatura subsuperficial del océano, es necesario realizar una interpolación para generar

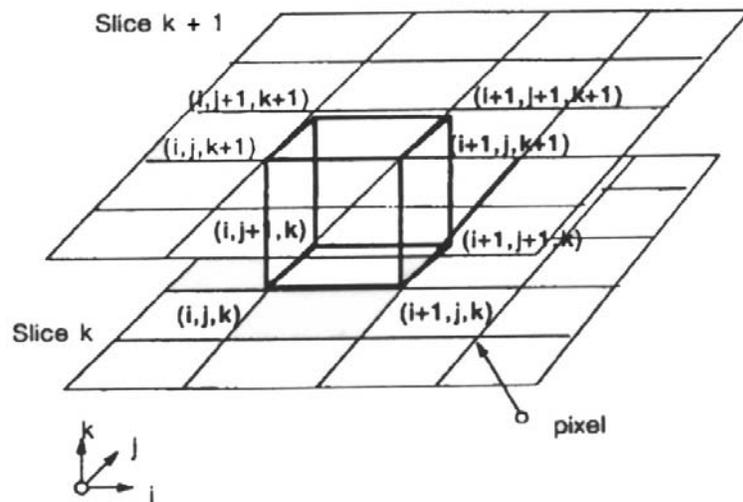


Figura 2.3: Configuración de un cubo del algoritmo *Marching Cubes*.

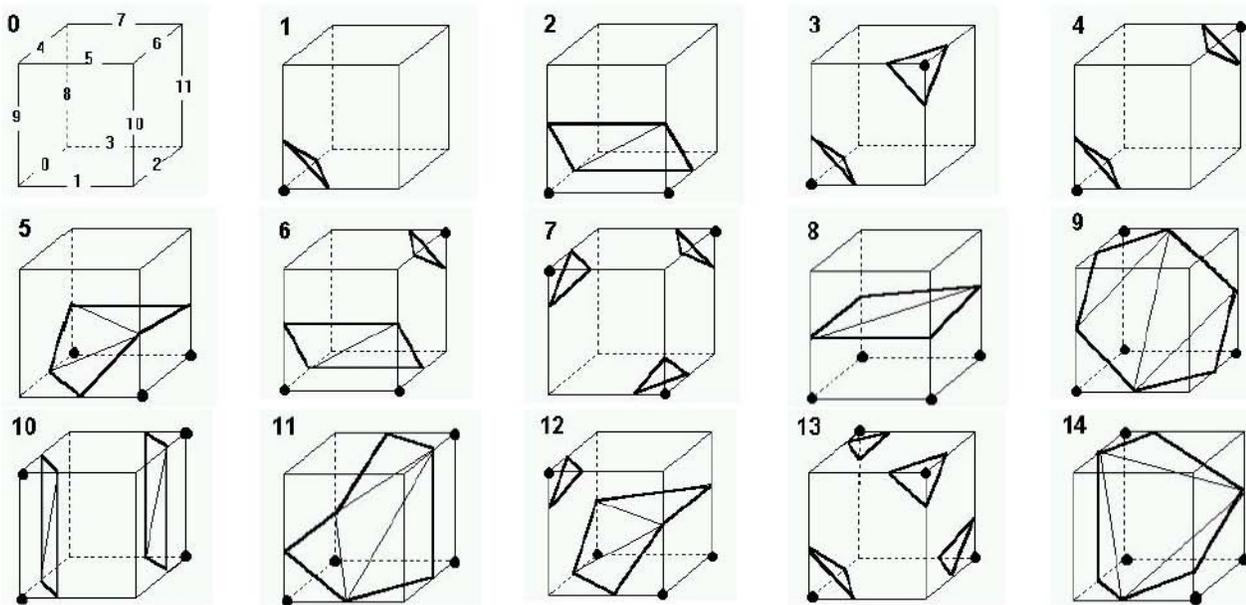


Figura 2.4: Configuraciones bajo simetrías y rotaciones del algoritmo *Marching Cubes*. Los puntos negros indican donde hay datos.

dicha rejilla; además, este algoritmo es dependiente de la resolución de la rejilla, es decir, la calidad de la malla obtenida depende de la cantidad de datos con los que se cuenta, por lo que es necesario determinar una resolución adecuada para interpolar los datos. Uno de los problemas que presenta el algoritmo, es que en el momento de determinar la posición de los triángulos pueden ocurrir ambigüedades con las configuraciones, lo que ocasiona agujeros en

la malla final; esto ocurre cuando dos cubos adyacentes comparten una cara, pero la conexión de los cuatro vértices se realiza de tal forma que en un cubo los vértices quedan separados y en el otro cubo quedan unidos, generando un agujero en la malla final. En [13] y [14] se presentan algunas mejoras al algoritmo básico de *Marching Cubes* para obtener isosuperficies con una topología correcta. Aún con los problemas que presenta este algoritmo, en la práctica genera buenos resultados y caracteriza el comportamiento del océano como se espera.

Interpolación

La interpolación es un método que sirve para generar información a partir de un conjunto de datos conocidos, mediante la construcción de una función que se aproxime lo mejor posible a ellos, a esta función se le conoce como interpolante. Matemáticamente hablando, dado un conjunto de puntos $x_i \in X$ y sus correspondiente valores $y_i \in Y$, una interpolación construye una función interpolante f tal que $f(x_i) = y_i$.

El tipo de interpolación a utilizar se encuentra completamente relacionado con la naturaleza de los datos con los que se esté trabajando. Debido a la dimensión y distribución de los datos de temperatura subsuperficial, es necesario el uso de métodos conocidos como *interpolación multivariable de datos dispersos*, para poder obtener nuevos datos.

A continuación se presentan las técnicas que se probaron para realizar la interpolación de los datos de temperatura subsuperficial y permitir el uso del algoritmo de *Marching Cubes*. Se revisaron algunos otros métodos, además de los que se muestran, como la interpolación utilizando funciones de base radial, por baricentro y Kriggin; pero no se profundizó más en ellos debido a que el método de interpolación por vecinos naturales proporcionó buenos resultados para poder trabajar con los datos.

Interpolación bajo la condición de Lipschitz

Se dice que una función es Lipschitz continua o que cumple con la condición de Lipschitz, si la tasa de cambio de la función está acotada por $|f(x) - f(y)| < M \cdot d(x, y)$ donde M representa la constante de Lipschitz de la función y d representa una función de distancia. Esta condición se interpreta como la mayor divergencia que la función puede adquirir y la constante de Lipschitz permite acotar el comportamiento general de la función.

LibLip es una biblioteca que se utiliza para realizar interpolación multivariable de datos dispersos, la cual implementa el método desarrollado por Gleb Beliakov, que consiste en construir funciones Lipschitz que acotan por arriba y por abajo a la función a interpolar, asumiendo que cumple con la característica de ser Lipschitz continua. De esta manera es posible encontrar una función interpolante que aproxime a la función desconocida f , lo mejor

posible en el peor de los casos que pueda ocurrir.

En teoría este método de interpolación debió proporcionar buenos resultados con los datos, porque los cambios que presenta la temperatura subsuperficial cumplen con la condición de Lipschitz, ya que no presentan cambios bruscos y se encuentran acotados. En la práctica, con este método lo obtenido muestra de forma imprecisa la estructura de la temperatura en el océano, debido a que la representación de los datos exhibe una agrupación en forma de celdas que no se encuentra presente en los datos y no refleja correctamente el comportamiento de la temperatura subsuperficial del océano, ya que la transición entre las temperatura debe estar distribuida de una forma mas suave y uniforme. En la figura 2.5 se muestra un corte sobre el ecuador de los datos interpolados con LibLip.

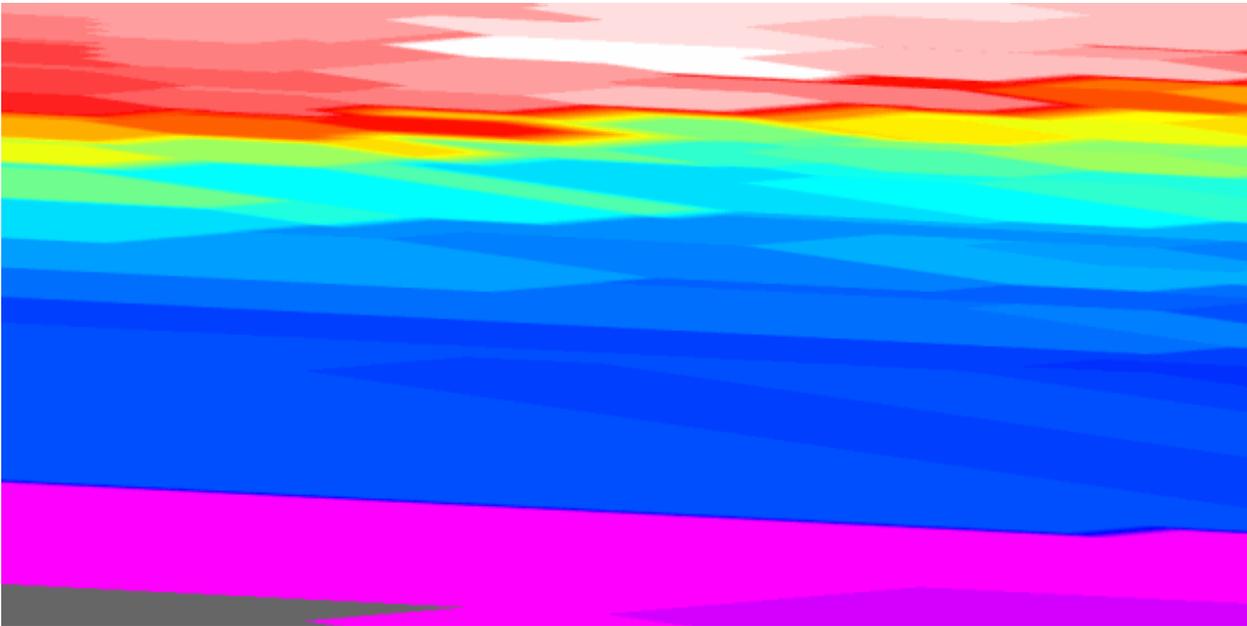


Figura 2.5: Corte sobre el ecuador de datos interpolados con LibLip, donde se muestran las formaciones en forma de celda.

Para obtener un mejor resultado con la interpolación, se aumento y disminuyo el valor de la constante de Lipschitz que acota a los datos, pero la distribución en forma de celdas sólo cambia de tamaño y no se acerca a las condiciones reales de la temperatura del océano. Al no encontrar la forma de obtener mejores resultados con este método, ya que no se encontró la razón por la cual se generan las estructuras con forma de celdas, se optó por explorar otros métodos para la interpolación de los datos.

Método de interpolación de Shepard

La interpolación trivariable de Shepard, es un método que a partir de un conjunto de datos $x \in \mathbb{R}^3$ y sus correspondientes valores $y \in \mathbb{R}$, define:

$$F(x) = \frac{\sum_{k=1}^n W_k(x) \cdot Q_k(x)}{\sum_{i=1}^n W_i(x)}$$

donde la función Q_k representa aproximaciones locales para y , además es una función trivariable que satisface que $Q_k(x) = y$ y se ajusta a un conjunto de valores cercanos a x localizados en un radio determinado por la función de mínimos cuadrados pesados con respecto a x . W_k denota los pesos relativos a x , que se calculan mediante la función de distancia inversa con respecto a x , estos representan la influencia de algún punto cercano a x en el cálculo del valor a interpolar.

La idea básica de este método de interpolación, consiste en la localización de los vecinos cercanos a partir de un radio que determina el intervalo de influencia y los puntos localizados dentro del intervalo son los únicos puntos que se consideran para el cálculo del interpolante.

Matpack es una biblioteca que cuenta con la implementación de algoritmos numéricos y visualización de datos en C++, en particular proporciona la implementación del método de interpolación trivariable de Shepard a través de la clase *MpShepard3d*.

Las características de este método, hicieron pensar que generaría buenos resultados con los datos de temperatura subsuperficial, pero al probarlo se presentó un problema en la implementación de esta biblioteca, ya que los datos están restringidos a no presentar puntos ubicados colinealmente, esta restricción no permite su uso para los datos de temperatura subsuperficial, ya que éstos presentan colinealidad. Durante un tiempo se intentó cambiar esta condición modificando el código fuente de la biblioteca, pero no fue posible realizarlo con éxito y para evitar gastar tiempo, se decidió por explorar otro método de interpolación.

Interpolación por vecinos naturales

La interpolación por vecinos naturales es un método que utiliza un promedio pesado de los datos, a partir de los puntos cercanos o vecinos para calcular el interpolante. Este método es parecido al método de interpolación de Shepard, ya que se basa en la información local que proporcionan los puntos cercanos; pero difieren, ya que el método de Shepard se basa en distancias, calculando los pesos con una función de distancia inversa, mientras que el método

por vecinos naturales se basa en volúmenes, utilizando teselaciones de Voronoi y tetraedrizaciones de Delaunay para el cálculo de los pesos.

Una teselación de Voronoi es una construcción geométrica ampliamente utilizada en geometría computacional. Dado un conjunto $P = \{p_1, p_2, \dots, p_N\} \in \mathbb{R}^3$, la celda de Voronoi para $p_n \in P$ se define como,

$$C_n = \{p \in \mathbb{R}^3 : d(p, p_n) < d(p, p_m) \forall m \neq n\},$$

donde d representa la distancia euclidiana; una celda de Voronoi C_n puede ser vista como la zona de todos los puntos que son mas cercanos a p_n que a cualquier otro punto en P . La unión de todas las celdas de Voronoi de P forma lo que se conoce como la teselación de Voronoi.

Una forma de obtener la tetraedrización de Delaunay, es partiendo de la teselación de Voronoi, conectando con aristas las celdas de Voronoi que tienen fronteras vecinas. La teselación de Voronoi y la tetraedrización de Delaunay son estructuras duales, ambas contienen en esencia la misma información, pero con una representación diferente.

En la figura 2.6 se muestra un ejemplo en 2D de una teselación de Voronoi en azul y su correspondiente triangulación de Delaunay en rojo. En el caso tridimensional la teselación de Voronoi esta representada por poliedros, mientras que tenemos una tetraedrización de Delaunay.

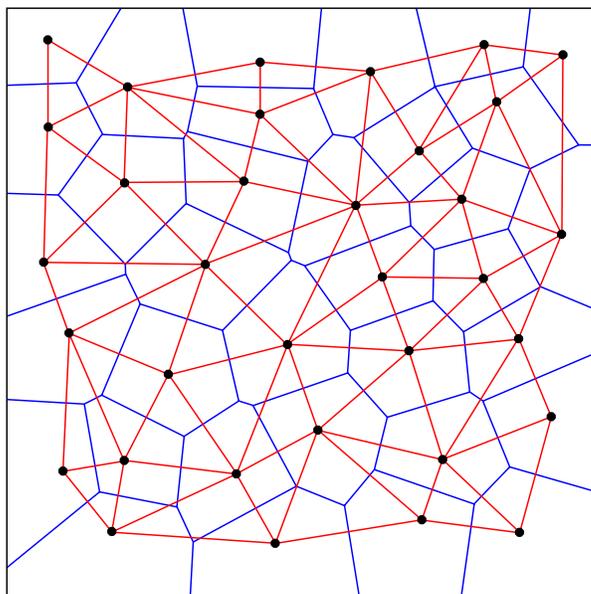


Figura 2.6: Diagrama de Voronoi y Delaunay en 2D.

Los vecinos naturales de un punto $p \in P$ son todos aquellos puntos en P que comparten una arista de la tetraedrización de Delaunay con p ; o en el caso dual, son todos aquellos puntos cuya celda de Voronoi es vecina a la celda de p .

El método de interpolación por vecinos naturales consiste en:

1. Calcular la teselación de Voronoi de los datos.
2. Dado un punto x a interpolar, se localiza la celda de Voronoi que lo contiene y se calcula su volumen correspondiente, denotándolo como $V(x)$.
3. Se agrega el punto x a los datos y se genera la teselación de Voronoi localmente, es decir, solo se recalculan las celdas donde el punto x cause conflictos y se calculan los volúmenes de las nuevas celdas generadas, correspondientes a los vecinos naturales de x , estos se denotan como $V(vn_i)$, donde vn_i se refiere al i ésimo vecino natural de x .
4. Se realizan cocientes entre el volumen de la celda que contenía a x y las nuevas celdas obtenidas al insertar x . El valor que se obtiene al realizar los cocientes de volúmenes corresponde a la influencia que tienen los vecinos para el cálculo del nuevo valor y se determina de la siguiente forma:

$$P(vn_i) = \frac{V(vn_i)}{V(x)}$$

donde $P(vn_i)$ se refiere al peso para el i ésimo vecino natural de x . Los pesos cumplen con la característica de que, $0 \leq P(vn_i) \leq 1$.

5. El valor del punto a interpolar se calcula con:

$$\sum_{i=1}^n P(vn_i) \cdot y_i$$

donde y_i denota el valor correspondiente al i ésimo vecino natural de x .

6. Por último, se remueve x de la teselación y se repite el proceso para todos los puntos que se requieren interpolar.

Una de las ventajas que presenta este método, al igual que el de Shepard, es que considera a los vecinos cercanos para determinar el valor de los puntos a interpolar, lo que permite considerar el comportamiento global de los datos a partir de una aproximación local.

Este método de interpolación se encuentra implementado en Matlab y en la práctica genera buenos resultados, ya que logra mantener el comportamiento esperado en la temperatura subsuperficial del océano, es decir, que la transición entre las temperaturas se distribuye de una forma suave y uniforme. En la figura 2.7 se muestra un corte sobre el ecuador de los datos interpolados con el método de interpolación de vecinos naturales.

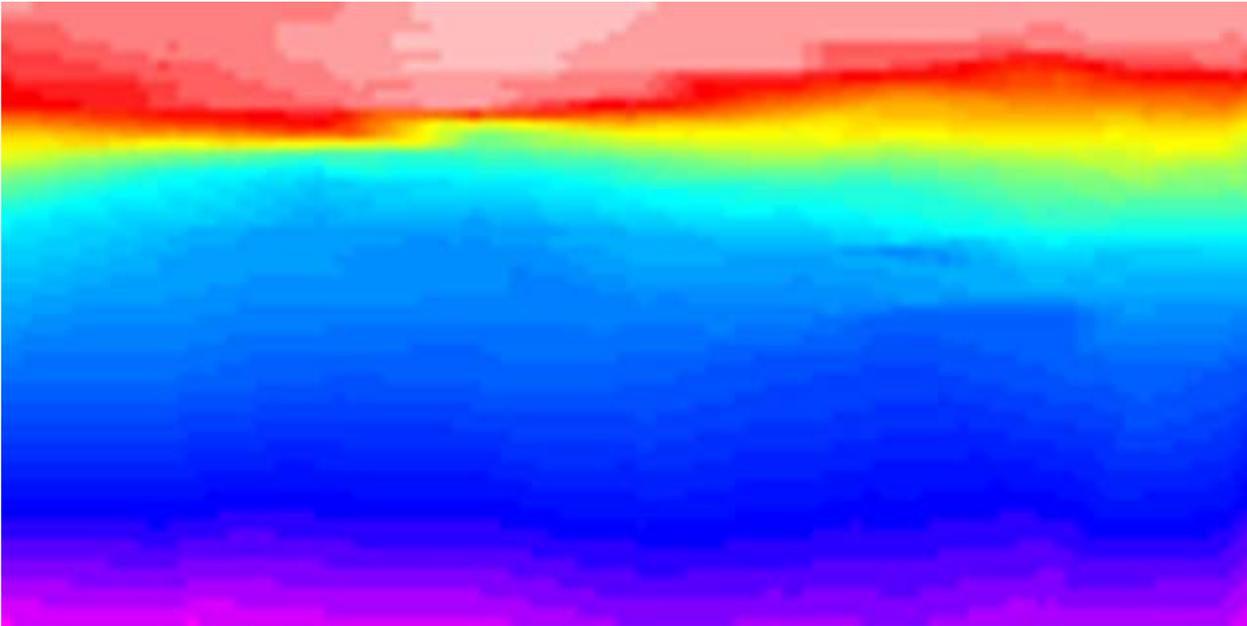


Figura 2.7: Corte sobre el ecuador de datos interpolados por vecinos naturales.

2.1.2.2. Extracción pseudo-directa de isosuperficies

Uno de los métodos utilizados para obtener las isosuperficies es utilizando una extracción pseudo-directa a partir de los datos. La finalidad principal de este método es la de evitar la interpolación total de los datos.

El método consiste en lo siguiente:

1. Se toma la información que mide una boya a lo largo de su profundidad.
2. Se realiza una interpolación lineal en los datos de la boya, para localizar la posición del isovalor correspondiente a la isosuperficie que se requiere extraer.
3. Se repiten los pasos 1 y 2, para todas las boyas.
4. Una vez localizadas la posiciones del isovalor en cada boya, se triangulan para generar la malla correspondiente a la isosuperficie requerida.

La ventaja que presenta este método es que, al realizar una interpolación local de los datos, la extracción de isosuperficies es mas rápida. Pero en cambio presenta algunos inconvenientes, ya que, aunque es posible generar la isosuperficie, al contar con un número pequeño de boyas la resolución de la isosuperficie obtenida es pobre y poco suave, por lo que es necesario el uso de un algoritmo de subdivisión de mallas para mejorar su aspecto; el algoritmo que se utilizó para corregir esta situación es el de subdivisión de *Butterfly* [15], ya que permite realizar la subdivisión de la malla sin alterar la posición original de los vértices

y aumentando su resolución y suavidad, pero aún utilizando el algoritmo de subdivisión, varias de las características globales de los datos se pierden; el principal problema de este método consiste en la forma de localizar los vértices de la isosuperficie, ya que al realizar la interpolación de manera individual por boya, hace que se ignore el comportamiento global y la distribución que presentan los datos. Por desgracia cualquier tipo de interpolación que se realice de manera individual para cada boya genera el mismo problema y produce isosuperficies que no representan correctamente la información contenida en los datos.

2.2. Temperatura superficial del océano

Los datos de temperatura superficial sirven para observar las variaciones de temperatura de las diferentes condiciones del Océano Pacífico ecuatorial en su superficie.

2.2.1. Características y obtención de los datos

Al comienzo del proyecto se utilizaron los datos proporcionados por el arreglo de boyas TAO/TRITON, los cuales proporcionan información en las posiciones donde se encuentran las boyas; esto generó los mismos inconvenientes que en los datos de temperatura subsuperficial, ya que existen alrededor de 72 boyas y por cada una de ellas se obtiene un dato, generando la necesidad de un algoritmo de interpolación para poder trabajar apropiadamente con los datos y obtener así su representación visual. Como consecuencia de la falta de buenos datos, se realizó la búsqueda de una mejor fuente de información.

National Centers for Environmental Prediction (NCEP), forma parte de NOAA y proporciona información adquirida por satélite de diversas variables atmosféricas y superficiales. La cantidad de datos que se obtienen es mucho mayor en comparación con los proporcionados por TAO/TRITON, ya que la adquisición se realiza cada grado, tanto longitudinal como latitudinalmente, lo que brinda alrededor de 3454 datos distribuidos en una rejilla regular de 157 por 22, que corresponde al área de interés en el Océano Pacífico ecuatorial, además los datos son adquiridos semanalmente. La resolución y distribución de los datos, proporciona una mejor calidad para la obtención de la representación visual, además de evitar los inconvenientes que presentan los datos de TAO/TRITON y el uso de algoritmos de interpolación.

2.2.2. Construcción de la representación visual

La representación visual que se quiere obtener de los datos es una imagen que permita identificar y observar de forma clara las anomalías que ocurren en la temperatura superficial del océano, utilizando una tabla de colores, para indicar la intensidad de los cambios.

Las condiciones normales se calculan realizando un promedio de los datos correspondientes a un lapso de 25 ó 30 años. El término *anomalía* se refiere a la diferencia que existe entre las condiciones promedio y las condiciones que se presentan en un momento dado. Las anomalías permiten observar mejor la evolución de los cambios que se generan durante las diferentes condiciones, ya que se muestra qué tanto se alejan los datos de las condiciones promedio, dándonos una pauta de cómo varían los datos.

Para obtener la representación visual, primero es necesario calcular las condiciones promedio y posteriormente se realiza la diferencia de los datos en un tiempo particular con las condiciones normales, dando como resultado la anomalía de temperatura superficial para ese tiempo dado.

A partir de las anomalías obtenidas, para obtener su representación visual, simplemente se debe asociar a cada valor un color de la tabla de colores (figura 2.8), en donde los colores más rojos representan mayor temperatura (alrededor de 30°C) mientras que los colores más azules representan menor temperatura (alrededor de 8°C).



Figura 2.8: Tabla de colores, donde los colores mas rojos representan una mayor temperatura y los colores mas azules una menor.

En la figura 2.9 se muestran las condiciones normales de los datos de temperatura superficial del océano, en la figura 2.10 se muestran los datos del 5 de enero de 1997 y en la figura 2.11 se muestran sus anomalías.

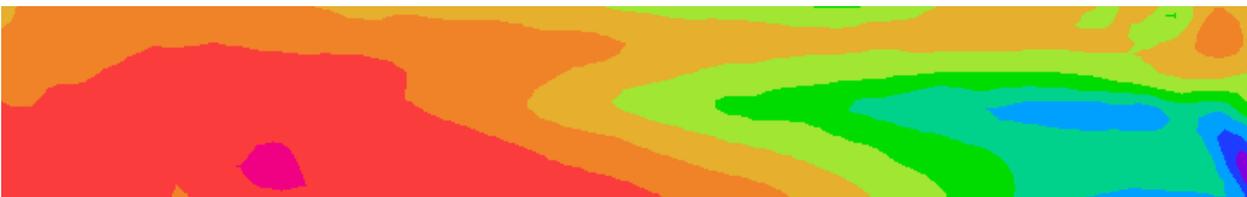


Figura 2.9: Climatología para enero de la temperatura superficial del océano.

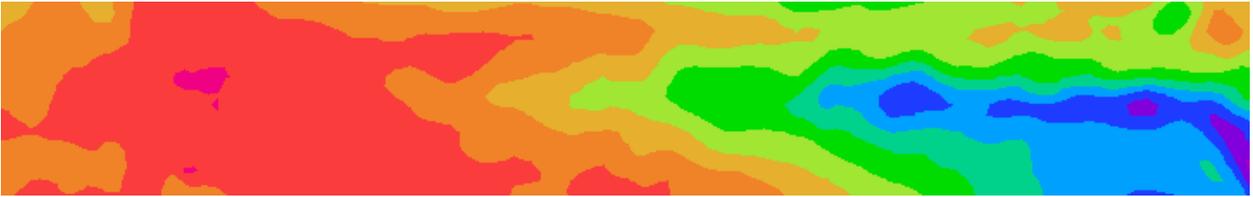


Figura 2.10: Datos de temperatura superficial del 5 de enero de 1997.

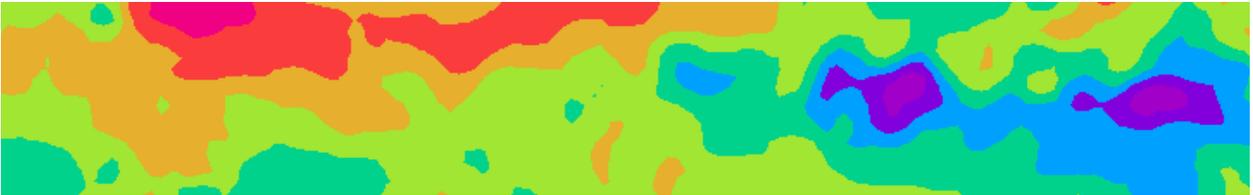


Figura 2.11: Anomalías de temperatura superficial correspondientes a la figura 2.10.

2.3. Presión atmosférica en el océano

Los datos de presión atmosférica permiten observar los cambios que se presentan durante la Oscilación del Sur, en las diferentes condiciones que presenta el Océano Pacífico ecuatorial.

2.3.1. Características y obtención de los datos

Los datos son obtenidos de NCEP, al igual que los datos de temperatura superficial, son adquiridos por medio de satélite y presentan la misma resolución y las mismas ventajas, estos datos son adquiridos mensualmente.

2.3.2. Construcción de la representación visual

La representación visual que se quiere obtener de los datos es una imagen que permita observar e identificar claramente las anomalías que ocurren en la presión atmosférica sobre el Océano Pacífico ecuatorial, utilizando una tabla de colores para indicar la intensidad de los cambios, además se quiere obtener una superficie para reforzar la percepción de la magnitud de la presión por medio de su elevación.

Al igual que con los datos de temperatura superficial, es necesario calcular las condiciones normales y una vez obtenidas, calcular las anomalías. A partir de las anomalías se genera la imagen con la tabla de colores como se realizó con la temperatura superficial y ésta servirá como textura para la superficie. Para generar la superficie correspondiente a la presión, se utiliza la longitud y la latitud de los datos, la altura corresponderá al valor de la anomalía en cada punto, con lo que se obtiene un arreglo de puntos en tres dimensiones, los cuales

corresponden a los vértices de la superficie y para obtener las caras sólo es necesario generar una triangulación.

En la figura 2.12 se muestran las condiciones normales de los datos de presión atmosférica en el océano, en la figura 2.13 se muestran los datos para el mes de enero de 1997 y en la figura 2.14 se muestran sus anomalías.

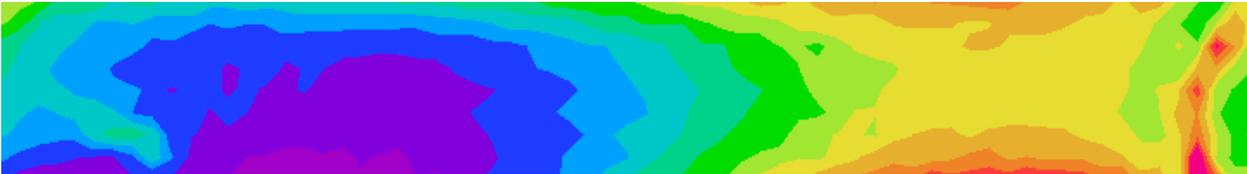


Figura 2.12: Climatología para el mes de enero de la presión atmosférica en el océano.



Figura 2.13: Datos de presión atmosférica del mes de enero de 1997.



Figura 2.14: Anomalías de presión atmosférica correspondientes a la figura 2.13.

2.4. Vientos alisios

Una de las variables que caracterizan las diferentes condiciones que presenta el Océano Pacífico ecuatorial son los vientos alisios. Estos datos permiten ver los momentos en que se suscita un cambio de condiciones, ya que es una variable bastante sensible.

2.4.1. Características y obtención de los datos

Los datos forman un campo vectorial y se tienen las componentes de velocidad U y V del viento. Al igual que los datos de temperatura superficial y de presión atmosférica son

obtenidos de NCEP, presentan la misma resolución espacial que los anteriores y tienen una frecuencia diaria.

2.4.2. Construcción de la representación visual

La representación visual que se requiere obtener de los datos es una imagen que muestre la dirección e intensidad con la que se mueven los vientos. Una aproximación para obtener la representación visual es utilizando *Line Integral Convolution* (LIC) o convolución de integral de línea.

2.4.2.1. *Line Integral Convolution*

LIC es una técnica basada en texturas para la visualización de campos vectoriales, que presenta la ventaja de mostrar los detalles del campo vectorial, siempre y cuando la resolución del mismo sea buena.

La convolución de integral de línea consiste en difuminar una imagen base en función del campo vectorial a mostrar. La imagen base puede ser cualquier tipo de imagen, pero para lograr resultados más claros en la representación del campo vectorial, se utiliza una imagen sin correlación espacial o ruidosa (figura 2.15). El resultado de aplicar LIC a la imagen base, causa que los colores se difuminen siguiendo el flujo que presenta el campo vectorial, permitiendo visualizar el campo con una mayor claridad, ya que la resolución de las líneas de flujo del campo son de un píxel de ancho, maximizando la cantidad de información que se puede mostrar (figura 2.16).

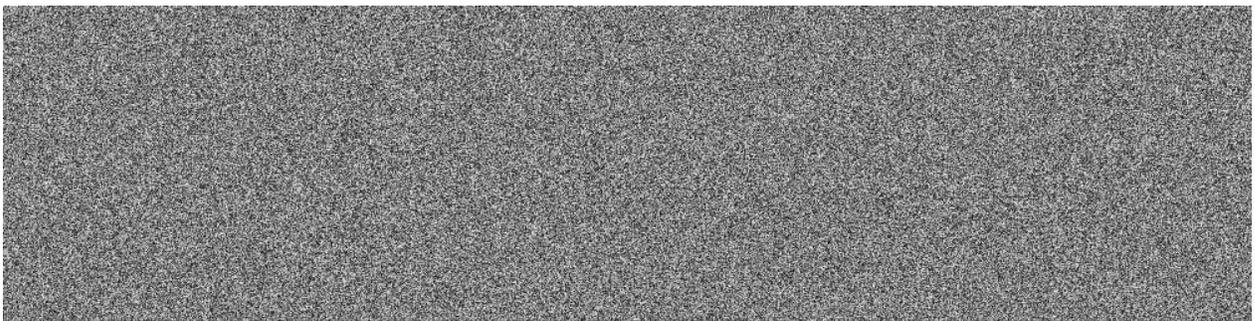


Figura 2.15: Imagen base utilizada para LIC.

Matemáticamente hablando, para cada punto v en el campo vectorial se genera una curva paramétrica $C(v, s)$ que pasa por v y sigue el flujo del campo en ambas direcciones para alguna distancia D dada. Para calcular el valor de un píxel de salida $P(v)$, se calcula la suma de los valores de la imagen base I multiplicados por una función de peso, a lo largo de la

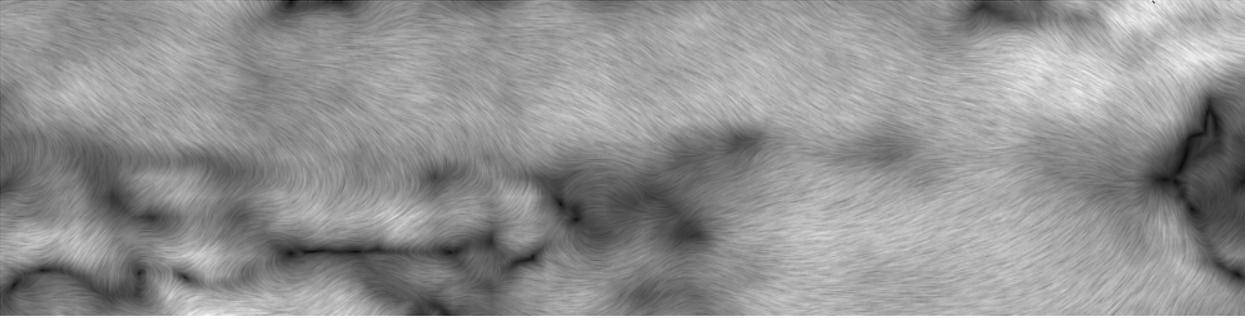


Figura 2.16: LIC de los datos de viento del 1 de enero de 1997.

curva paramétrica calculada. La forma continua de la ecuación es:

$$P(v) = \frac{\int_{-D}^D I(C(v, s)) \cdot w(s) ds}{\int_{-D}^D w(s) ds}$$

donde $w(s)$ es la función de peso.

La forma discreta de la ecuación, utiliza valores de puntos discretos $C_{i, \dots, n}$ a lo largo de la curva $C(v, s)$, y está definida de la siguiente forma:

$$P(v) = \frac{\sum_{i=0}^n I(C_i) \cdot h_i}{\sum_{i=0}^n h_i}$$

donde h_i es la discretización de la función de peso.

La representación visual generada con LIC muestra más características de las que se requieren obtener y lo que dificulta su interpretación, ya que las características que se desean mostrar son sólo la dirección y la magnitud del viento, por esta razón se exploró otra forma de representar los datos de una manera más simple.

2.4.2.2. Representación con dos tablas de colores

En vista de que la representación obtenida con LIC proporciona más información de la necesaria, se optó por utilizar una representación parecida a las anteriores en donde a cada valor se le asigna un color, utilizando dos tablas de colores para su representación, una para

representar la intensidad de los vientos que soplan de este a oeste (figura 2.17) conformada por colores azules de diferentes intensidades y otro para los vientos que soplan de oeste a este (figura 2.18) conformada por colores rojos. La intensidad de los colores corresponde a la intensidad del viento, es decir, entre más brillante sea el color, mayor intensidad tiene el viento, mientras que si es más claro el color, el viento tiene una menor intensidad (figura 2.19).



Figura 2.17: Tabla de colores para los vientos que soplan de este a oeste.



Figura 2.18: Tabla de colores para los vientos que soplan de oeste a este.

En la figura 2.19 se muestran los vientos alisios para el 1 de enero de 1997.

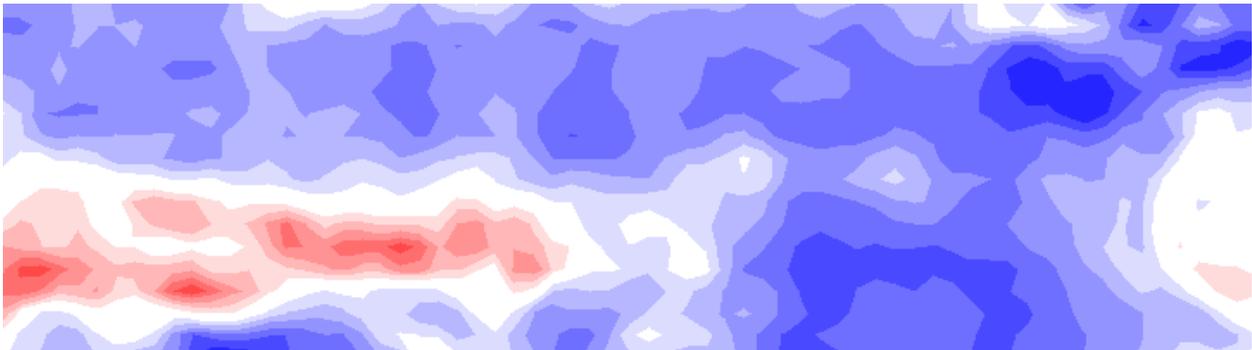


Figura 2.19: Datos de viento del 1 de enero de 1997.

Capítulo 3

Composición final del sistema

El sistema debe cumplir con las siguientes características:

1. Ser una visualización interactiva tridimensional, que muestre las representaciones visuales de las principales características de las diferentes condiciones del Océano Pacífico ecuatorial.
2. Definir un método para representar escenas, es decir, determinar cuales elementos visuales se encuentran visibles y en que fecha están los datos.
3. Proporcionar un mecanismo para realizar cambios y transiciones entre las diferentes escenas, para observar la evolución de las características con respecto al tiempo.

3.1. La biblioteca gráfica

La parte gráfica de este trabajo es desarrollada principalmente con el lenguaje de programación C++ y la biblioteca gráfica *Open Inventor*.

Open Inventor fue desarrollado por *Silicon Graphics* alrededor de 1988-1989, debido al escaso desarrollo de aplicaciones gráficas, ya que a pesar de contar con OpenGL, escribir aplicaciones con características visuales complejas y atractivas era una tarea difícil que requiere de una gran cantidad de código para su desarrollo. Open Inventor se creó con la idea de cambiar esta situación y permitir la creación de aplicaciones gráficas con características visuales complejas y atractivas de una forma más sencilla y con una menor cantidad de líneas de código. Open Inventor es una biblioteca escrita en C++ construida sobre OpenGL, que brinda una interfaz de alto nivel para su uso (figura 3.1), concentrándose en la creación y representación de objetos 3D, brindando un enfoque diferente al que presenta OpenGL, ya que éste se basa más en la creación del render final de la escena.

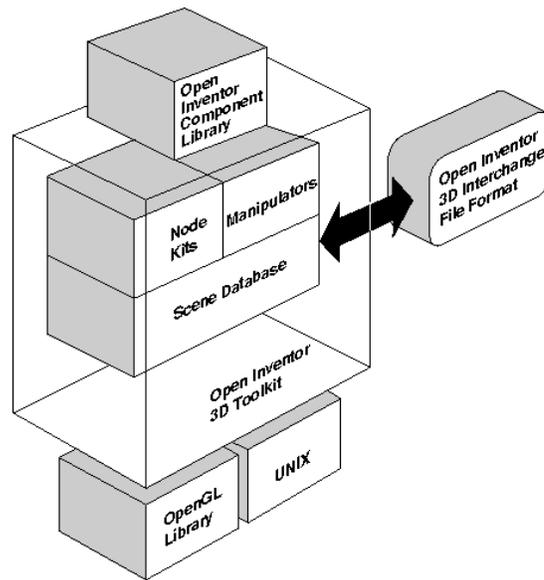


Figura 3.1: Arquitectura de Open Inventor.

Open Inventor proporciona un conjunto de bloques básicos, como son primitivas geométricas, manipuladores, sensores, entre otros; a partir de los cuales es posible construir escenas. Permite utilizar las ventajas que brinda el hardware gráfico con un menor esfuerzo y manteniendo la eficiencia durante el render, gracias a que está construido sobre OpenGL. Además ofrece la versatilidad y eficiencia de un sistema desarrollado bajo el paradigma de la orientación a objetos, facilitando la abstracción y conceptualización de las escenas, así como la extensión de sus características. Brinda un método para el intercambio de información entre diferentes aplicaciones, con la definición de su propio formato de archivo 3D, con el cual es posible copiar y pegar objetos, incluso escenas completas y reutilizarlas en otras aplicaciones. Open Inventor al igual que OpenGL, está diseñado para ser independiente del manejador de ventanas que se utilice, lo que permite portabilidad entre diferentes plataformas. Además introduce un mecanismo para la organización de los componentes de las escenas, mediante el uso de un *scenegraph* o gráfica de escena, con la cual se puede guardar, organizar y aplicar operaciones a la información contenida, brindando una forma más estructurada de organizar y utilizar los elementos de la escena.

Las características que presenta Open Inventor no son del todo exclusivas, ya que bibliotecas como OpenSceneGraph y OpenSG también son bibliotecas de alto nivel que permiten el acceso a las operaciones de bajo nivel a través de llamadas a OpenGL, incluyen la lectura y escritura de diferentes formatos de archivos y cuentan con un *scenegraph*. Las razones por las que se decidió utilizar Open Inventor son: la experiencia adquirida sobre esta biblioteca en comparación con las otras, tanto OpenSceneGraph como OpenSG son bibliotecas grandes que cuentan con muchas características y componentes de los cuales no todos son útiles para el desarrollo del proyecto y debido a su escasa documentación, vuelven más difícil su apren-

dizaje y uso; en contraste, la documentación de Open Inventor es más extensa y completa, lo que representa un aspecto importante para la mejor comprensión, aprendizaje y uso de la biblioteca. Por último, se decidió utilizar Open Inventor debido a que el proyecto debe funcionar en el observatorio de visualización de la UNAM, el IXTLI, por lo que la biblioteca que se utilice debe estar disponible en este sistema. [16], [17]

Open Inventor es utilizado ampliamente para visualización y simulaciones visuales. Cuenta con varias implementaciones; la versión original desarrollada por *Silicon Graphics*, la cual no se encuentra actualizada y es prácticamente obsoleta actualmente; la implementación desarrollada por *Mercury Computer Systems*, la cual es una versión comercial de Open Inventor que extiende el API original desarrollado por *Silicon Graphics*, brindando varias características extra; por último la implementación de Open Inventor que se utiliza en el proyecto es la implementación libre Coin3D desarrollada por *Systems in Motion's*, la cual brinda una interfaz compatible con la implementación original y la de *Mercury Computer Systems*.

Otra biblioteca que se revisó es SIM Voleon de *Systems in Motion's*, la cual consiste en módulos que extienden las capacidades de Coin3D, brindando la posibilidad de realizar el render de datos volumétricos, utilizando la técnica de *Volume rendering*. Algunos de los inconvenientes del uso de esta biblioteca es que no se encuentra disponible en el IXTLI, además una de las características que debe presentar el proyecto es que sea interactivo, y por desgracia el uso del *Volume rendering* no lo permite, por lo cual no se utilizó para el desarrollo del proyecto.

3.2. Diseño

Para el desarrollo del sistema fue necesario, primero generar los elementos visuales y posteriormente armar el ambiente interactivo a partir de ellos.

El Modelo-Vista-Controlador (MVC) es un patrón de diseño de software que independiza los datos de la aplicación, la interfaz de usuario y la lógica de control, en tres componentes distintos. El modelo es la información particular para la aplicación, es decir, los datos de las representaciones visuales necesarios para que el sistema funcione. La vista es la representación visual que el usuario ve y con la puede interactuar. El controlador es la parte responsable de responder a eventos, ya sean acciones generadas por el usuario así como acciones propias del sistema, además de mantener la consistencia del modelo y notificar los cambios tanto a la vista como al modelo. El sistema cuenta con el siguiente diagrama de componentes, en donde las clases *GeoSceneObject*, *GeoSceneObjectSST*, *GeoSceneObjectSubST*, *GeoSceneObjectSLP* y *GeoSceneObjectWND*, corresponden al modelo, las clases *Controller*, *CommandParser*, *Command*, *SceneParser* y *Scene*, corresponden al controlador y por último la clase *GeoScene*, corresponde a la vista (figura 3.2).

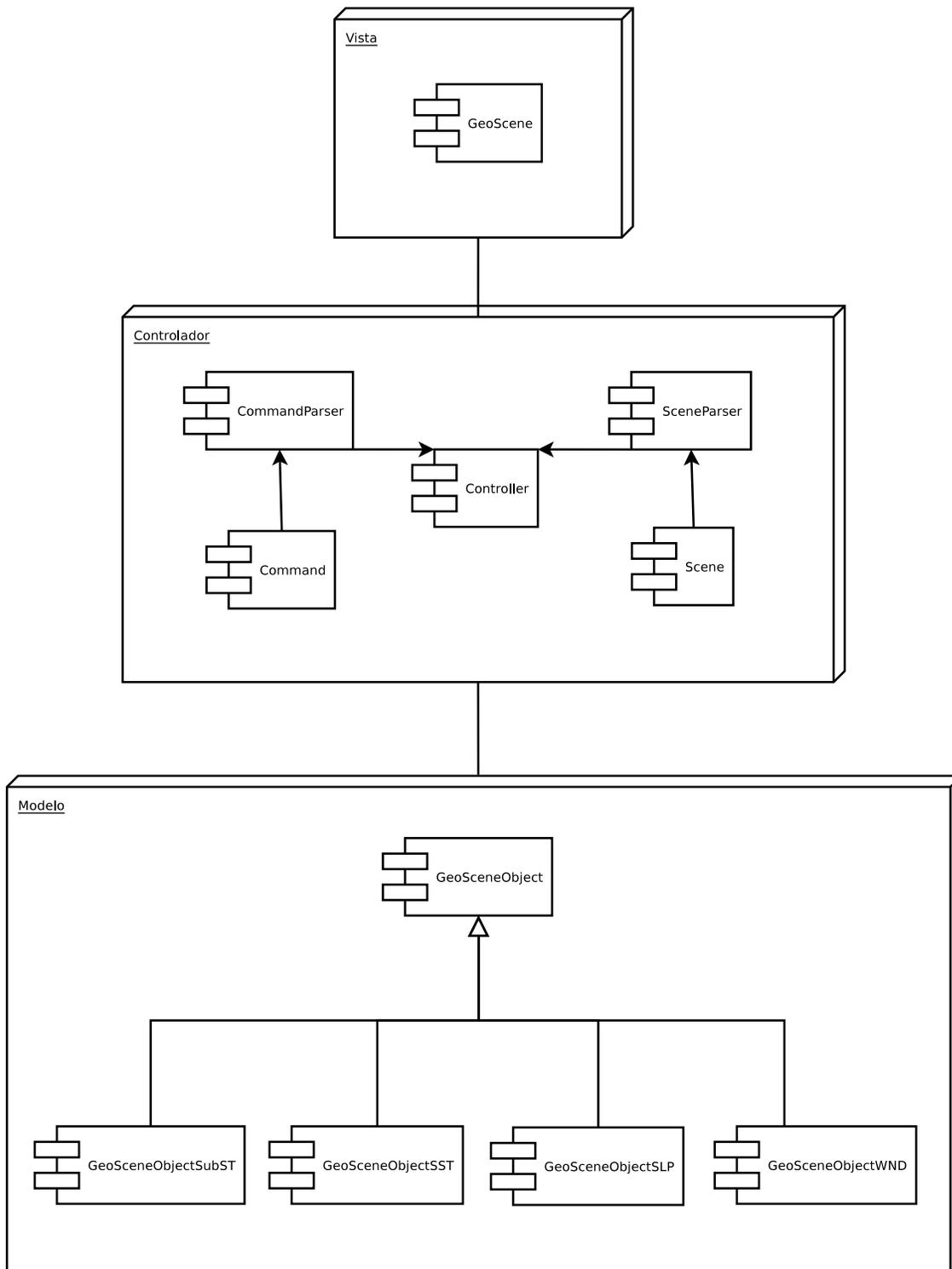


Figura 3.2: Diagrama de componentes del sistema.

El diagrama de componentes anterior es inducido a partir del diagrama de clases del sistema, mostrado en la figura 3.3.

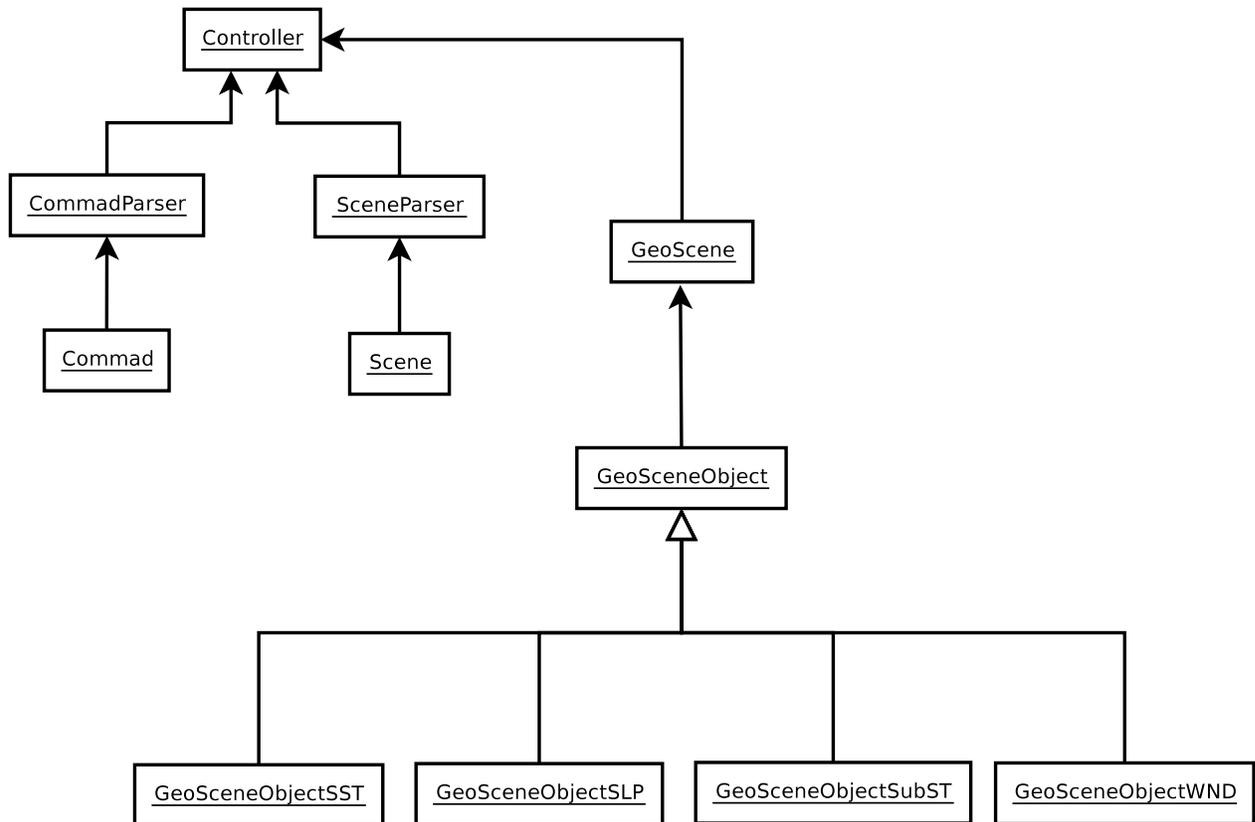


Figura 3.3: Diagrama de clases del sistema.

3.2.1. Responsabilidades del controlador

El controlador tiene la responsabilidad de mantener en un estado consistente tanto a la vista como al modelo, así como el manejo de eventos internos y generados por el usuario. Además debe permitir al sistema el manejo de diferentes escenas y la ejecución de algunos comandos para la modificación de las mismas, sin tener que recompilarlo cada vez que surja un cambio.

La clase *Controller* es la encargada de cumplir con la mayoría de estas funciones ya que contiene referencias tanto al modelo como a la vista, realizando la comunicación pertinente entre ambos, además con ayuda de las clases *CommandParser* y *SceneParser* permite el manejo de diferentes escenas y comandos, sin la necesidad de recompilar la aplicación, utilizando un pequeño lenguaje scripting tanto para la definición de las escenas como para los comandos.

3.2.1.1. Lenguaje scripting

Las clases *CommandParser* y *SceneParser* se encargan de procesar los scripts de comandos y de escenas, respectivamente. Dentro de las responsabilidades que cubren estos parsers están las de leer los scripts, generar tokens y validar su construcción, así como generar una estructura de datos *Command* o *Scene* según sea el caso.

El lenguaje scripting para las escenas esta definido de la siguiente forma:

- Al inicio de la definición de una escena, debe estar presente la palabra clave **SCENE**, para indicar que se va a comenzar a definir la escena.
- A continuación debe aparecer una cadena, que servirá como el identificador de la escena.
- Seguido del identificador de la escena, debe seguir un **{**, para comenzar el bloque de definición de variables presentes en la escena.
- Dentro del bloque de definición de variables, debe aparecer el identificador **time**, seguido de un número que determine la fecha en la que se encuentra la escena, siguiendo el formato de AAAAMMDD.
- Pueden aparecer cualquiera de los siguientes identificadores **SST** (temperatura superficial), **SubST** (temperatura subsuperficial), **SLP** (presión superficial) y **WND** (vientos), dentro del bloque de definición de variables, en donde su aparición indica que la respectiva variable aparecerá en la escena.
- Por último se debe cerrar el bloque de definición de variables con un **}**.
- Una vez cerrado el bloque de definición de variables se pueden seguir definiendo más escenas dentro del mismo archivo.
- El **%** sirve para comentar una línea.

Ejemplo:

```
SCENE primeraFecha{
  time 19970101
  SST
  SubST
  SLP
  WND
}

SCENE ultimaFecha{
  time 20001231
}
```

En el ejemplo se muestran dos escenas, en la primera se esta definiendo una escena que tiene como identificador la palabra `primeraFecha`, la fecha en la que se encuentra es el 1 de enero de 1997 y todas las variables se encuentran activas, en la segunda se está definiendo una escena con el identificador `ultimaFecha`, cuya fecha es el 31 de diciembre del 2000 y no tiene ninguna variable activa.

El lenguaje scripting para los comandos presenta una sintaxis sencilla, ya que se tiene una cantidad reducida de comandos y cada uno cuenta con pocas opciones. Los comandos están definidos de la siguiente manera:

- Para realizar una transición con respecto al tiempo de alguna escena, se utiliza la palabra clave `ANIMATE`, seguida de un identificador de escena, después debe aparecer la fecha final de la transición en el formato `AAAAMDD` y por último un número que indique durante cuantos segundos debe ocurrir la transición.
- Para mostrar la misma escena durante un tiempo determinado, se utiliza la palabra clave `FIXED`, seguida de un identificador de escena y un número que indique el tiempo en segundos.
- Para mostrar alguna de las variables de la escena, se utiliza la palabra clave `SHOW`, seguida del identificador de escena y un identificador de la variable que se desea mostrar, que puede ser: `SST`, `SubST`, `SLP` o `WND`. Si en lugar de mostrar la variable se quiere ocultar, se reemplaza `SHOW` por `HIDE` y se mantiene la misma sintaxis.

Ejemplo:

```
ANIMATE primeraFecha 20000101 600
```

```
FIXED ultimaFecha 30
```

```
SHOW ultimaFecha SST
```

```
HIDE primeraFecha SubSST
```

En el ejemplo se muestran varios comandos, el primero realiza la transición de la escena identificada como `primeraFecha` durante 10 minutos a partir del 1 de enero de 1997, que es la fecha inicial de la escena, hasta el 1 de enero del 2000, que es el argumento del comando; la segunda muestra durante 30 segundos la escena `ultimaFecha`; la tercera muestra la variable de temperatura superficial de la escena `ultimaFecha` y por último se oculta la variable de temperatura subsuperficial de la escena `primeraFecha`.

3.2.2. Responsabilidades de la vista

La vista tiene la responsabilidad de mostrar la información contenida en el modelo, así como capturar los eventos generados por el usuario y comunicárselos al controlador, para que éste realice las acciones adecuadas.

La Clase *GeoScene* es la que se encarga tanto de presentar los elementos visuales en pantalla como de crear, mantener, controlar y mostrar el geoescenario.

3.2.2.1. Geoescenario

El geoescenario, es el ambiente interactivo que contendrá a todos los elementos visuales obtenidos, es decir, las representaciones visuales de la temperatura superficial, la temperatura subsuperficial, la presión y los vientos sobre el Océano Pacífico ecuatorial, además se encuentra georeferenciado, es decir, cada elemento dentro de él tendrá asociadas coordenadas del mundo real y también contendrá un mapa para la ubicación espacial del ambiente.

3.2.2.2. Manejo de la interacción

SoXtExaminerViewer es un componente de Open Inventor que proporciona un área para dibujar los objetos y capturar los eventos generados por el usuario al interactuar con la escena, así como la posibilidad de cambiar la forma en la que se realiza el render de la escena. Este componente brinda una forma sencilla para el manejo de la posición de la vista, por medio de manipuladores que modifican la rotación de la cámara, el tipo de proyección con la que muestra la escena, ya sea ortogonal o en perspectiva, y la posibilidad de realizar el render en estéreo.

La vista tiene como componentes principales al geoescenario, la cámara y las luces de la escena. El geoescenario es un elemento visual que no forma parte del modelo, ya que es un objeto que siempre se encuentra visible y que no puede modificarse, porque no corresponde a ninguna variable a visualizar, ni depende de los datos contenidos en el modelo. Los elementos visuales correspondientes al geoescenario son: un marco de georeferenciación para ubicar geográficamente los elementos del modelo, mapas de referencia de la posición espacial con botones para su activación y desactivación, un objeto que permita la ubicación geográfica de los elementos visuales contenidos en el geoescenario, así como manipuladores para la interacción con algunos de los datos del modelo.

3.2.3. Responsabilidades del modelo

El modelo tiene la responsabilidad de contener los datos correspondientes a las representaciones visuales de las diferentes variables y proporcionárselos a la vista cuando sea necesario

mostrarlos. El modelo está constituido con las gráficas de escena de Open Inventor correspondientes a cada variable, con la información y representación obtenida en el capítulo anterior.

La clase *GeoSceneObject* es la base a partir de la cual se construyen los diferentes objetos para cada variable. Las clases *GeoSceneObjectSST*, *GeoSceneObjectSubST*, *GeoSceneObjectSLP* y *GeoSceneObjectWND* corresponden a la temperatura superficial, la temperatura subsuperficial, la presión atmosférica y el viento, respectivamente; cada una de estas clases extiende a la clase *GeoSceneObject*, proporcionando la gráfica de escena para cada variable así como métodos de acceso y manipulación de su información.

3.2.3.1. Gráficas de escena

Open Inventor define un icono representativo para los diferentes nodos con los que cuenta (figura 3.4), esto con la finalidad de realizar diagramas que muestren el comportamiento y la estructura de las gráficas de escena, facilitado su diseño y representación.

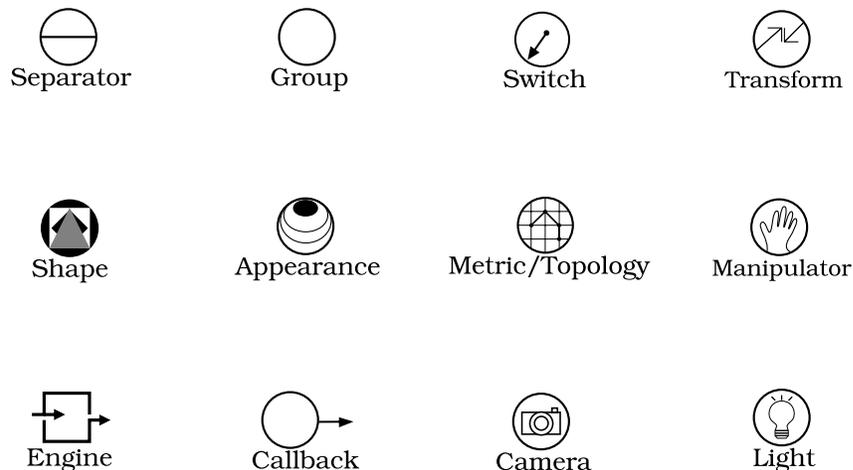


Figura 3.4: Símbolos para la gráfica de escena de Open Inventor.

El nodo *Group* sirve para la agrupación de nodos de manera jerárquica. Un *Separator* proporciona la misma funcionalidad que un *Group*, pero restringe la influencia de las transformaciones y materiales contenidas en él, limitando su alcance a los nodos dentro del *Separator*. Un *Switch* permite agrupar nodos al igual que un *Group*, pero con la diferencia de que sólo uno de sus hijos puede estar activo a la vez; estos tres nodos permiten la agrupación y asociación de objetos dentro de la gráfica de escena.

El nodo *Transform* sirve para indicar diferentes transformaciones que afectan a la escena, como son: translaciones, rotaciones y escalamientos. *Shape* sirve para indicar cualquier objeto geométrico, por ejemplo cubos, cilindros, esferas o polígonos. *Appearance* corresponde a todos

aquellos nodos que modifique la apariencia de un objeto, por ejemplo materiales o texturas.

El nodo *Metric/Topology* representa las coordenadas y normales que puede tener un objeto geométrico, por ejemplo los vértices que definen un plano o las normales asociadas a los vértices de una superficie. *Manipulator* es un nodo que sirve para indicar objetos especiales de Open Inventor que permiten capturar y responder los eventos realizados por el usuario, permitiendo la interacción con los objetos de la escena. El nodo *Engine* corresponde a otro objeto especial de Open Inventor que permite definir el comportamiento de las interacciones que ocurren en la escena, por ejemplo al realizar una translación con un *Manipulator*, el nodo *Engine* puede realizar un cálculo para determinar qué superficie debe mostrarse dado el valor de la transformación.

El nodo *Callback* indica en donde se registran las funciones a ejecutar a partir de un evento determinado, por ejemplo modificar la posición de un objeto después de que ha transcurrido un cierto tiempo. El nodo *Camera* indica la posición en la gráfica de escena donde se encuentra la cámara, este nodo debe aparecer primero que cualquier otro nodo que tenga una representación geométrica ya que de lo contrario no podrá observarse. *Light* representa alguna luz contenida en la escena.

Mediante el uso de estos símbolos se representaran las escenas utilizadas para las diferentes variables.

Todas las gráficas de escena utilizadas, tienen como nodo raíz un *Switch* llamado **root**, el cual tiene dos hijos, un *Separator* llamado **empty** que es un nodo vacío y un *Separator* llamado **visual** que es la raíz de la información visual de la escena y contendrá las representaciones visuales obtenidas. Se tiene estos dos nodos con la finalidad de facilitar las operaciones para mostrar y ocultar las escenas durante el render, ya que cuando es necesario que los elementos visuales sean visibles se selecciona como hijo activo de **root** el nodo **visual**, mientras que, si se requiere ocultar los elementos se seleccionara el nodo **empty**, y aprovechando la cualidad de los nodos *Switch* de sólo tener uno de sus hijos activos a la vez, el cambio entre visible e invisible es rápido y sencillo.

Gráfica de escena de la temperatura subsuperficial

El *Separator visual* tiene dos nodos hijos, el *Separator isosuperficie* y el *Separator cortes*, que contendrán respectivamente las isosuperficies y los cortes de la temperatura subsuperficial del océano.

El *Separator isosuperficie* tiene como hijos: un nodo *Transform* correspondiente a las transformaciones necesarias para la ubicación geográfica de los objetos, un nodo *Switch* que contendrá un material por cada color de la tabla de colores antes definida y por último un

Separator llamado **superficie** que tiene como hijos las coordenadas y las caras que conforman la isosuperficie generada.

El *Separator* **cortes** tiene dos hijos, un *Separator* llamado **rootLon** y un *Separator* llamado **rootLat**, los cuales contienen la información de los cortes longitudinales y latitudinales respectivamente. Los nodos **rootLon** y **rootLat** contienen como hijos las transformaciones necesarias para su georeferenciación, la textura correspondiente al corte, así como las coordenadas y caras que definen el plano donde se mostraran los cortes.

La gráfica de escena de la temperatura subsuperficial se muestra en la figura 3.5.

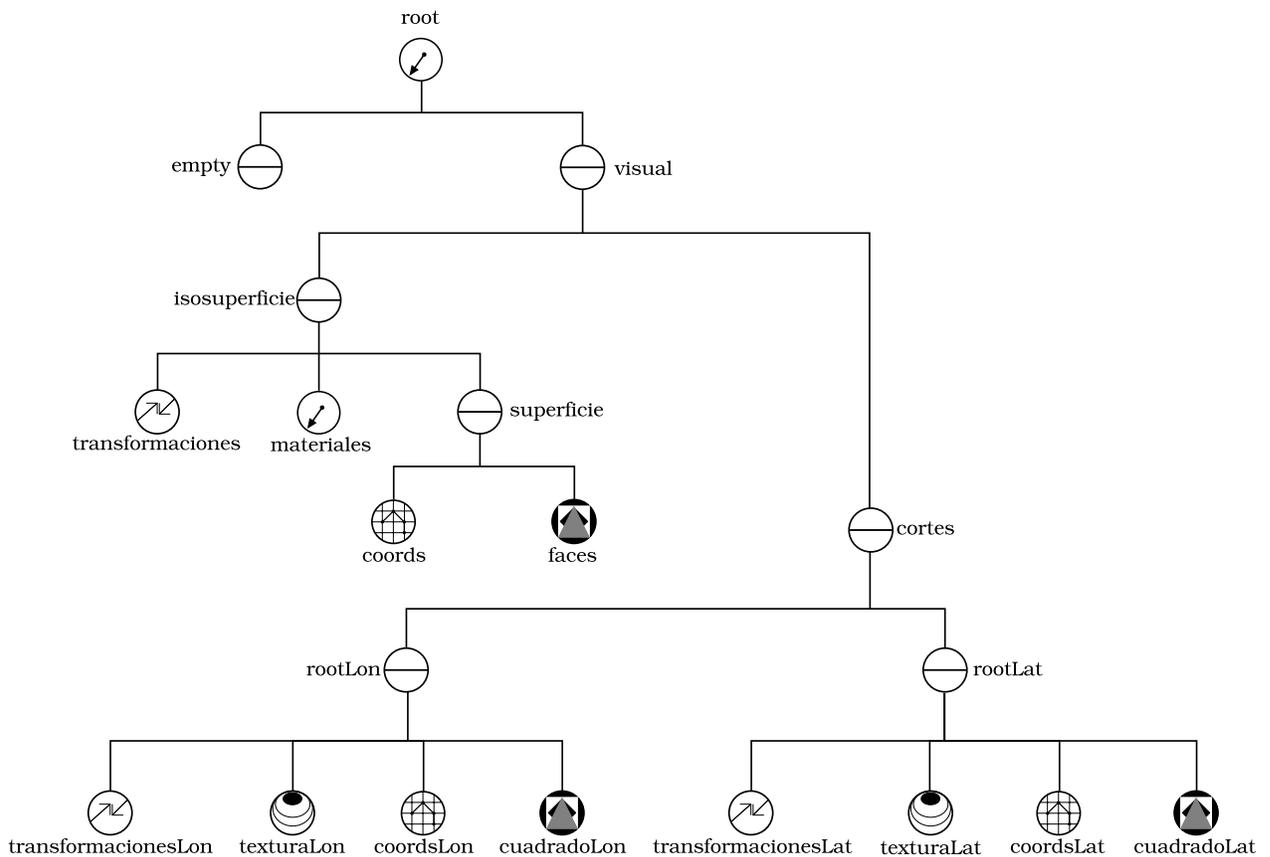


Figura 3.5: Gráfica de escena de GeoSceneObjectSubST.

Gráfica de escena de la temperatura superficial

El *Separator visual* presenta como hijos: un nodo *Transform* para la georeferenciación del objeto, una textura correspondiente a la representación visual de la temperatura superficial, así como las coordenadas y caras que determinan el cuadrado donde se mostrará la textura.

La gráfica de escena de la temperatura superficial se muestra en la figura 3.6.

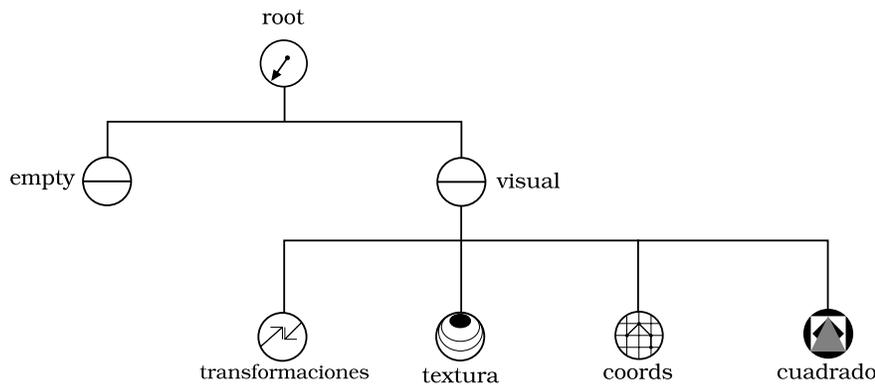


Figura 3.6: Gráfica de escena de GeoSceneObjectSST.

Gráfica de escena de la presión atmosférica

El *Separator visual* presenta como hijos: un nodo *Transform* para la georeferenciación, la textura correspondiente a la representación de las anomalías de presión atmosférica sobre el océano y un *Separator* llamado **superficie**, el cual contendrá las coordenadas y las caras correspondientes a la superficie obtenida. La razón por la que en la gráfica de escena se tiene un nodo para contener la información de la superficie, radica en aislar los componentes y facilitar el cambio de éstos con respecto al tiempo, ya que tanto la textura como la superficie deben cambiar si se presenta un comando de animación dentro de las acciones del sistema.

La gráfica de escena de la presión atmosférica se muestra en la figura 3.5.

Gráfica de escena de los vientos alisios

La gráfica de escena de los vientos alisios es igual a la que se tiene para la temperatura superficial del océano, ya que presentan características similares y sólo varían en la representación visual que tienen las texturas que utilizan.

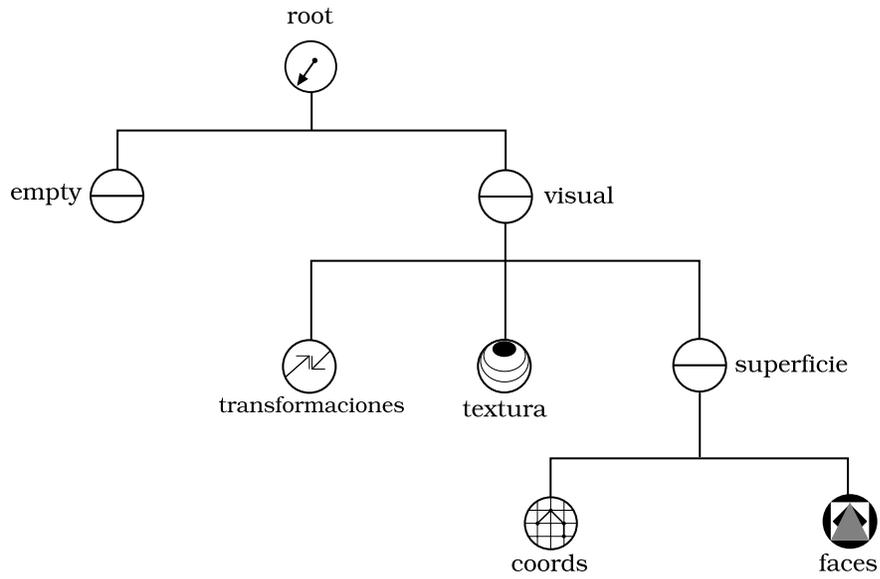


Figura 3.7: Gráfica de escena de GeoSceneObjectSLP.

La gráfica de escena de los vientos alisios se muestra en la figura 3.8.

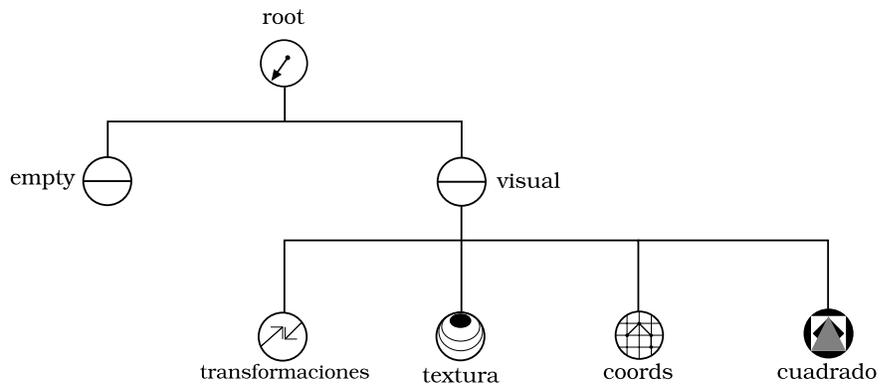


Figura 3.8: Gráfica de escena de GeoSceneObjectWND.

Resultados

Dentro de los resultados obtenidos se tiene una visualización que permite observar la evolución de la temperatura superficial y subsuperficial, la presión atmosférica y los vientos alisios dentro de un ambiente georeferenciado en el Océano Pacífico ecuatorial, durante las diferentes condiciones que se presentan, es decir, durante las condiciones normales, en presencia de El Niño y de La Niña. Además el sistema permite el uso de scripts para definir escenas y sus transiciones con respecto al tiempo, lo que permite mostrar diferentes características sin la necesidad de recompilar el sistema cada vez que se requiera hacer un cambio de escena.

Debido a las características en el diseño del sistema, es posible reutilizar la mayor parte de sus componentes, para adecuarse a otros fenómenos o datos que se requieran visualizar. El manejo de los lenguajes scripting y eventos, es fácilmente modificable y reutilizable, permitiendo su inclusión en diferentes visualizaciones. Y además todos los subprogramas realizados para la generación de los elementos visuales pueden ser reutilizados para procesar otros datos, con pocas modificaciones.

Ejemplo de una clase utilizando el sistema

A continuación se muestra el guión de una clase para explicar el fenómeno de El Niño, el cual fue proporcionado por el Dr. Jorge Zavala Hidalgo colaborador en el proyecto, además se muestran los scripts necesarios para que el sistema muestre los elementos correspondientes a lo que se explica.

Primero es necesario definir algunas escenas, para utilizar el sistema

```
%primera escena, tiene activa la variable SST en la fecha 01-01-97
scene escena1{
    time 19970101
    SST
}
%segunda escena, tiene activa la variable SST en la fecha 01-01-98
scene escena2{
    time 19980101
    SST
}
```

“El fenómeno de El Niño tiene un gran impacto en el clima de todo el planeta y es el más importante en la escala de tiempo de la variación interanual. Se caracteriza por una variación con respecto de las condiciones promedio de las variables atmosféricas y oceánicas del Océano Pacífico ecuatorial produciendo un impacto en la precipitación y temperatura sobre amplias regiones del planeta incluyendo, de manera importante, a México.”

“La temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico ecuatorial se caracteriza por tener una distribución heterogénea, con temperaturas más altas en el oeste y una lengua de agua fría en el este. Esta distribución se debe a la circulación oceánica ecuatorial que transporta las agua cálidas superficiales hacia el oeste y facilita el afloramiento de aguas frías subsuperficiales en el este; esta circulación es producto de los vientos superficiales.”

```
%se muestra la temperatura superficial de la fecha 01-01-97  
%durante 60 segundos  
FIXED escena1 60
```

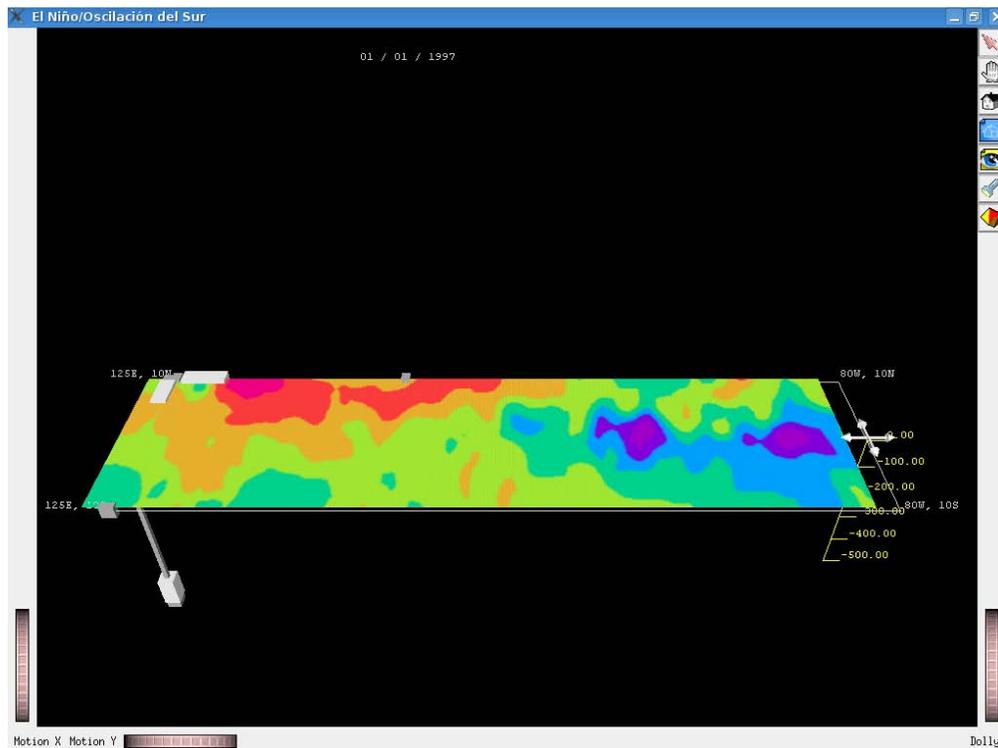


Figura 3.9: Captura del sistema que muestra las anomalías de temperatura superficial del 1 de enero de 1997.

“Una característica del fenómeno de El Niño es que está acoplado al ciclo estacional, iniciando su desarrollo hacia el final de la primavera, presentando anomalías positivas en el oeste del Océano Pacífico ecuatorial al inicio del evento que se desplazan hacia el este y se intensifican conforme transcurren los meses, alcanzando su máxima intensidad en diciembre-enero y su decaimiento durante el primer semestre del año. Esta evolución del fenómeno es similar de un evento a otro, pero su intensidad y duración varían significativamente.”

```
%se anima la temperatura superficial durante 90 segundos
%la animacion va de la fecha 01-01-97 a la fecha 01-01-98
ANIMATE escena1 19980101 90
```

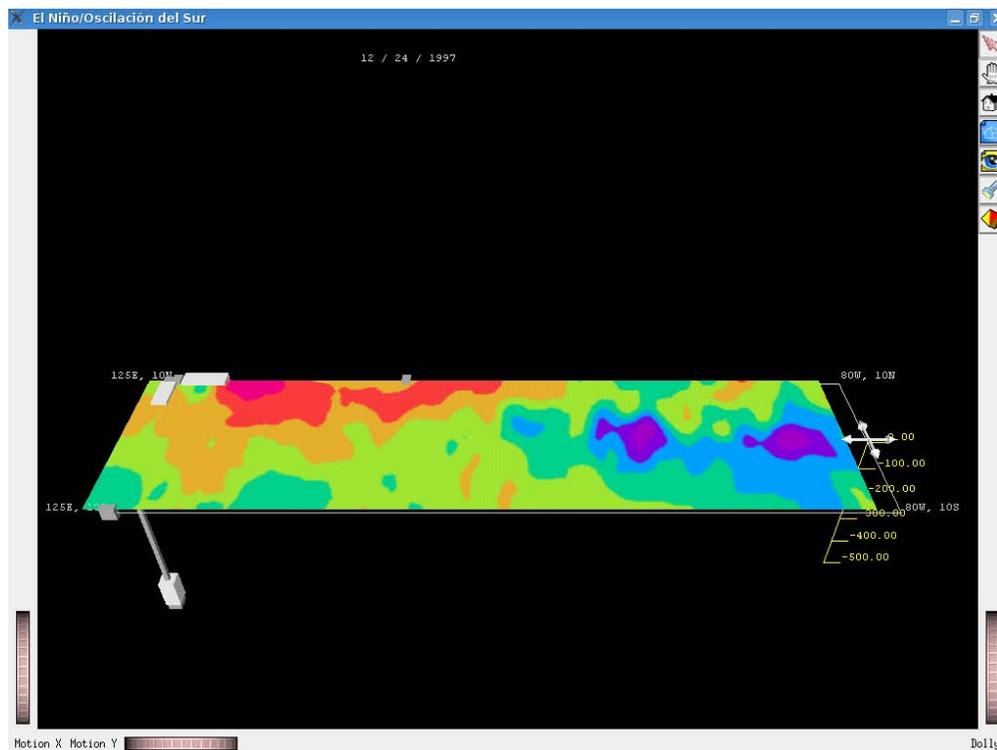


Figura 3.10: Captura del sistema que muestra las anomalías de temperatura superficial del 24 de diciembre de 1997.

“En algunos casos de eventos de El Niño se ha observado que, después del desarrollo de la anomalía positiva de temperatura superficial del mar en el oeste del Océano Pacífico ecuatorial se ha desarrollado una anomalía negativa, característica del fenómeno de La Niña. De hecho, hay trabajos que sugieren que así es la evolución natural del fenómeno. Lo cierto es que así ha sucedido en los eventos

más intensos que se han observado: el de 1982-1983 y el de 1997-1998.”

```
%se anima la temperatura superficial durante 90 segundos
%la animacion va de la fecha 01-01-98 a la fecha 01-01-99
ANIMATE escena2 19990101 90
```

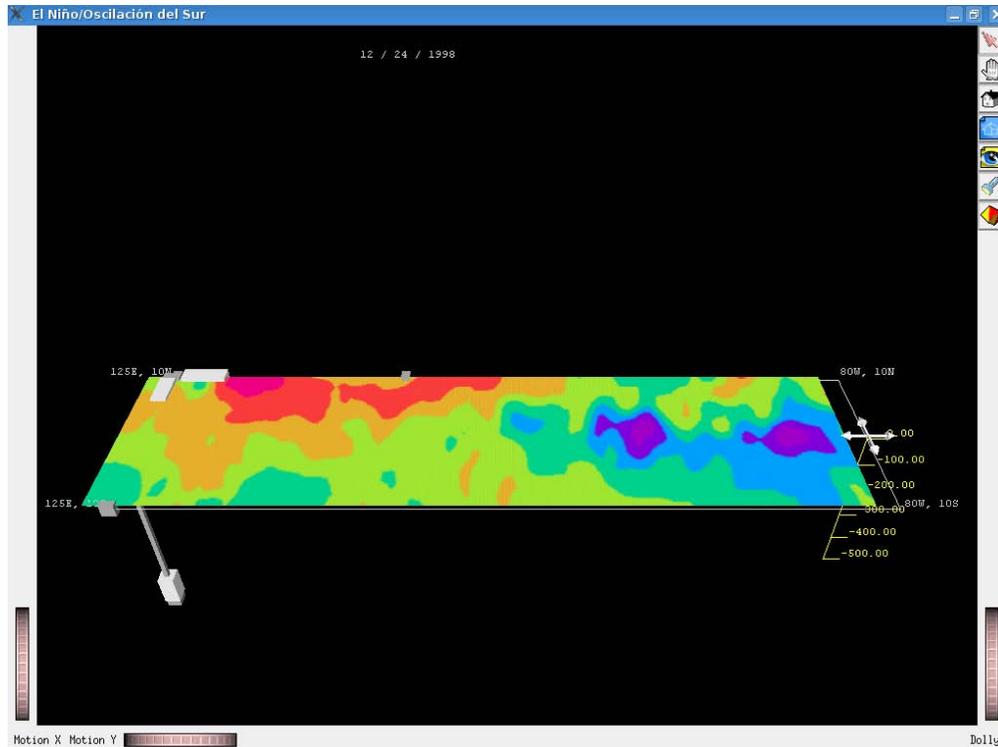


Figura 3.11: Captura del sistema que muestra las anomalías de temperatura superficial del 24 de diciembre de 1998.

“La anomalía en la temperatura del mar no se limita a la superficie sino que también afecta las capas subsuperficiales. Otra característica del fenómeno de El Niño es que aumenta la temperatura y la profundidad de la capa mezclada oceánica, observándose valores anómalos en el oeste de Océano Pacífico ecuatorial que se propagan hacia el este al irse desarrollando el fenómeno. La propagación de la anomalía en la profundidad de la termoclina, que es la región de mayor variación de la temperatura en la columna, está determinada principalmente por la velocidad de propagación de una onda interna de Kelvin, cuya velocidad está determinada por las diferencias de densidad entre la capa mezclada y la capa por debajo de la termoclina. En las condiciones del Océano Pacífico ecuatorial la onda se propaga con una velocidad del orden de un par de metros por segundo,

cruzando el Océano Pacífico ecuatorial en unos 3 meses”.

```
%se oculta la temperatura superficial
HIDE escena1 SST
```

```
%se muestra la temperatura subsuperficial
SHOW escena1 SubST
```

```
%se anima la temperatura subsuperficial durante 180 segundos
%la animacion va de la fecha 01-01-97 a la fecha 01-01-99
ANIMATE escena1 19990101 180
```

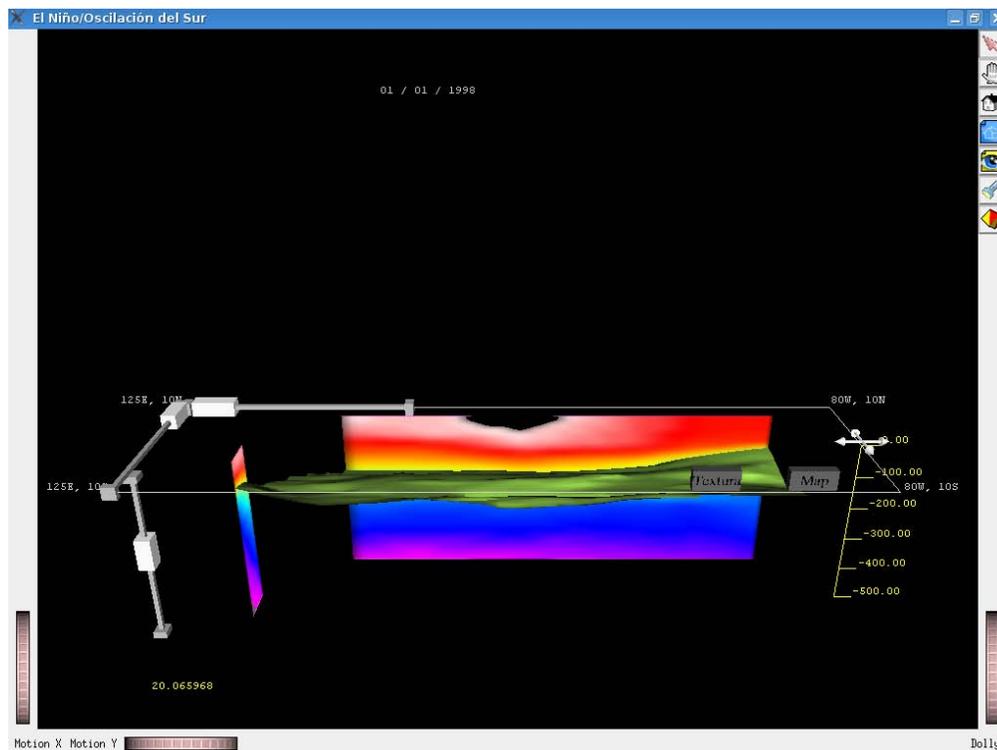


Figura 3.12: Captura del sistema que muestra la temperatura subsuperficial del 1 de enero de 1998.

“Es importante notar que la anomalía en la temperatura superficial del mar no se restringe a la zona ecuatorial pues al llegar la onda de Kelvin a las costas de Sudamérica parte de la energía se refleja como un par de ondas de Rossby, que viajan al norte y sur del ecuador hacia el oeste, y parte se propaga a lo largo de la costa como una onda de Kelvin costera, llevando las anomalías de temperatura

superficial del mar hacia el Pacífico nororiental, frente a las costas de México y Centroamérica.”

%se muestra la temperatura superficial durante 60 segundos
FIXED escena2 60

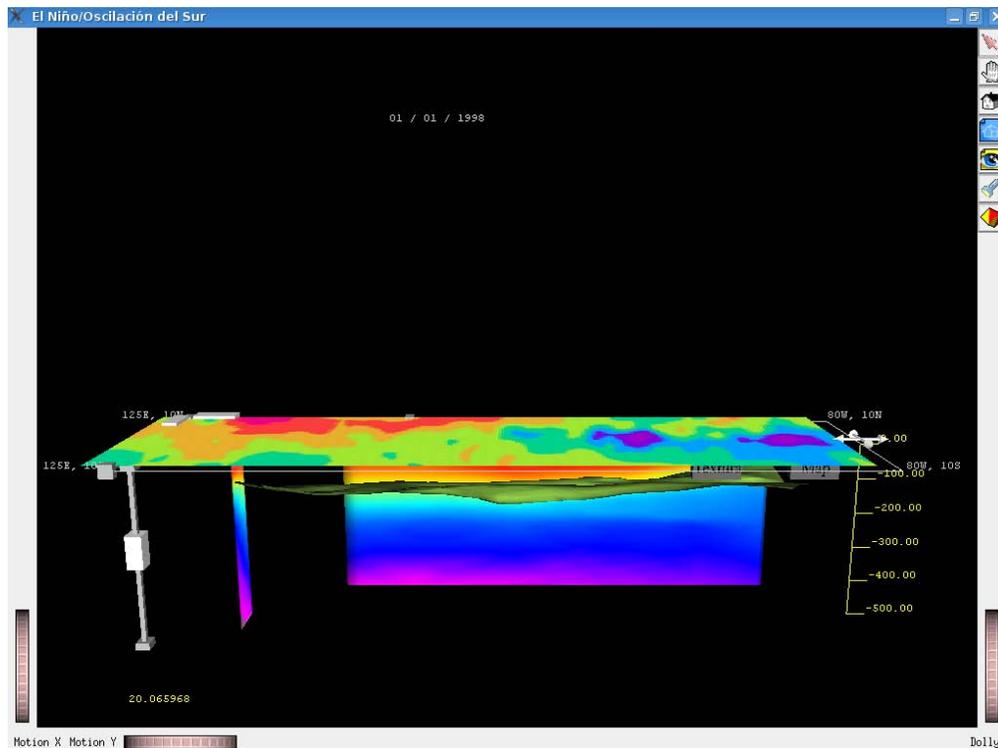


Figura 3.13: Captura del sistema que muestra las anomalías de temperatura superficial y la temperatura subsuperficial del 1 de enero de 1998.

“La presión atmosférica superficial tiene la característica de que, en condiciones normales, es mayor en el este y menor en el oeste del Océano Pacífico ecuatorial. En términos generales esto se debe a que cuando la temperatura del aire en superficie es mayor disminuye la presión y, cuando es menor, aumenta, dando como resultado un gradiente a lo largo del ecuador con un mínimo sobre la llamada alberca de agua caliente. Cuando el máximo de temperatura se desplaza hacia el Océano Pacífico ecuatorial central, también lo hace el mínimo de presión, elevándose la presión sobre la región occidental, con lo cual disminuye el gradiente de presión a lo largo del ecuador o, en ocasiones, se revierte. La anomalía de presión se propaga en forma acoplada con la anomalía de temperatura, ambas hacia el este.”

```
%se oculta la temperatura subsuperficial
HIDE escena1 SubST
```

```
%se muestra la presion atmosferica
SHOW escena1 SLP
```

```
%se anima la presion atmosferica durante 180 segundos
%la animacion va de la fecha 01-01-97 a la fecha 01-01-99
ANIMATE escena1 19990101 180
```

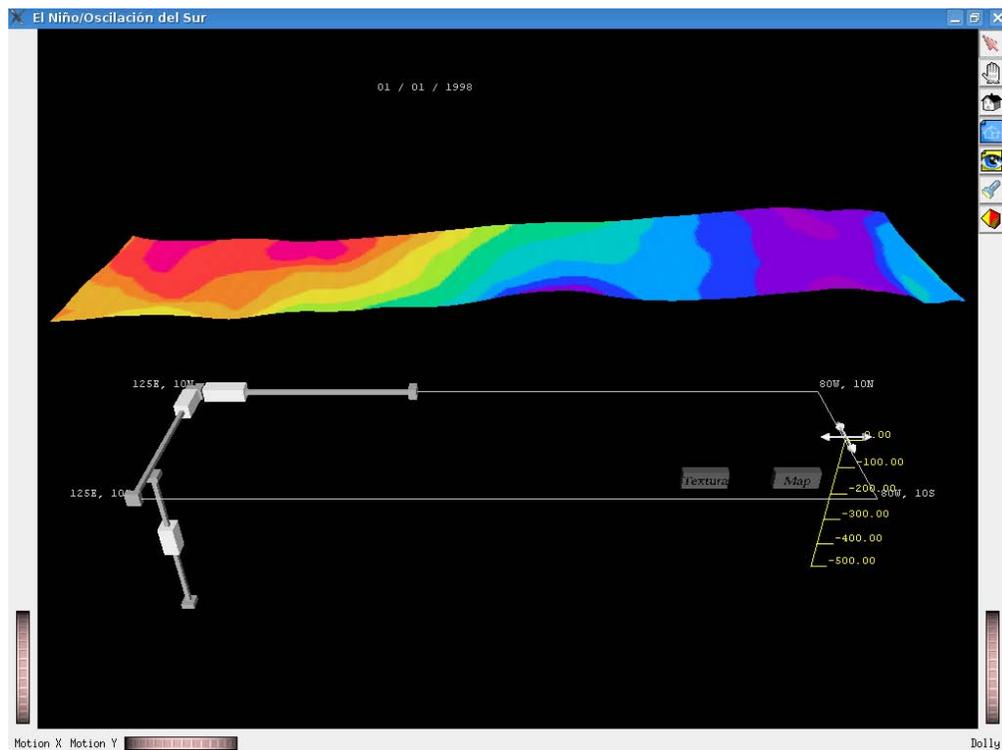


Figura 3.14: Captura del sistema que muestra las anomalías de presión atmosférica del 1 de enero de 1998.

“Los vientos en el ecuador también se ven afectados durante el fenómeno de El Niño; normalmente dominan los vientos del este pero durante estos eventos se debilitan o incluso cambian su dirección a vientos del oeste. Los vientos son consecuencia de las diferencias de presión. En el ecuador el viento se desplaza de centros de alta hacia centros de baja presión, a diferencia de lo que sucede fuera de la zona ecuatorial en donde la fuerza de Coriolis, debida a la rotación de la Tierra, provoca que los vientos tengan una dirección perpendicular a los gradientes de presión.”

```
%se oculta la presion atmosferica
HIDE escena1 SLP

%se muestran los vientos alisios
SHOW escena1 WND

%se animan los vientos alisios durante 180 segundos
%la animacion va de la fecha 01-01-97 a la fecha 01-01-99
ANIMATE escena1 19990101 180
```

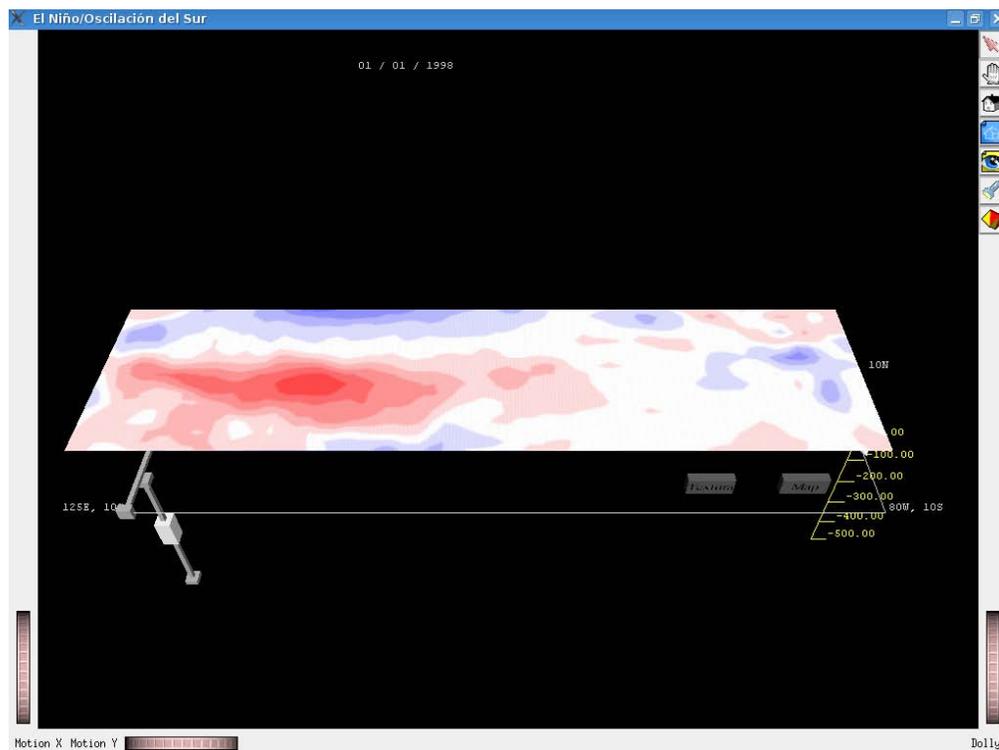


Figura 3.15: Captura del sistema que muestra las anomalías de vientos alisios del 1 de enero de 1998.

“Hemos visto que el fenómeno de El Niño afecta la temperatura superficial del mar, la profundidad de la termoclina, la presión atmosférica en superficie y los vientos. ¿Cómo se relacionan estas anomalías? ¿Cuál variable determina a las demás? Estas son preguntas fundamentales. Realmente una anomalía de la temperatura superficial del mar que alcanza cierto valor por un determinado número de días puede desencadenar el fenómeno. Sin embargo, también una anomalía de los vientos del este, que se debiliten durante un período determinado de días, puede desencadenar el fenómeno. Una vez que las anomalías alcanzan cierto valor

se retroalimentan positivamente, es decir, una anomalía en la temperatura superficial del mar va a provocar una anomalía en los vientos, los cuales a su vez provocan una anomalía en la temperatura superficial del mar y así sucesivamente. El debilitamiento de los vientos provoca el inicio de una onda de Kelvin y el aumento de la temperatura superficial del mar debido a que el océano pierde menos calor al disminuir la evaporación y el flujo de calor latente asociado a ésta. El cambio en la temperatura superficial del mar y el cambio en la posición de su máximo modifica el gradiente de presión atmosférica, el cual a su vez modifica los vientos, haciéndolos más débiles y cambiando las zonas de convergencia.”

```
%se muestra la temperatura superficial  
SHOW escena1 SST
```

```
%se muestra la temperatura subsuperficial  
SHOW escena1 SubST
```

```
%se muestra la presion atmosferica  
SHOW escena1 SLP
```

```
%se animan todas las variables durante 210 segundos  
%la animacion va de la fecha 01-01-97 a la fecha 01-01-00  
ANIMATE escena1 20000101 210
```

“Además de estas variables tenemos la convección que es el movimiento ascendente de masas de aire húmedo que da lugar a la formación de nubes. La zona de convección, generalmente localizada en el Océano Pacífico ecuatorial occidental se desplaza hacia el este durante la evolución del fenómeno de El Niño, dando lugar a un cambio en las zonas de convección y precipitación. El fenómeno de El Niño se caracteriza también por anomalías en la precipitación siendo más intensa en las costas de Sudamérica, particularmente en Perú, y menores en el Océano Pacífico ecuatorial central y occidental.”

```
%se oculta la temperatura superficial  
HIDE escena1 SST
```

```
%se oculta la temperatura subsuperficial  
HIDE escena1 SubST
```

```
%se oculta la presion atmosferica  
HIDE escena1 SLP
```

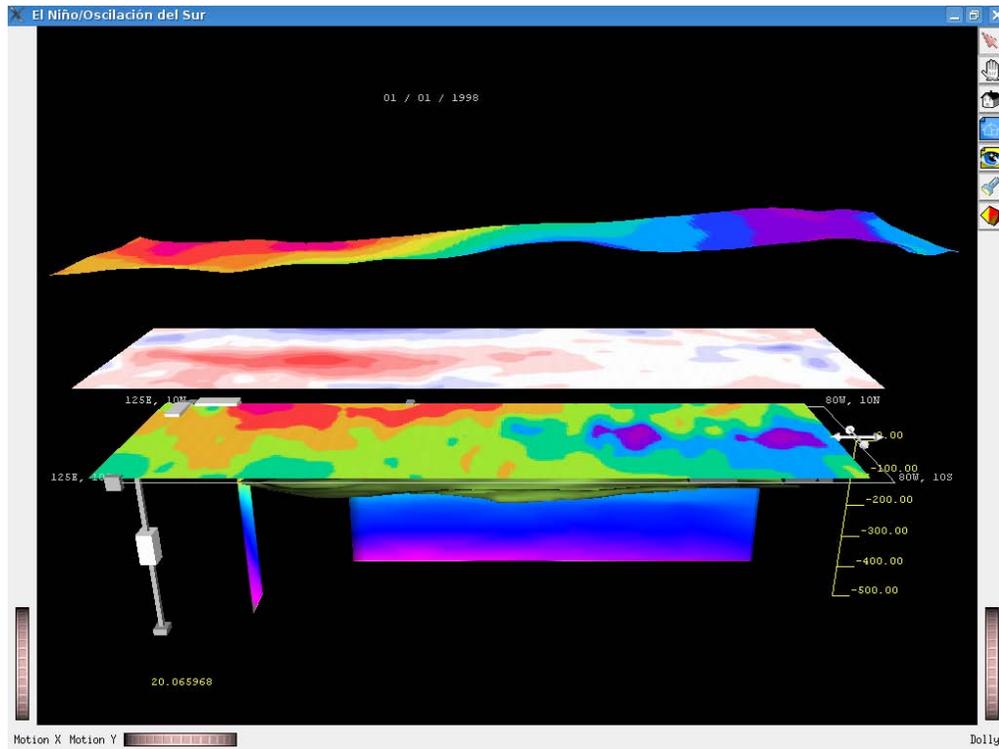


Figura 3.16: Captura del sistema que muestra todas las variables al mismo tiempo del 1 de enero de 1998.

```
%se animan los vientos alisios durante 180 segundos
%la animacion va de la fecha 01-01-97 a la fecha 01-01-99
ANIMATE escena1 19990101 180
```

“Como se indicó más arriba, después del fenómeno de El Niño de 1997-1998 se desarrolló una condición de La Niña, la cual también podemos observar con esta visualización pero esa se deja para otra sesión.”

Este ejemplo de clase se utilizó como prueba final del sistema, mostrando la forma en la que se utilizan los scripts para darle seguimiento.

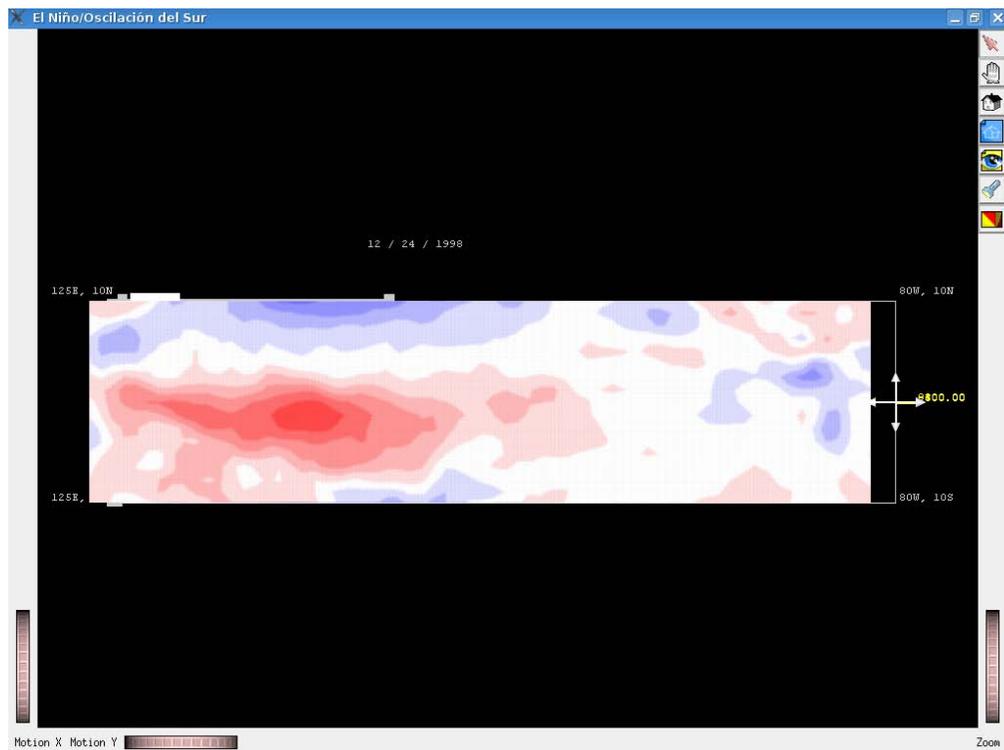


Figura 3.17: Captura del sistema que muestra las anomalías de vientos alisios del 24 de diciembre de 1998.

Conclusiones

La visualización es una área bastante amplia y en constante crecimiento, que proporciona herramientas muy poderosas para la observación de diversos tipos de datos, proporcionando un apoyo muy útil tanto en investigación como en docencia. El desarrollo de este sistema fue un largo proceso, tanto en la búsqueda de técnicas que permitieran visualizar los datos y la comprensión de las mismas, como en el diseño e implementación de todos los componentes involucrados. Algunos de los diferentes problemas que existen en el desarrollo de sistemas de visualización son: encontrar las técnicas adecuadas para el tipo de datos a visualizar, la implementación correcta de dichas técnicas y su integración para que funcionen en conjunto.

El sistema proporciona una forma de explicar de manera visual el fenómeno de El Niño, que al utilizar datos reales del fenómeno permite observar su comportamiento real y no el comportamiento ideal, que usualmente se explica utilizando datos de modelos numéricos y que no reflejan las características que en realidad están presentes durante el fenómeno. El proyecto cumple con los requisitos propuestos, es decir, proporciona herramientas para realizar la visualización interactiva de las diferentes variables involucradas durante El Niño; brinda una base para la incorporación de nuevas variables al mismo, así como la reutilización de código para la creación de un sistema de visualización de fenómenos con características similares.

Algunas de las posibles mejoras para el sistema son:

- Buscar otra fuente de datos, para mejorar la resolución espacial y temporal.
- Encontrar una forma más eficiente de interpolar los datos de temperatura subsuperficial del océano, para aumentar la resolución de las isosuperficies o utilizar otro algoritmo para la obtención de isosuperficies, que no involucre la obtención de una rejilla regular.
- Mejorar la forma en la que se cargan los objetos visuales, para hacer más eficiente la transición de las variables respecto al tiempo.
- La adición de la variable de precipitación, así como la técnica adecuada para su visualización.

Glosario

Alberca de agua caliente	Zona en el océano donde se registran temperaturas superficiales iguales o superiores a 28°C.	50
Ciclo estacional	Ciclo en el que se presentan las 4 estaciones del año.	47
Onda de Kelvin	Es un tipo de onda que se genera en la superficie de un líquido que se encuentra fijo a un sistema en rotación. Se le suele llamar onda de frontera porque se propaga a lo largo de la frontera del fluido.	48
Onda de Rossby	Es una onda oceánica de poca amplitud (10 a 20 centímetros) y gran anchura (cientos de kilómetros) que se mueve lentamente hacia el oeste atravesando el Océano Pacífico a lo largo de varias décadas.	49

Bibliografía

- [1] Juan Pablo Sarmiento. *El Niño southern oscillation - ENSO 1997/98 and risk management in the Latin American and Caribbean Region*. United States Agency for International Development Office of U.S. Foreign Disaster Assistance, 1998.
- [2] Julio Sheinbaum. Current theories on el niño-southern oscillation: A review. *Geofísica Internacional*, 42(3):291–305, 2003.
- [3] Charles Hansen and Christopher R. Johnson, editors. *The Visualization Handbook*. Elsevier, 2005.
- [4] Martin Bertram and Hans Hagen. Subdivision surfaces for scattered-data approximation. In *Eurographics and IEEE TCVG Symposium on Visualization*, pages 55–63, 2001.
- [5] J. C. Carr, R. K. Beatson, J. B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum, and T. R. Evans. Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 67 – 76. SIGGRAPH, ACM Press, 2001.
- [6] Yi-Jen Chiang, Cladio T. Silva, and William J. Schroeder. Interactive out-of-core iso-surface extraction. In *Proceedings of the conference on Visualization '98*, pages 167–174, 1998.
- [7] Michael Garland and Paul S. Heckbert. Fast polygonal approximation of terrains and height fields. Technical report, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1995.
- [8] Bernd Hamann Gunther H. Weber, G. S. and Hans Hagen. Exploring scalar fields using critical isovalues. In *Proceedings of IEEE Visualization 2002 Conference*, pages 171–178, 2002.
- [9] James Helman and Lambertus Hesselink. Representation and display of vector field topology in fluid flow data sets. *Computer*, pages 61–73, 1989.
- [10] Paolo Cignoni, Claudio Montani, Enrico Puppo, and Roberto Scopigno. Optimal iso-surface extraction from irregular volume data. In *Proceedings of the 1996 symposium on Volume visualization*, 1996.

- [11] Shachar Fleishman, Daniel Cohen-Or, and Claudio T. Silva. Robust moving least-squares fitting with sharp features. *ACM Transactions on Graphics*, 24(3):544 – 552, 2005.
- [12] William E. Lorensen and Harvey E. Cline. Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm. *Computer Graphics*, 21(4):163–169, 1987.
- [13] Chien-Chang Ho, Fu-Che Wu, Bing-Yu Chen, Yung-Yu Chuang, and Ming Ouhyoung. Cubical marching squares: Adaptive feature preserving cubical marching squares: Adaptive feature preserving surface extraction from volume data. *EUROGRAPHICS*, 24(3):9, 2005.
- [14] Thomas Lewiner, Hélio Lopes, Antônio Wilson Vieira, and Geovan Tavares. Efficient implementation of marching cubes cases with topological guarantees. *Journal of Graphics Tools*, 8(2):1–15, December 2003.
- [15] Denis Zorin, Peter Schroder, and Wim Sweldens. Interpolating subdivision for meshes with arbitrary topology. In *Computer Graphics Proceedings*, pages 189–192, 1996.
- [16] Josie Wernecke. *The Inventor Mentor: Programming Object-Oriented 3d Graphics with Open Inventor, Release 2*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1993.
- [17] Josie Wernecke. *The Inventor Toolmaker: Extending Open Inventor, Release 2*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1994.