



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**EFFECTOS CLIMÁTICOS
SOBRE EL AGUA SUBTERRÁNEA
Y EL LAGO ALCHICHICA PUEBLA, MÉXICO.**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A

JORGE GARCÍA MARTÍNEZ

JURADO EXAMINADOR:

DR. TOMÁS MORÁN GONZÁLEZ (Presidente)
DR. SERGIO RODRÍGUEZ ELIZARRARÁS (Vocal)
DR. OSCAR ESCOLERO FUENTES (Secretario)
DR. LUIS MARIN STILLMAN (Suplente)
DR. JUAN CERVANTES PÉREZ (Suplente)

DIRECTOR DE TESIS: DR. OSCAR ESCOLERO FUENTES



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

A mi Madre:

Marina Martínez Enríquez

Familia

Y

Hermanos que, de alguna forma
u otra me brindaron su ayuda y confianza.

Mis más grandes agradecimientos:

A todos los integrantes del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que hicieron posible que un servidor realizara una más de mis metas. Al proporcionarme los medios económicos mediante una de las tantas becas que otorga CONACYT a los estudiantes, que muestran su deseo de superación y que lo muestran concluyendo sus estudios. Demostrando que el potencial intelectual existe en cada uno de los estudiantes. Sin embargo, algunas veces no aflora por falta de los medios económicos necesarios para llevar a cabo nuestros estudios. Gracias de nuevo a CONACYT por darme la oportunidad de obtener el grado de master en Ciencias de la Tierra ya que sin su ayuda no hubiese sido posible.

Gracias:

A todos Investigadores que en clase y campo, nos comparten sus experiencias y conocimientos. Enriqueciendo así, nuestro aprendizaje.

A los Investigadores:

Dr. Tomás Morán González, U. N. A. M.

Dr. Sergio Rodríguez Elizarrarás, U. N. A. M – U. V.

Dr. Oscar Escolero Fuentes, U. N. A. M.

Dr. Luís Marín Stillman, U. N. A. M.

Dr. Juan Cervantes Pérez, U. V.

Dr. Ramiro Rodríguez, U. N. A. M.

Dra. Solleiro Rebolledo, U. N. A. M.

Al Jefe del área de Agua subterráneas de CONAGUA del estado de Puebla. Ing. Átalo Ortiz y al Ing. Carlos Alberto De Gyves Gallegos, por su ayuda tan importante al facilitar la información necesaria para llevar a cabo este estudio.

Al Jefe del área de Agua subterráneas de la CONAGUA del estado de Veracruz Zona Golfo-Centro. Ing. Horacio Martínez Muñoz, por su pronta ayuda tan importante al facilitar la información necesaria para el desarrollo este estudio.

Al pasante de Arquitectura, Juan de Díos García Domínguez por su apoyo desinteresado en la toma de lecturas de los niveles de agua y fotografías del lago-cráter Alchichica.

Al apoyo moral de mis amigos y compañeros de trabajo con los que elaborado en la Universidad Veracruzana: Dr. Juan Cervantes Pérez
Mtro. en Geografía Agustín Pérez Sesma.

U. N. A. M.

Índice.

Resumen.....	1
I. GENERALIDADES.	
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.4. Localización del área de estudio y Vías de acceso.....	7
1.5. Metodología general.....	8
II. CUENCA LIBRES-ORIENTAL.	
2.1. Geología Regional.....	9
2.2. Hidrología.....	12
2.3. Climatología.....	13
2.4. Lago–cráter Alchichica.....	14
2.5. Lago–cráter La Preciosa.....	14
2.6. Lago–cráter Quechulac.....	15
III. VARIABILIDAD CLIMÁTICA.	
3.1. Antecedentes.....	16
3.2. Fluctuaciones Climáticas.....	18
3.3. El Niño y La Niña.....	18
3.4. Causas y Características del fenómeno La Niña.....	21
IV. EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANPIRACIÓN.	
4.1. Evaporación.....	24
4.2. Métodos para estimar la evaporación.....	26
4.3. Evapotranspiración.....	27
4.4. Evapotranspiración real y potencial.....	27

V. BALANCE HIDRICO

5.1. Forma general de la ecuación del Balance hídrico.....	29
5.2. Balance hídrico para intervalos de tiempo diferentes.....	31
5.3. Balance hídrico para Masas de agua de Diferentes dimensiones.....	32
5.4. Cierre de la ecuación del Balance hídrico.....	33
5.5. Principales componentes del Balance hídrico.....	34
5.5.1. Datos básicos.....	34
4.5.2. Mapas.....	34

VI. PROCESAMIENTO DE DATOS

6.1. Introducción.....	35
6.2. Datos climatológicos.....	36
6.3. Área del lago–cráter.....	36
6.4. Altitud y Nivel estático.....	39

VII. METODOLOGÍA Y RESULTADOS.

7.1. Introducción.....	41
7.2. Variabilidad climática en el área de estudio.....	41
7.2.1. Metodología.....	41
7.3. Sequía meteorológica.....	44
7.3.1. Metodología.....	44
7.4. Cálculo de la evapotranspiración.....	47
7.4.1. Metodología.....	47
7.5. Balance Hidrogeológico del lago–cráter Alchichica.....	49
7.5.1. Metodología.....	49
7.5.2. Red de flujo.....	57
7.6. Análisis de tendencia de Precipitación y Evaporación.....	63
7.7. Modelo conceptual del lago–cráter Alchichica.....	67
7.8. Resultados.....	69
7.8.1. Proyección del Balance hídrico para el año 2004, 2006 y 2010.....	70
7.9. Línea de Interfase salina.....	71

VIII. ANÁLISIS, DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

8.1. Análisis de los resultados.....	72
8.2. Discusión de resultados.....	74
8.3. Conclusiones.....	75

BIBLIOGRAFÍA.....	76
-------------------	----

APÉNDICES

I. Información climatológica media mensual (temperatura, precipitación y evaporación).....	93
II. Cálculo de Evapotranspiración Real y Potencial.....	102
III. Aprovechamientos censados.....	111
IV. Aprovechamientos censados ubicados sobre la región de Tepeyahualco....	123
V. Fotos aéreas de diferentes tiempos y escalas, que presentan el área del espejo del lago-cráter Alchichica (AL).....	130
VI. Cálculo de flujo y de Interfase Salina.....	134
VII. Toma de muestras en el lago-cráter Alchichica.....	140
VIII. Gráfica y Tabla de áreas estimadas, período (1965–2010).....	143

Resumen.

Se propone demostrar que la variabilidad climática es un factor que impacta en el cuerpo de agua del lago-cráter Alchichica, de la cuenca Libres – Oriental, Puebla manifestándose en el abatimiento de su nivel estático; así como el desarrollo del Balance Hidrogeológico del mismo, para diseñar un modelo conceptual que muestre la interacción Lago-Acuífero. El lago-cráter Alchichica se localiza en las coordenadas (19° 24' 49.64" de Latitud Norte y 97° 24' 13.24" Longitud Oeste), en la parte central de la cuenca Libres-Oriental Puebla. Situado sobre un acuífero libre constituido por sedimentos tales como arena (gruesa, media y fina), arcillas, arena arcillosa, lutita y caliza que muestra la estratigrafía de los pozos perforados en Zalayeta (Pozo – 1 y Pozo – 3, 1973), y que alimenta al lago-cráter; en la región de Tepeyahualco Puebla sobre el cual se localizan otros lagos-cráter (La Preciosa y Quechulac), entre algunos otros. La aplicación estadística (Prueba de Fisher, de Varianzas inversas), a las muestras de los datos de la estación climatológica Alchichica (años Neutros, años La Niña, años El Niño), al valor crítico de $\alpha = 0.05$ muestra como resultado la presencia de la variabilidad climática en las variables de temperatura y precipitación, presentándose como un incremento en la temperatura y disminución en la precipitación, durante el evento El Niño (muestra de la variabilidad natural). Este incremento de la temperatura así como la disminución en la precipitación, son factores que implican un aumento en la evaporación, impactando en el lago-cráter Alchichica; presentándose como abatimiento en el cuerpo de agua. El abatimiento del lago-cráter estimado en campo (2004), fue de 4.5 m en 40 años y los resultados obtenidos en el balance hidrogeológico para los años 1996, 2004, 2006 y 2010, en orden, son los siguientes: 3.42 m, 4.18 m, 4.42 m y 4.80 m, de los cuales comparando el resultado calculado para el 2004, con el resultado estimado en campo, existe una diferencia de 0.32 m en el abatimiento. La cual se puede atribuir a que se tomó como 0.56 el coeficiente del tanque de evaporación, para obtener la evaporación del lago-cráter Alchichica.

I. GENERALIDADES

1.1 Introducción.

Los cambios climáticos se pusieron de manifiesto en nuestro planeta después de su formación. Diversos fenómenos naturales se llevaron a cabo durante largos periodos de tiempo, hasta llegar a una tendencia de equilibrio, es decir hasta llegar a formarse los climas que hoy en día conocemos. Estudios paleoclimáticos han arrojado resultados evidentes de estas fluctuaciones climáticas. Sin embargo, hoy en día, tanto los eventos naturales como antropogénicos tienden a modificar los climas ya conocidos (El Holoceno, en México [ver; Villegas, 2007]).

Se llama Cambio Climático, a la variación global del clima de la Tierra. Tal cambio se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todas las variables climáticas: temperatura, precipitación, nubosidad, etc. Es debido a causas naturales y, en los últimos siglos, también a la acción del hombre (Wikipedia. 2007, http://es.wikipedia.org/wiki/Cambio_clim%C3%A1tico#Causas_de_los_cambios_clim.C3.A1ticos).

Desde su existencia, el ser humano ha contribuido al desequilibrio del efecto invernadero ya existente, al incorporar a la atmósfera entre otros gases de efecto invernadero el bióxido de carbono (CO₂). El cual se intensifica durante el desarrollo preindustrial, ocasionando un incremento en la temperatura a nivel global (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (PICC), 2001, <http://www.ipcc.ch/pub/ipccwg1s.pdf>).

La variabilidad del clima se refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas, los fenómenos extremos, etc.), que pueden suceder en cualquier momento y en cualquier sitio del planeta. La variabilidad puede deberse a procesos naturales internos que ocurren dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a

variaciones en el forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa). (Instituto Nacional de Ecología (INE), 2005, http://cambio_climatico.ine.gob.mx/faq.html#11).

Por otra parte, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su Artículo 1, define el cambio climático como: "cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables" (IPCC, 2001).

Por tanto, la variabilidad del clima se refiere a variaciones provocadas de manera natural o por influencia de las actividades del hombre, mientras que el cambio climático únicamente es atribuible a la influencia de actividades humanas (INE, 2005, http://cambio_climatico.ine.gob.mx/faq.html#11).

Es probable que el cambio climático, intensifique la variabilidad climática. Afectando variables climáticas tales como: la temperatura, precipitación, presión, humedad, etc. (INE, 2005, http://cambio_climatico.ine.gob.mx/faq.html#11).

Como consecuencia, un incremento en la temperatura provoca un incremento en la tasa de evaporación tanto en humedales como en los cuerpos de agua, y por ende pérdida del recurso; lo que implicaría pérdidas económicas en algunos sistemas sociales y económicos (IPCC, 2001, Informe de síntesis, <http://www.ipcc.ch/pub/ipccg1s.pdf>). Esto exige estudios multidisciplinarios enfocados a una mayor comprensión de la interacción del agua superficial y subterránea, los cuales tengan como objetivo lograr un mejor manejo del recurso.

Otras causas que implican una mayor demanda del recurso son: el incremento de población, el desarrollo industrial y el aumento de cultivos por riego, por lo cual la demanda de agua ha crecido a través de los años; esto ya es un problema presente a nivel mundial. El aumento de población es un componente de estrés importante a considerar en el diseño de las políticas públicas sobre el agua. Así como los efectos de la variabilidad climática sobre la tasa de

evaporación o evapo-transpiración, puesto que la disminución de la precipitación pluvial y el incremento en la temperatura pueden ocasionar sequías severas, principalmente en los climas áridos y semi-áridos, que pueden verse reflejados en el abatimiento del nivel de agua de los cuerpos de agua presentes en la zona, tanto superficiales como subterráneos (Ministerio del Medio Ambiente de España, 1997, <http://www.unfccc.de/resource/docs/natc/spanc2.pdf>).

Durante el transcurso de recopilación de información tanto climatológica, como piezométrica, se revisaron estudios hidrogeológicos históricos, realizados por dependencias gubernamentales tales como la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) hoy Comisión Nacional de Agua (CNA), Comisión Federal de Electricidad (CFE), Sistema Operador de servicios de Agua Potable y alcantarillado del Municipio de Puebla (SOAPAP) y batimétricos (CFE), realizados para estimar la disponibilidad de agua en el Acuífero Libres-Oriental, Puebla. Algunos incluyen estudios geofísicos, mapas de geología superficial, cartas de elevación de nivel estático, así como estudios de calidad de agua; como el realizado en Perote-Zalayeta, por SARH 1983, del estado de Veracruz, y el de termometría y batimetría de las lagunas situadas en la cuenca Libres-Oriental (CFE, 1979), en el cual realizaron perfiles de temperatura de las lagunas sin abordar los efectos de la variabilidad climática sobre los cuerpos de agua. Tampoco mencionan los posibles factores del abatimiento, el cual es el problema que existe en el área de estudio.

La cuenca lacustre Libres-Oriental, cuenta con un clima subhúmedo a sus alrededores y semi-árido en la parte central. Esta última está propensa a la influencia del cambio climático (por su alta evaporación y baja precipitación). Hidrológicamente constituye un reservorio de agua subterránea muy importante, lo cual lo hace atractivo para exportar el recurso hacia otras localidades con problemas de escases del mismo, originado por algunos factores tales como: el incremento demográfico, industrial, etc. En ella, existen seis lagos cráteres (maars) , con características químicas y grado de salinidad diferentes: Alchichica, Quechúlac La preciosa, Atexcaqui, Aljojuca y Tecuitlapa (Vilaclara *et al.*, 1993).

1.2 Antecedentes

Los estudios realizados por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (PICC), muestran su impacto más relevante en las zonas de clima árido y semiárido, originando cambios importantes en las variables climatológicas, desecación en algunos casos de los cuerpos de agua (lagos, humedales) y modificación del clima de forma global o regional (Bergkamp et al., 1999).

La importancia de conocer los efectos de la variabilidad climática sobre los cuerpos de agua es muy relevante, ya que el entendimiento de estos, proporciona una herramienta más para el manejo y distribución del recurso en tiempo presente y futuro. Que hoy en día, ya es un problema a nivel mundial.

En diversos países, se han llevado a cabo estudios para evaluar los efectos de la variabilidad climática sobre los Lagos; a continuación se citan algunos de estos estudios: efectos de la variabilidad climática sobre la evaporación en el Lago Sparkling (Lenters *et al.*, 2005); Evaluación del impacto del cambio climático sobre el Lago Inland (Qin *et al.*, 1998); Medición de sensibilidad del Lago de hielo al sureste de Wisconsin para variaciones climáticas y abatimientos en los lagos usando un modelo numérico (Vavrus *et al.*, 1996), entre otros. Usando métodos diferentes, pero con el mismo fin de determinar los efectos de la variabilidad climática ante un cambio climático.

En la Cuenca Libres–Oriental, de acuerdo a la clasificación de Köppen-García 2004 , los climas predominantes son: el semiárido que se distribuye en la parte central y más baja a una altitud entre 2300 y 2400 msnm, y el templado subhúmedo con lluvias en verano, el cual rodea en forma concéntrica al clima semiárido. Hacia las partes altas, el clima es de frío a muy frío.

Dado que en la zona centro de la cuenca predomina el clima semi-árido, esta expuesta a los efectos adversos de un cambio climático (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, 1992).

Los estudios limnológicos realizados por Alcocer y Lugo (2003), muestran evidencias de los efectos de la variabilidad climática a largo plazo del evento El Niño Oscilación del Sur (ENSO), sobre la dinámica del lago-cráter Alchichica. Sin embargo, en el estudio de cambio climático a corto plazo en sedimentos del lago (Caballero *et al.*, 2003), no detectaron efectos de variabilidad climática, pero en su análisis de las diatomeas, indican una disminución reciente del nivel del lago. Por otro lado, en su análisis de estratigrafía y de datos de calcinación, sugieren que en un pasado reciente (> 300 años), existió un nivel más bajo que el actual.

Desde el punto de vista hidrogeológico, se han llevado a cabo estudios en la cuenca Libres-Oriental por la CNA (Comisión Nacional del Agua) y CFE (Comisión Federal de Electricidad), para evaluar la disponibilidad de agua en el acuífero. Así, como para definir la Interacción acuífero lago-cráter (Alcalá, 2004), pero tampoco abordan el efecto de la variabilidad climática.

1.3 Objetivos

- Demostrar, con base en las variables climatológicas de precipitación, temperatura, evaporación y los eventos del Niño y La Niña, que la variabilidad climática es un factor que motiva el abatimiento del nivel de agua del lago-cráter Alchichica, en la cuenca Libres-Oriental, Puebla, y que disminuye también, la recarga del agua subterránea.
- Determinar el balance Hidrogeológico del lago-cráter Alchichica.
- Diseñar un modelo conceptual que represente la interacción del lago-cráter con el Acuífero.
- Mostrar la sensibilidad de humedales, al impacto de la variabilidad climática en la cuenca Libres-Oriental (clima semi-árido).
- Determinar periodos de sequía meteorológica para el control de extracción del agua subterránea en la región.

El acceso al área de estudio, es por varias carreteras. La carretera 140 que va de Jalapa a Puebla y que pasa a un costado del borde localizado en la parte oriental del lago-cráter Alchichica, la carretera 131 que va de Altotonga e intercepta a la 140, en la Ciudad de Perote, la carretera 136 que va de Huamantla e intercepta a la 140 en Zacatepec y la carretera 129 que va de Amozoc de Mota e intercepta a la 140 en Zacatepec. Geográficamente se localiza en las coordenadas $X = 667719.24$, $Y = 2147300.29$, a una altitud de 2330 msnm.

1.5 Metodología general

Para llevar a cabo los objetivos mencionados en la sección 1.3, se usó la siguiente metodología: (1) se determinó la evaporación en el lago-cráter Alchichica, mediante datos históricos secundarios medidos en una bandeja de evaporación tipo A de una estación climatológica cercana; (2) la sequía meteorológica, se determinó mediante datos históricos secundarios de precipitación pluvial para las estaciones climatológicas Alchichica, Zalayeta y Guadalupe Buenavista, las cuales tienen registros históricos continuos de 30 años, como lo sugiere la Organización Meteorológica Mundial; (3) se analizó y comparó la evolución de períodos de 30 años continuos de datos históricos de precipitación pluvial, temperatura y evaporación con o sin presencia de los eventos La Niña Y El Niño, esto con la finalidad de determinar los efectos de la variabilidad climática sobre las variables consideradas; (4) se calculó la evapotranspiración real y potencial por estación climatológica, aplicando el método de Turc; (5) se determinó el balance hídrico del lago-cráter, usando redes de igual elevación estática y canales de flujo; (6) Análisis comparativos (precipitación, evaporación) de tendencia, para determinar factores posibles que afectan el nivel de agua del lago-cráter Alchichica, así como la recarga local del acuífero de Tepeyahualco.

2. CUENCA LIBRES-ORIENTAL.

2.1 Geología Regional

El basamento regional está compuesto principalmente por roca caliza del Cretácico y algunas pizarras que se observan en afloramientos aislados dentro de la cuenca Libres–Oriental, como por ejemplo la Sierra de Soltepec (Yañes-García y García Duran, 1982; citados por Rodríguez *et al.*, 2002). Este basamento fue intrucionado por rocas granodioríticas de composición sienítica durante el Oligoceno y Mioceno (Yañes y García 1982; citados por Carrasco–Nuñez *et al.*, 2003). La cuenca Libres – Oriental (Figura 2.1), es una depresión limitada hacia la parte oriental por una cadena de estrato volcanes andesíticos del Cuaternario, que mencionados de norte a sur: Nauhcampaltepetl o Cofre de Perote, La Gloria, Las Cumbres y el Citlaltépec o Pico de Orizaba los cuales forman una extraordinaria topografía que divide el altiplano de la planicie costera del golfo de México. Al norte está limitada por el Cerro Xalapazquillo y la caldera de Los Húmeros. Hacia el sur, se encuentra limitada por la Sierra de Sotltepec, constituida por rocas sedimentarias del mesozoico, y al Occidente por el complejo andesítico, Cerro Grande y el estrato volcán, La Malinche (Carrasco–Nuñez, 2003).

Forma parte de los Estado de Veracruz, Puebla y Tlaxcala y está comprendida entre el polígono que forman las coordenadas: $x_1 = 694,396.36$ m, $y_1 = 2,181,212.85$ y $x_2 = 601,745.71$ m $y_2 = 2,090,692.10$ m, Y posee una extensión de 4713.69 km² (Fig. 2.1). Esta se caracteriza por su campo de volcanes monogenéticos que comprenden: (1) domos riolíticos aislados (de norte como Las águilas, Cerro Pizarro, Cerro Pinto y las Derrumbadas (Figura. 2.1), (2) conos de escoria, y de lava de composición basáltica que están localmente agrupados en forma de campos volcánicos pequeños, (3) cráteres de explosión fratomagmática o estructuras maar incluyendo anillos de toba, algunos maar sensu strictu y algunos conos de toba (Carrasco– Nuñez, 2003).

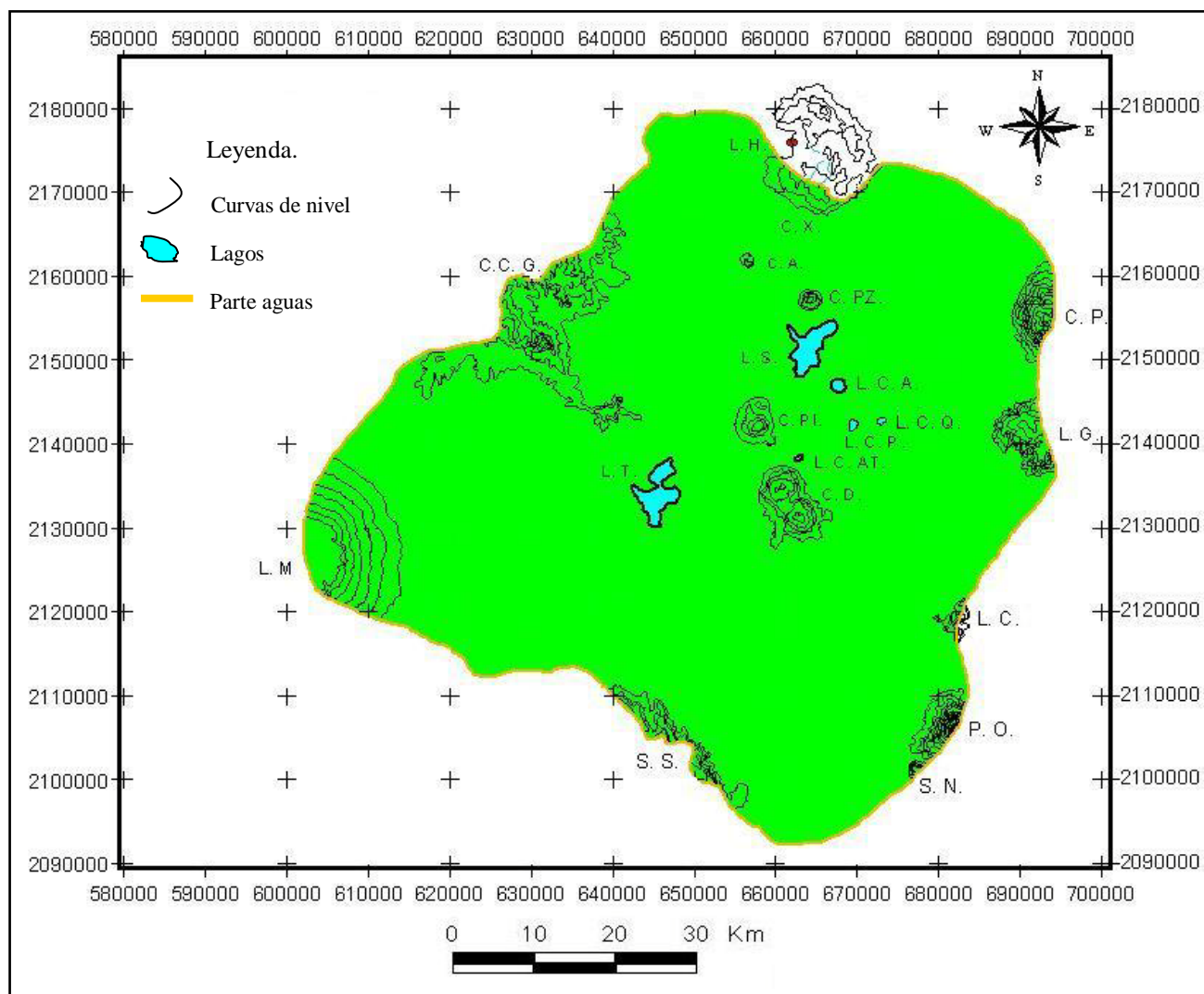


Figura 2.1. Cuenca Libres–Oriental Puebla.

El significado de la abreviaturas es el siguiente: C. X.; Cerro Xalapazquilo, C. A.; Cerro las Aguilas, C. PZ.; Cerro Pizarro, C. PI.; Cerro Pinto, C. D.; Cerro las Derrumbadas, C. C. G.; Complejo Cerro Grande, C. P.; Cofre de Perote, L. M.; La Malinche, L. S.; Lago el Salado, L. T.; Lago Totolsingo, L. C .A.; Lago-cráter Alchichica, L. C. Q.; Lago-cráter Quechulac, L. C. P.; Lago-cráter La Preciosa, L. C. AT.; Lago-cráter Atexcaqui, L G; La Gloria, L C; Las Cumbres, P. O.; Pico de Orizaba, S. N.; Sierra Negra, y S. S.; Sierra de Soltepec.

Fisiográficamente, la cuenca de Libres–Oriental se encuentra ubicada en la parte Oriental de la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 2.2), la cual es una extensa zona volcánica que atraviesa la República Mexicana de oeste a este. En esta zona Volcánica, se localizan, grandes estratovolcanes, domos riolíticos, calderas y complejos de domos andesítico–riolíticos, volcanes monogeneticos de composición basáltica, volcanes escudo de composición basáltica o basaltico-

andesítica, volcanes maar, sierras y cadenas montañosas, entre las cuales se encuentran valles intermontanos (Cano C., 2007).

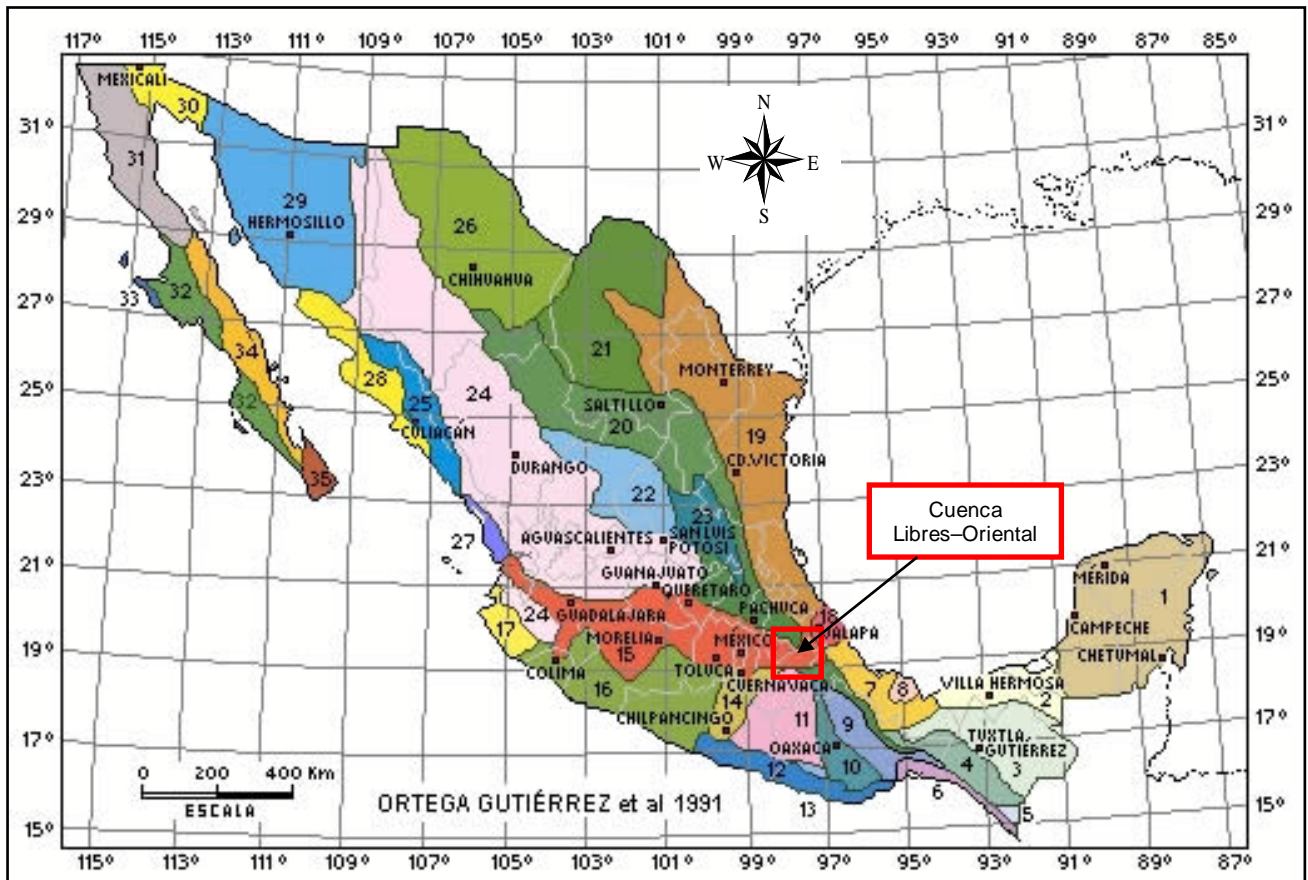


Figura 2.2. Provincias Geológicas. Ubicación fisiográfica de la cuenca Libres–Oriental (Ortega Gutierrez, 1992).

- | | |
|---|--|
| 1. Plataforma de Yucatán | 19. Miogeoclinal del Golfo de México |
| 2. Cuenca Deltáica de Tabasco | 20. Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas |
| 3. Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas | 21. Plataforma de Coahuila |
| 4. Batolito de Chiapas | 22. Zacatecana |
| 5. Macizo Igneo del Soconusco | 23. Plataforma de Valles San Luis Potosí |
| 6. Cuenca de Tehuantepec | 24. Faja Ignimbrítica Mexicana |
| 7. Cuenca Deltáica de Veracruz | 25. Cinturón Orogénico Sinaloense |
| 8. Macizo Volcánico de los Tuxtlas | 26. Chihuahuense |
| 9. Cuicateca | 27. Cuenca de Nayarit |
| 10. Zapoteca | 28. Cuenca Deltáica de Sonora Sinaloa |
| 11. Mixteca | 29. Sonorense |
| 12. Chatina | 30. Delta del Colorado |
| 13. Juchateca | 31. Batolito de Juárez San Pedro Mártir |
| 14. Plataforma de Morelos | 32. Cuenca de Vizcaíno Purísima |
| 15. Faja Volcánica Transmexicana | 33. Cinturón Orogénico de Cedros Margarita |
| 16. Complejo Orogénico de Guerrero-Colima | 34. Faja Volcánica de la Giganta |
| 17. Batolito de Jalisco | 35. Complejo Plutónico de La Paz |
| 18. Macizo Igneo de Palma Sola | |

2.2. Hidrología.

Hidrológicamente, la cuenca Libres–Oriental, se ubica dentro de las regiones hidrológicas Nos. 18 y 28, denominadas “Balsas” y “Papaloapan”, respectivamente. Igualmente, le corresponden las subregiones hidrológicas Nos. 18-A–Alto Balsas-, 28-A–ríos Actopan, La Antigua y Jamapa y 28-B río Papaloapan (INEGI, 2002).

Sus recursos hídricos principales se dividen en:

Lénticos: lagos Totolango, Alchichica, San Luís Atexcac, La Preciosa, Aljojuca, San Miguel Tecuitlapa, Quechulac, Totolcinco y Ovando, pantanos de Tepeyahualco y presas.

Lóticos: ríos permanentes e intermitentes La Caldera, Xonecuila, Quetzalapa, Piedra Grande, manantiales temporales El Carmen, Vicencio, Ojo de Agua, Lara Grajales. Un volumen considerable de aguas subterráneas (CONABIO, 2006, http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_070.html).

Las corrientes principales son el arroyo Xonecuila y el río Barranca La Malinche, que nacen en Tlaxcala y vierten sus escurrimientos en forma intermitente al lago de Totolcingo o El Carmen. El escurrimiento superficial es transitorio y escaso, ya que se trata de una cuenca cerrada, sin salidas superficiales (CNA, 2002).

Sus sedimentos lacustres están compuestos desde su base por fragmentos de roca de todos tamaños (Bloques–arena, limo y arcilla) provenientes de la erosión tan intensa a la que han estado expuestas las calizas y las rocas ígneas intrusivas y extrusivas que circundan a la cuenca. Durante la etapa de actividad volcánica se emplazaron una gran cantidad de depósitos piroclásticos cuyos productos están interestratificados con los sedimentos lacustres (SARH, 1981).

Las lagunas de aguas perenes, El Carmen y Tepeyahualco son la evidencia actual del material depositado por la actividad volcánica y que, debido al aporte a veces tan repentino y abundante del material piroclástico, no solo ocasionaron el desplazamiento de las aguas sino también su desaparición. Las lagunas mencionadas han quedado restringidas debido a los grandes espesores de material púmitico, ignimbrítico, tobas y cenizas volcánicas que provienen en gran parte de la caldera Los Húmeros (SARH, 1981).

En toda la cuenca, el nivel freático está muy cercano a la superficie y en algunos casos aflora, como sucede en dichas lagunas, debido a que tanto el nivel superior como el inferior son muy someros. La evaporación es muy alta y produce el depósito de gran cantidad de sales en la superficie. Además, como consecuencia del arreglo estratigráfico, existen en la cuenca infinidad de acuíferos confinados (SARH, 1981).

El sedimento de los lagos es de textura arenosa. En la actualidad los lagos de Tepeyahualco y El Carmen, son lagos terminales.

2.3. Climatología.

En la cuenca Libres-Oriental predomina el clima templado, subhúmedo, con lluvias en verano, a excepción de la parte central, que es semiseco, con temperatura media anual de 14° C y precipitación media anual de 590 mm, la temporada de lluvias abarca los meses de abril a octubre, siendo agosto y septiembre los más lluviosos, con valores máximos de 50 a 140 mm. Asimismo, la evaporación potencial media anual es de 1460 mm/año, mientras que la evapotranspiración potencial, es de 472 mm/año (CNA, 2002).

2.4. Lago-cráter Alchichica.

El lago-cráter Alchichica, está situado en las coordenadas 19° 24' 49.64" de Latitud Norte y 97° 24' 13.24" Longitud Oeste, dentro de la cuenca Libres–Oriental, Puebla. Presenta una forma circular (anillo de toba), con pendientes de aproximadamente 45°, profundidad total de 72 m, con temperatura en su superficie de 18.93° y de 14.60° en el fondo (SARH, 1981). Con características morfométricas que se muestran, en la Tabla 2.1. Es muy conocido debido a que la Carretera Federal 140 (El Empalme–Acatzingo–Veracruz), pasa por su borde oriental y la hace fácilmente visible. Su historia geológica se remonta a la existencia del un volcán monogenético formado por escoria y un derrame asociado, que se encuentra como testigo en la parte oeste de la laguna, constituyendo su parte más alta (SARH, 1981). Sobre la que se observa una masa y brechas de lapilli que existían antes de la formación del cráter y que la erosión, ha descubierto. Sus depósitos, en su extremo oriental, son capas de tobas grises intercaladas de ceniza suelta de lapilli y de pómez, que se ven casi horizontales o con muy débil pendiente, tanto en el interior como hacia el exterior (Ordóñez, 1905). Sus bordes muestran diferentes horizontes constituidos por ceniza fina, lapillí, fragmentos líticos, ceniza fina y líticos (en gradación normal y gradación inversa); así, como bombas volcánicas (Alcalá, 2004).

2.5. Lago-cráter La Preciosa.

Se localiza, 4 km al sureste del lago-cráter de Alchichica y muy cerca del lago-cráter Quechulac. Presenta una forma irregular, sus bordes sobresalen muy poco a la llanura; todo el contorno del lago está formado de los materiales cineríticos arrojados por la explosión. Aunque un estribo bajo de la Sierra de Techachalco casi llega a los bordes del Lago, el material acumulado impide ver las pizarras y calizas, así como las rocas intusivas que componen dicha sierra (Ordóñez, 1905). Su profundidad máxima es de 64 m, y las temperaturas presentes varían de 18.73° en la superficie a 15.24° en el fondo (SARH, 1981).

2.6. Lago-cráter Quechulac.

Está situado aproximadamente a 7 km, al sureste del lago-cráter de Alchichica, es muy somero y presenta una forma elíptica. Sus paredes interiores no exceden a los 50 metros y están compuestas por tobas grises con intercalaciones de ceniza negra suelta, lapillie y pómez, con fragmentos de caliza, pizarra, basalto y numerosos cantos rodeados de andesitas, semejantes a las de la sierra del Citlaltepeltl (Ordóñez, 1905). Tiene forma de olla, con una profundidad máxima de 44 m, con temperaturas que varían de 19.14° en superficie a 4.82° en el fondo (SARH, 1981).

Las características morfométricas de estos lagos-cráter se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características morfométricas de los lagos, Alchichica, Quechulac y La Preciosa de la cuenca Libres-Oriental (tomadas de Ramírez y Vazquez, 1988).

Lagos-cráter	Área superficial (km²)	Volumen (m³ X 10⁶)	Profundidad máxima (m)
Alchichica	1.81	69.9	64.6
Quechulac	0.50	10.9	40.0
La Preciosa	0.78	16.2	45.5

3. VARIABILIDAD CLIMÁTICA.

3.1. Antecedentes

El vulcanismo y tectónismo, en la zona, han jugado un papel fundamental en el desarrollo del paisaje, pero también, deben tomarse en cuenta los fenómenos naturales relacionados con el clima, los seres vivos y la acción humana. El clima asociado con las comunidades bióticas, ha variado sustancialmente en el espacio y tiempo geológico. Algunos cambios climáticos, se realizaron a escalas de tiempo del orden de cientos o decenas de miles de años, como es el caso de las etapas frías genéricamente denominadas glaciaciones y que se alternan con fases interglaciales, ambas con duración de decenas de miles de años. Se tiene conocimiento de que las fluctuaciones climáticas ocurren en lapsos de unos pocos miles de años, de algunos siglos e incluso de algunos decenios. En el extremo de esta escala, se encuentran fluctuaciones interanuales, por efecto de las cuales un año puede ser extremadamente seco y el siguiente marcadamente húmedo. A este respecto en las últimas décadas se ha descubierto el impacto que el fenómeno El Niño, tiene en el clima global (Villegas, 2007).

Estudios paleoclimáticos realizados en la parte del centro de México y El Mar Caribe, documentan la conjunción de dos fuentes de precipitación durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno; la del Atlántico y la del Pacífico (Bradbury, 1977). La mayor parte de información paleoambiental del centro de México procede de las cuencas lacustres (Metcalf *et al.*, 1997). Son sitios ideales para estudiar los cambios ambientales, ya que los sedimentos depositados en sus fondos registran las características del ambiente del lago y sus alrededores. Cada capa del sedimento que se deposita en el fondo de un lago es producto de una combinación de eventos climáticos y almacena parte de la historia ambiental de la zona circundante. Mediante la perforación y extracción de núcleos de sedimentos se puede tener acceso a todos los datos (Cervantes *et al.*, 1993, citado por Villegas, 2007).

El estudio de polen y diatomeas fósiles, ha proporcionado información sobre las fluctuaciones de los niveles en los lagos del centro de México, así como del ambiente de las áreas circundantes y del clima regional. El polen permite reconstruir la composición aproximada de la vegetación circundante del lago, mientras que las diatomeas dan información sobre las características del agua (temperatura, química). Las fluctuaciones ambientales observadas de una capa a otra pueden interpretarse como el resultado de cambios climáticos regionales, de movimientos tectónicos, de vulcanismo y en periodos recientes, de la acción humana. Los restos orgánicos depositados junto con los sedimentos permiten conocer la edad de las distintas capas mediante fechamientos basados en el método de Carbono – 14 (Israde et al., 2002).

La Tabla 3.1, se muestran algunos estudios paleoclimáticos realizados por distintos autores, así como también los niveles lacustres existentes con respecto al tiempo geológico. Esto da una idea de las condiciones climáticas que prevalecieron en el pasado reciente.

Tabla 3. 1. Condiciones climáticas en tiempos geológicos (tomadas de Villegas, 2007).

Tiempo Geológico (años)	Nivel Lacustre	Condiciones Climáticas	Autores
22,000	altos	frías y húmedas	(Islebe com pers., 2005).
22,000-18,000	bajos	Frías y secas	(Islebe com pers., 2005).
15,000-10,000	bajos	Secas	(Rico et al. Sin año)
11,000-8,000	bajos	Secas	(Lozano – García y Zelhuntzi – López, 1997).
8,000-6,000	altos	húmedas	(Lozano – García y Zelhuntzi – López, 1995).
6,800	altos	húmedas	(Metcalfé et al., 2000).
6,000-5,000	bajos	secas	(Metcalfé et al., 2000).
3,000	bajos	secas	(Bradbury, 2000).
3,000-2000	medios	Semi-húmedas	(Bradbury, 2000).
1,400	bajos	secas	(Israde et al., 2002).
1,000	bajos	secas	(Israde et al., 2002).
850	altos	húmedas	(Israde et al., 2002).

3.2. Fluctuaciones Climáticas.

Las fluctuaciones climáticas han cambiado significativamente con el desarrollo de las civilizaciones. A su vez, las comunidades humanas han sido un factor cada vez más importante en la formación del paisaje en los últimos 5,000 años. Son raros los espacios de la superficie terrestre que a la fecha se han librado de la influencia antropogénica, de tal modo que existen pocos paisajes realmente naturales en sentido estricto. En mayor o menor medida, casi todos muestran los efectos transformadores de la acción humana, que por consiguiente son desestabilizantes y en algunos casos destructivos (Whitmore *et al.*, 1996).

Las actividades humanas han incrementado las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y aerosoles desde la época preindustrial. Las concentraciones de los principales gases antropogénicos de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), y el ozono (O₃) troposférico, alcanzan los niveles más altos jamás registrados, durante el decenio de 1990, originado principalmente por el consumo de combustibles fósiles, la agricultura y el cambio en el uso de las tierras (PICC., 2001, <http://www.ipcc.ch/pub/ipccwg1s.pdf>).

3.3. El Niño y La Niña.

Los fenómenos El Niño y La Niña, son los ejemplos más evidentes de la variabilidad climática global y forman parte de un vasto y complejo sistema de fluctuaciones climáticas. Ambos forman parte del ciclo conocido como El Niño Oscilación del Sur (ENSO). La ocurrencia y características de El Niño han sido documentadas extensivamente (NOAA, 2009). Es bien sabido que El Niño es capaz de modificar los patrones normales del clima alrededor del mundo. El Niño y su contra parte, La Niña, modifican también los patrones de precipitación en México. En general en el noroeste de México durante las estaciones invernales, El Niño incrementa la precipitación y La Niña, la disminuye, mientras que el proceso se invierte en el Istmo de Tehuantepec. Por otro lado, en verano El Niño,

produce un déficit de precipitación. Durante los años La Niña, las condiciones del clima en México regresan a la normal e incluso pueden resultar en una precipitación por encima de la media (Magaña *et al.*, 2002).

La Niña, es la fase negativa del fenómeno El Niño, sus características son el enfriamiento de la temperatura de la superficie del océano pacífico ecuatorial, así como cambios en la dirección y velocidad de los vientos en la zona intertropical debido a variaciones de la presión atmosférica. A pesar de la incertidumbre que se tiene, desde que se inició el fenómeno de La Niña, los especialistas en esta materia y los registros que se llevan de la temperatura superficial del mar, indican que los períodos fríos se dieron en los años: 1904, 1908, 1910, 1916, 1924, 1928, 1938, 1950, 1955, 1964, 1970, 1973, 1975, 1988, 1995 y 1998. Es decir, no es un fenómeno reciente, se le conocía como “El Viejo” o el “AntiNiño”, pero el término La Niña es el que ha prevalecido con el tiempo (Rincón *et al.*, 2008).

El Niño, se caracteriza por temperaturas oceánicas inusualmente calientes sobre el Pacífico Ecuatorial. El ciclo tiene un período medio de duración, aproximadamente de cuatro años; sin embargo, en el registro histórico los periodos han variado, entre 2 y 7 años (NOAA, 2007).

Durante un episodio de La Niña, es típico observar condiciones más secas respecto a lo normal sobre el Océano Pacífico ecuatorial central. Esto se debe a un debilitamiento de la corriente en chorro durante los meses de diciembre a febrero, así como al fortalecimiento de los sistemas monzónicos en Australia sudeste de Asia, América del sur, Centroamérica y África (NOAA, 2007).

En las primeras fases de los episodios de La Niña, la termoclina (isoterma de 20° C, que separa las capas superficiales del océano de las más profundas) se localiza a poca profundidad respecto a lo normal, principalmente en los sectores del Océano Pacífico Central y frente a las costas de América del Sur. Durante la fase madura, la termoclina gradualmente se profundiza en la parte occidental del Océano Pacífico y en el sector Central, en las últimas fases de los episodios (NOAA, 2007).

Como resultado de los cambios indicados en el párrafo anterior, en los sectores occidental y central del océano Pacífico Ecuatorial las temperaturas subsuperficiales del mar se vuelven gradualmente más calientes que lo normal. Esto genera condiciones muy favorables para una transición a un estado neutral o episodio de El Niño. Los factores críticos que determinan dicha transición son los vientos del este de nivel bajo, y la estructura de la temperatura oceánica subsuperficial (NOAA, 2007).

En las últimas fases de los episodios El Niño, la profundidad de la termoclina y de la temperatura subsuperficial del mar llega a ser inferior a lo normal en el Océano Pacífico ecuatorial. Esta evolución indica un vaciamiento del contenido de calor hacia la parte superior del océano, y a la vez son los preparativos para una fase de transición hacia un estado neutral, o hacia un episodio de La Niña. El carácter de esta transición depende una vez más de la variabilidad en la intensidad de los vientos del este de nivel bajo y de la estructura de la temperatura oceánica subsuperficial (NOAA, 2007).

Es importante señalar que no necesariamente sucede un episodio de La Niña cuando finaliza el de El Niño, en los quince años recientes apenas en tres ocasiones La Niña ocurrió después de El Niño. En 1982-1983 éste fue seguido por La Niña (1984-1985), un Niño menos intenso en 1986-1987 fue seguido por otro muy fuerte de La Niña en 1988-1989 y un Niño en 1991-1994 fue seguido por La Niña en 1995-1996 (Rincón *et al.*, 2008).

También en algunas ocasiones episodios cálidos se transformaron en episodios fríos en la estación siguiente, tal como sucedió en 1969, 1972 y 1987. En cada uno de estos episodios las condiciones frías completamente establecidas se desarrollaron hacia finales de julio. Condiciones de un episodio La Niña moderado, se desarrollaron a continuación de El Niño 1982–1983, que fue el evento cálido más parecido a El Niño de 1997–1998. En este último caso, las condiciones de La Niña se desarrollaron en el otoño (septiembre - noviembre) de 1983 (NOAA, 2007).

Generalmente, los eventos de El Niño son más frecuentes que los eventos de La Niña. Por ejemplo, durante el período 1950 – 2008 (58 años) y según los registros de NOAA, han ocurrido un total de 13 eventos del fenómeno El Niño; contra 11 eventos de La Niña.

En la Tabla (3.2), se muestran los eventos El Niño y La Niña transcurridos durante el periodo (1950–2008).

Tabla 3.2. Ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña, desde 1950 a 2008 (tomados de la NOAA, 2009).

El Niño	La Niña
Años	Años
1951 - 1952	1950
1957 - 1958	1954
1965 - 1966	1956
1969	1964
1972	1970 - 1971
1977	1973 - 1974
1982 - 1983	1975 - 1976
1986 - 1987	1988 - 1989
1991 - 1992	1999 - 2000
1997- 1998	2000 - 2001
2002 - 2003	2007 - 2008
2004 - 2005	
2006 - 2007	

3.4. Causas y Carecteristicas del fenómeno La Niña.

1. Disminución de la presión a nivel del mar en la región de Oceanía y aumento de la misma, en el Pacífico.
2. El aumento en la diferencia de presión entre la costa pacífica de América del Sur y Oceanía, hace que los vientos alisios se intensifiquen y que las aguas, sean más frías a lo largo del Pacífico.
3. Los vientos alisios, anormalmente intensos ejercen mayor efecto de arrastre sobre la superficie del océano, aumentando la diferencia, del nivel del mar entre

los extremos del Pacífico ecuatorial. Como consecuencia, el nivel del mar disminuye en las costas de los países que conforman la América del Sur, especialmente en Colombia, Ecuador, Perú, norte de Chile, y a su vez aumenta, en Oceanía.

4. La aparición de aguas frías, a lo largo del Ecuador y la disminución de la temperatura superficial, por debajo del valor normal, indican que se está en presencia del fenómeno de La Niña.

5. Durante este evento las aguas calientes en el Pacífico ecuatorial, se concentran en la región junto a Oceanía desarrollándose más nubosidad y precipitación (Rincón *et al.*, 2008).

Fases del fenómeno La Niña.

El término La Niña recién aparece en la literatura científica en la década de los ochenta, cuando los oceanógrafos empezaron a utilizarlo para referirse a un periodo frío, en contraposición al periodo caliente (Philander y Rasmusson, 1985).

De acuerdo a la NOAA, el fenómeno se divide en cuatro fases.

1. El preludio al fenómeno La Niña, es la terminación del Niño (Oscilación del Sur)
2. El inicio del fenómeno La Niña, se caracteriza por:
 - Un fortalecimiento de los vientos alisios que confluyen en la zona de convergencia intertropical y un desplazamiento, mas temprano de esta hacia el norte de su posición habitual.
 - Un aumento de la convección en el océano pacifico, al oeste del meridiano de 180°, donde la temperatura del agua superficial del océano incrementa su valor habitual (28 y 29°C)

3. El desarrollo del fenómeno, se identifica por:

- Un debilitamiento de la corriente contra–ecuatorial, lo que ocasiona que la influencia de las aguas cálidas provenientes de las costas asiáticas, afecten poco las aguas del Pacífico de América.
- Una ampliación de los afloramientos marinos producidos como consecuencia de la intensificación de los vientos alisios.
- El fortalecimiento de la corriente ecuatorial del sur, especialmente cerca del ecuador, arrastrando aguas frías que disminuyen las temperaturas del Pacífico tropical oriental y central.
- Una mayor cercanía de la termoclina a la superficie del mar, en el Pacífico tropical, lo que favorece la permanencia de especies marinas que encuentran sus alimentos durante períodos largos.

4. La maduración, es el final del evento La Niña y ocurre después de que la intensidad de los vientos alisios ha regresado a su estado normal.

Se ha observado que en el periodo seco (noviembre-abril) la precipitación es superior a la histórica y que la precipitación anual supera a las normas históricas y las registradas, en los años El Niño (NOAA, 2007).

4. EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN.

4.1. Evaporación.

La evaporación es el proceso físico por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (habría que añadir la sublimación—sólido a vapor—desde la nieve y el hielo). El agua se evapora de una gran variedad de superficies, tales como océanos, lagos, ríos, caminos, suelos, zonas pantanosas y de la vegetación mojada (Allen et al., 2006).

La evaporación, es consecuencia del poder evaporante de la atmósfera, que a su vez depende de los siguientes factores (Custodio *et al.*, 1996):

- Radiación solar
- Temperatura
- Humedad: Menos humedad \implies mayor evaporación
- Presión atmosférica (y la altitud en relación con ella): a menos presión (y/o mayor altitud) \implies más evaporación
- Viento: mas viento \implies más evaporación

En la evaporación desde lámina libre de agua influye:

- El poder evaporante de la atmósfera
- La salinidad del agua (inversamente)
- La temperatura del agua

La evaporación en un suelo desnudo, depende de:

- El poder evaporante de la atmósfera
- El tipo de suelo (textura, estructura, etc.)
- El grado de humedad del suelo

Finalmente la transpiración está en función de:

- El poder evaporante de la atmósfera
- El grado de humedad del suelo

- El tipo de cubierta vegetal
- Variaciones estacionales: en un cultivo, del desarrollo de las plantas. En zonas de bosque de hoja caduca, la caída de la hoja, paraliza la transpiración
- Variaciones interanuales: en áreas de bosque la evapotranspiración (ET) aumenta, con el desarrollo de los árboles.

El poder evaporante de la atmósfera se puede medir con un equipo básico, conocido como tanque de evaporación. Este es un recipiente de tamaño estándar (Tanque de “clase A” = 1.20 m de diámetro, y 25 cm de profundidad), con un tornillo micrométrico para medir el nivel del agua con precisión (Torres, 1995).

Las medidas de un tanque de evaporación se han relacionado con la evapotranspiración, de referencia (ET_o). Estableciéndose la relación:

$$ET_o \text{ (mm/día)} = \text{Evaporación en el tanque (mm/día)} \times \text{coeficiente del tanque. (4.1)}$$

El coeficiente del tanque puede variar mucho; depende del tipo de tanque, de la velocidad del viento y del medio ambiente, que rodea al tanque. Sin embargo, generalmente oscila entre 0.60 y 0.85, reduciéndose de, 10 – 20 por ciento, para climas áridos y semi-áridos (Allen *et al.*, 2006).

También se establece un coeficiente del tanque para comparar las lecturas del tanque con la evaporación, en grandes masas de agua, por ejemplo: lagos o embalses. En este caso, para el coeficiente corrector suele adoptarse 0.70; es decir, la evaporación de un lago será igual a la del tanque multiplicada por 0.70. Expresada en forma matemática (Allen *et al.* 2006), se tiene que:

$$\text{Evaporación del Lago} = (\text{Evaporación de Tanque}) \times (0.70) \times (\text{Área del espejo del lago}) \quad (4.2)$$

Los tanques de evaporación, a veces se instalan flotantes sobre balsas en lagos y embalses, donde el estudio de la evaporación tiene un gran interés, o

semienterrados, de modo que la superficie del agua quede próxima a la superficie del suelo. Aunque el tanque de evaporación es un equipo muy sencillo, se utilizan con más frecuencia los evaporímetros de papel poroso o Piche. La equivalencia aproximada es la siguiente:

$$\text{Evaporación tanque} = \text{Evaporación Piche} \times 0.80. \quad (4.3)$$

4.2. Métodos para estimar la evaporación.

Otros métodos para estimar la evaporación son los siguientes:

- Medición (Young, 1947).
- Combinación (Penman, 1948).
- Transferencia de masa (Harbeck, 1962).
- Balance de Energía (Fritschen, 1966).
- Balance de agua (Guitjens, 1982).
- Empíricos (Kohler et al., 1995).
- Correlación turbulenta (Arya, 2001).

En los estudios de la evaporación en lagos, se han usado gran variedad de métodos. Estos incluyen, entre otros, el de transferencia de masa, balance de agua supuesta, correlación turbulenta y el método de balance de energía supuesta, (Winter, 1981; Winter *et al.*, 1995). De los cuales, las técnicas de balance de energía y de correlación turbulenta son consideradas como las más exactas, no obstante su alto costo (Winter, 1981).

En el presente estudio, la evaporación sobre el lago-cráter Alchichica, se determinó usando la información obtenida del estanque de evaporación tipo "A", situado al pie del Lago.

4.3. Evapotranspiración.

La evapotranspiración (ET) es la consideración conjunta de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración (Custodio *et al.*, 1996).

La transpiración, es el fenómeno biológico por el cual las plantas transfieren agua a la atmósfera. Toman agua del suelo a través de sus raíces, una pequeña parte para su crecimiento y el resto lo transpiran (Sanchez, 2006).

Como son difíciles de medir por separado, y además, en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera sea del modo que sea, se consideran conjuntamente bajo el concepto mixto de ET.

4.4. Evapotranspiración real y potencial.

La Evapotranspiración Potencial (ET_P), es la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas (Thornthwaite, 1948).

Por el contrario, la Evapotranspiración Real (ET_R), es la que se produce realmente en las condiciones existentes, en cada caso.

Por lo que, $ET_R \leq ET_P$ y serán iguales siempre que la humedad del suelo sea óptima y se presente, un buen desarrollo vegetal.

Existen una variedad de modelos matemáticos que permiten estimar la evapotranspiración potencial (ET_P), con una aproximación aceptable para muchos estudios hidrológicos. Por lo regular, con estos modelos se calcula la (ET_P) mes a mes para datos promedios mensuales, de una serie de años. Así, con la ET_P y las precipitaciones mensuales, se realiza un balance del agua en el suelo. Con

estos datos se obtiene la evapotranspiración real (ET_R), el déficit ($ET_P - ET_R$) y los excedentes (agua que no puede ser retenida en el suelo y se incorpora a la escorrentía superficial o subterránea) para cada mes del año (Sanchez, 2006).

Algunos de estos modelos matemáticos se resumen en la Tabla 4.1., así como también los parámetros, necesarios para su aplicación.

Tabla 4.1. Modelos para calcular la evapotranspiración (tomados de Sanchez, 2006).

Modelos	Medidas necesarias	Otros datos
Thornthwaite (1948)	Temperatura.	Con la latitud, por medio de una tabla se obtiene el número teórico de horas de sol.
Penman (1948)	Temperatura Horas reales de sol Velocidad de viento Humedad relativa.	Por tablas se obtienen los de mas parámetros necesarios.
Blanney–Criddle (1950)	Temperatura.	Tablas de número teórico de horas de sol Coeficiente que depende del cultivo
Turc (1954)	Temperatura Horas reales de sol.	De las horas de sol se obtiene la radiación global incidente ($cal/cm^2/día$) con una formula
Jensen–Haise (1963)	Temperatura Altitud Radiación solar.	Tablas de número teórico de horas de sol La radiación solar se puede estimar.
Hargreaves (1974)	Temperatura Radiación solar.	La radiación solar se puede estimar con temperaturas. Máximas y mínimas diarias.

5. BALANCE HÍDRICO

5.1. Forma general de la ecuación del Balance hídrico.

El estudio del balance hídrico, en hidrología, se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, conocido como ecuación de continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre la entrada y salida estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.

En general, la técnica del balance hídrico implica mediciones de almacenamiento y flujo del agua. Sin embargo, algunas mediciones se eliminan en función del volumen y período de tiempo utilizados para el cálculo del balance (Custodio *et al.*, 1982).

La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona o cuenca natural (tal como la cuenca de un río) o cualquier masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada en la zona o masa de agua. Las entradas en la ecuación del balance hídrico comprenden la precipitación (P), en forma de lluvia o nieve recibida en la superficie del suelo, y las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera (I_S e I_G). Las salidas, en la ecuación, incluyen la evaporación (E_V), desde la superficie de la masa de agua y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada (O_S y O_G), así como la evapotranspiración potencial (ET_P). Cuando las entradas superan a las salidas, el volumen de agua almacenada (ΔS) aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación, y la ecuación del balance deberá incluir, por tanto, un término residual o de diferencia (v). Así, la ecuación del balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, vendrá representado por la siguiente ecuación (UNESCO, 1982):

$$P + I_S + I_G - E_V - ET_P - O_S - O_G - \Delta S - \nu = 0. \quad (5.1)$$

En donde:

P = Precipitación (m^3/s).

I_S = Flujo superficial (m^3/s).

I_G = Flujo subterráneo (m^3/s).

E_V = Evaporación (m^3/s).

ET_P = Evapotranspiración ($m/año$).

O_S = Flujo superficial (m^3/s).

O_G = Flujo subterráneo (m^3/s).

ΔS = volumen de agua almacenado (diferencia entre el flujo de entrada y el de salida).

ν = término residual (errores de medición y estimación).

La ecuación (5.1) puede simplificarse o hacerse más compleja, dependiendo de los datos disponibles, del objeto del cálculo, del tipo de masa de agua (cuenca de un río, lago o embalse, etc.), de las dimensiones de la masa de agua, de sus propiedades hidrográficas e hidrológicas, de la duración del balance, y de la fase del régimen hidrológico (crecida, baja crecida) para el cual se calcula el balance hídrico. Por ejemplo, en la determinación de los balances hídricos para intervalos de tiempo cortos, el incremento o variación del volumen total de agua almacenada (ΔS) en una cuenca pequeña, comprenderá la variación de la humedad almacenada en el suelo (ΔM), en los acuíferos (ΔG), en los lagos y embalses (ΔS_L), en los canales derivados del río (ΔS_{CR}), en los glaciares (ΔS_{Gl}) y en la cubierta o manto de nieve (ΔS_{Sn}). Para este caso, la ecuación del balance hídrico tiene por expresión:

$$P + I_S + I_G - E_V - ET_P - O_S - O_G - \Delta M - \Delta G - \Delta S_L - \Delta S_{CR} - \Delta S_{Gl} - \Delta S_{Sn} - \nu = 0. \quad (5.2)$$

En donde I_s , representa la derivación neta o entrada de agua superficial procedente de otras cuencas.

En cuencas grandes, I_G y O_G son pequeños comparados con otros términos y por lo tanto, sus valores son despreciables; así, por ejemplo, el intercambio de aguas subterráneas con cuencas vecinas, se considera igual a cero (*Custodio et al.*, 1983).

En una cuenca, con un parteaguas bien definido, las aportaciones superficiales son prácticamente insignificantes (suponiendo que no haya trasvases artificiales desde otras cuencas) y, por lo tanto, I_s , no figura en la ecuación del balance para una cuenca de un río. La ecuación de balance, queda como sigue: (*Custodio et al.*, 1983)

$$P - E_v - ET_p - O_s - \Delta S - v = 0. \quad (5.3)$$

En donde O_s , representa la descarga del río desde la cuenca y ET_p , la evapotranspiración.

5.2. Balance hídrico para intervalos de tiempo diferentes.

El balance hídrico se puede calcular para cualquier intervalo de tiempo, pero deberá hacerse una distinción entre balances medios y balances para períodos determinados (año, una estación, un mes o un número de días), llamados algunas veces corrientes, comunes o balances operacionales (*Custodio et al.*, 1983).

Los balances hídricos, para valores medios, se calculan para un ciclo anual (año calendario o año hidrológico), sin embargo, también pueden hacerse para cualquier estación o mes. Los periodos recomendados para realizar un balance hídrico, son del orden de 30 años (UNESCO, 1982).

La determinación del balance hídrico para un año medio es el caso más simple, ya que se puede despreciar la variación del volumen de agua almacenada en la cuenca (ΔS), que es difícil de medir y calcular. Para períodos largos los incrementos anuales del agua almacenada (positivos y negativos), tienden a equilibrarse y su valor neto al final, puede considerarse igual a cero. Sin embargo, el término ΔS , deberá también tenerse en cuenta en la determinación de balances medios por estaciones o meses (UNESCO, 1982).

La situación contraria ocurre cuando se calculan los balances hídricos para períodos cortos, para los cuales $\Delta S \neq 0$. Cuanto más corto es el intervalo de tiempo, más precisas deberán ser las medidas y la determinación de los componentes en el balance hídrico, y más subdivididos estarán los valores de ΔS y de otros elementos. Esto da como resultado una ecuación del balance compleja, que es difícil de ajustar aceptablemente (*Custodio et al.*, 1983).

5.3. Balance hídrico para Masas de agua de Diferentes dimensiones.

El balance hídrico puede calcularse para masas de agua de cualquier tamaño, pero la complejidad del cálculo depende fundamentalmente de la extensión del área estudiada.

Una cuenca de un río es la única zona natural para la cual las determinaciones a gran escala del balance hídrico pueden simplificarse, ya que la exactitud del cálculo aumenta en función de las dimensiones de la cuenca. Cuanto más pequeña es la superficie de la cuenca, más complicado es su balance, puesto que es más difícil estimar componentes secundarios, tales como intercambio de aguas subterráneas con cuencas adyacentes, almacenamiento de agua, en lagos, embalses, pantanos, marismas y glaciares, así como la dinámica del balance hídrico de bosques y zonas regables. El efecto de estos factores decrece gradualmente al aumentar el área de la cuenca y puede llegar a no considerarse (UNESCO, 1982).

La complejidad para determinar el balance hídrico de lagos, embalses, marismas o zonas pantanosas, cuencas de aguas subterráneas y cuencas de glaciares de montaña, aumenta con el área, debido a la dificultad de realizar mediciones precisas y exactas y calcular los numerosos e importantes componentes del balance hídrico en grandes masas de agua, tales como flujo lateral y variaciones del volumen de agua almacenada en grandes lagos y embalses, precipitación sobre la superficie del agua, etc. (UNESCO, 1928).

5.4. Cierre de la ecuación del Balance hídrico.

Cuando sea posible, para cerrar la ecuación del balance hídrico es esencial medir o calcular todos los elementos del balance mediante el uso de métodos independientes. Las medidas y determinaciones de los elementos del balance hídrico siempre tienen errores, debido a las limitaciones tecnológicas. La ecuación del balance hídrico, por lo tanto, generalmente no establece un balance exacto, aunque todos sus componentes se midan y calculen por métodos independientes. La inexactitud está representada en la ecuación por el término residual, ν , que incluye los errores en la determinación de los componentes considerados y los valores de los componentes que no se han tomado en cuenta en la ecuación utilizada. Un valor bajo de (ν) indica un ajuste aceptable de la mayoría de los componentes del balance (UNESCO, 1982).

Si resulta imposible obtener el valor de un componente por medida directa o cálculo, se podrá evaluar como un término residual en la ecuación del balance. En este caso, el término incluye la diferencia del balance y, por lo tanto, contiene un error desconocido, que podrá ser aún más grande que el valor del componente. Lo mismo sucede cuando los valores medidos de un componente se utilizan para estimar los valores de otro componente, por medio de fórmulas empíricas o semiempíricas. El valor así estimado, incluirá los errores debidos a las imperfecciones de la fórmula y los de medida; por lo tanto, el error total es nuevamente desconocido (UNESCO, 1982).

5.5. Principales componentes del Balance hídrico.

5.5.1. Datos básicos.

Los datos de precipitación y caudal son básicos para el cálculo de los componentes del balance hídrico de las cuencas fluviales para períodos largos. Estos datos, suelen publicarse en memorias anuales, tanto hidrológicas como meteorológicas, boletines, etc., (Custodio et al., 1983).

Para calcular el balance hídrico anual, estacional o mensual, es necesario tener datos sobre las variaciones del volumen de agua almacenada en la cuenca. Estos se obtienen por mediciones de la nieve, observaciones de la humedad del suelo, fluctuaciones del nivel del agua en los lagos y en los pozos (Custodio et al., 1983).

Para calcular el balance hídrico de pequeñas zonas con características especiales (cuencas de glaciares de montaña, grandes zonas boscosas, tierras bajo riego, etc.), es necesario, en la mayoría de los casos, organizar un programa especial de observaciones, por ejemplo, observaciones de deshielo de glaciares (o deglaciación), intercepción de la precipitación, humedad del suelo, etc., (UNESCO, 1982).

Para calcular la evapotranspiración, son necesarios datos de evaporación de estanque clase "A" y datos meteorológicos sobre temperatura, humedad, viento, nubosidad y radiación (UNESCO, 1982), para luego así, elegir el método adecuado (Blaney–Criddle, Penman, Turc, Thornthwaite, etc.), dependiendo del tipo de clima, que aplique a la región de estudio.

5.5.2. Mapas.

Cuando no existen o hay, muy pocos datos sobre precipitación, caudal o evaporación en una cuenca de un río, pueden ser útiles mapas regionales de valores medios de estos elementos (Nordenson, 1968). Con la ayuda de estos mapas de isolíneas es posible determinar, los valores medios de precipitación, escorrentía y evaporación usando la computadora y algún software (Sistema de Información Geográfica).

6. PROCESAMIENTO DE DATOS.

6.1. Introducción.

Los datos usados en el presente estudio, son tanto primarios, como secundarios. Los datos primarios son aquellos que se obtienen por mediciones directas en campo, durante el desarrollo del estudio y los datos de tipo secundario, son aquellos que se obtienen de la bibliografía o de alguna base de datos. Por ejemplo, los de la base de CLICOM (1999).

La información fue procesada, para determinar la información necesaria y requerida, sobre datos:

- Climatológicos (temperatura, precipitación, evaporación y evapotranspiración real (ET_R) y potencial (ET_P))
- Área del lago-cráter
- Altitud y nivel estático,

que posteriormente, se usaron en el desarrollo de este estudio.

Cabe mencionar, que los métodos más usados para estimar la evaporación en lagos (cap. 3, sección 3.2) son el de energía supuesta y el de correlación turbulenta. Sin embargo, por falta de la información necesaria para usar alguno de estos dos métodos, en este estudio se usó la información climatológica, disponible, en las estaciones climatológicas Alchichica, Zalayeta y Guadalupe Buenavista. La cual consiste, en datos de evaporación tomados de un evaporímetro de tipo clase "A".

6.2. Datos climatológicos.

Con las estaciones climatológicas, ubicadas sobre la región en la que se localiza el área de estudio; se obtuvieron 30 años continuos de información climatológica, Alchichica, Guadalupe Buena vista y Zalayeta (Apéndice I, Tablas 1, 2 y 3), de la base de datos CLICOM (datos de tipo secundario), para calcular los promedios anuales de las variables climatológicas temperatura, precipitación, evaporación y evapotranspiración (Apéndice I, Tablas de 4–9), representativos de las condiciones climáticas del área de estudio (Capítulo 6., Figura 1.6.5), tal como se indica en la Guía de Practicas Climatologicas de la Organización Meteorológica Mundial (WMO – No. 100, 2007).

6.3. Área del lago–cráter.

Para calcular las áreas (lago-cráter Alchichica, Figura 6.1), se usaron cuatro fotos aéreas y una ortofoto, para corregirlas (Apéndice V), y así medir las áreas correspondientes al año en el cual fueron tomadas, cada una (Tabla 6.1), con ayuda del Software ArcView Gis versión 3.2. Posteriormente con ayuda del Software, Estadística versión 7, se graficaron los resultados (Figura 6.2) y con ayuda de la ecuación resultante, se obtuvo la gráfica de áreas estimadas de 1965 hasta el año 2010 (Tabla 1. Apéndice V), de las cuales se usaron los valores de las áreas correspondientes a los años 1996, 2004, 2010, en el cálculo del balance hidrogeológico para el lago–cráter Alchichica.

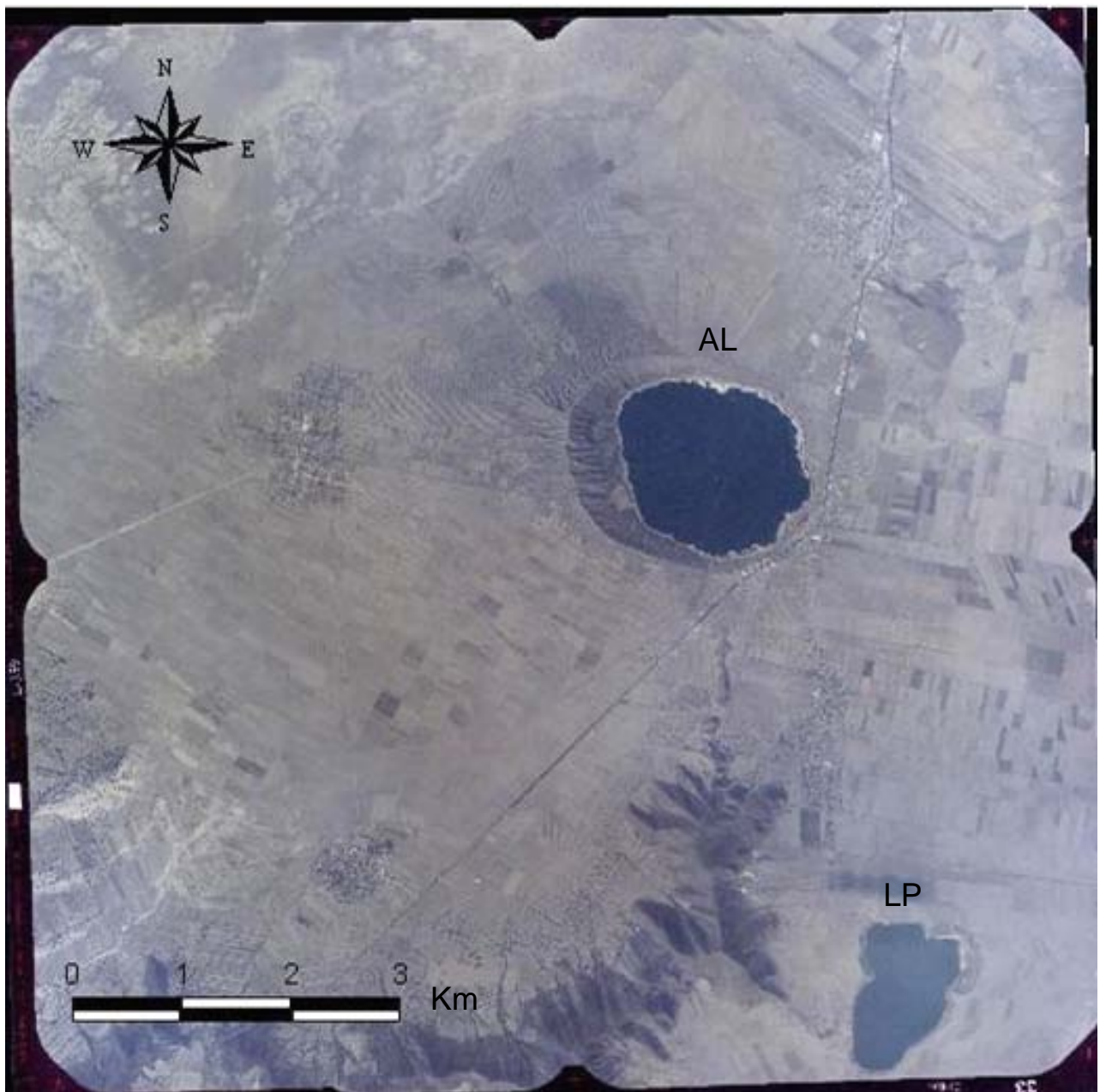


Figura 6.1. FOTO AEREA 2. INEGI SINFA, 22-FEBRERO-2006 ZONA E14-B LINEA 359.

Lagos- cráter: AL; Alchichica; LP; La Preciosa.

Tabla 6.1. Áreas del lago-cráter Alchichica y años correspondientes.

Lago-cráter Alchichica		
Año	Área total del Cráter	Área, lago-cráter
	m²	m²
1975	3,615,157.48	2,323,000
1995		2,176,000
2006		2,146,000

En la gráfica de la figura 6.2., se muestra la variación del espejo de agua a través de tiempo, del lago-cráter. Se ajusto una función polinomial usando el programa Estadística, Versión 7, para determinar este proceso ($\text{Área} = 6,0439\text{E}8 - 5,9936\text{E}5*t + 149,1202*t^2$).

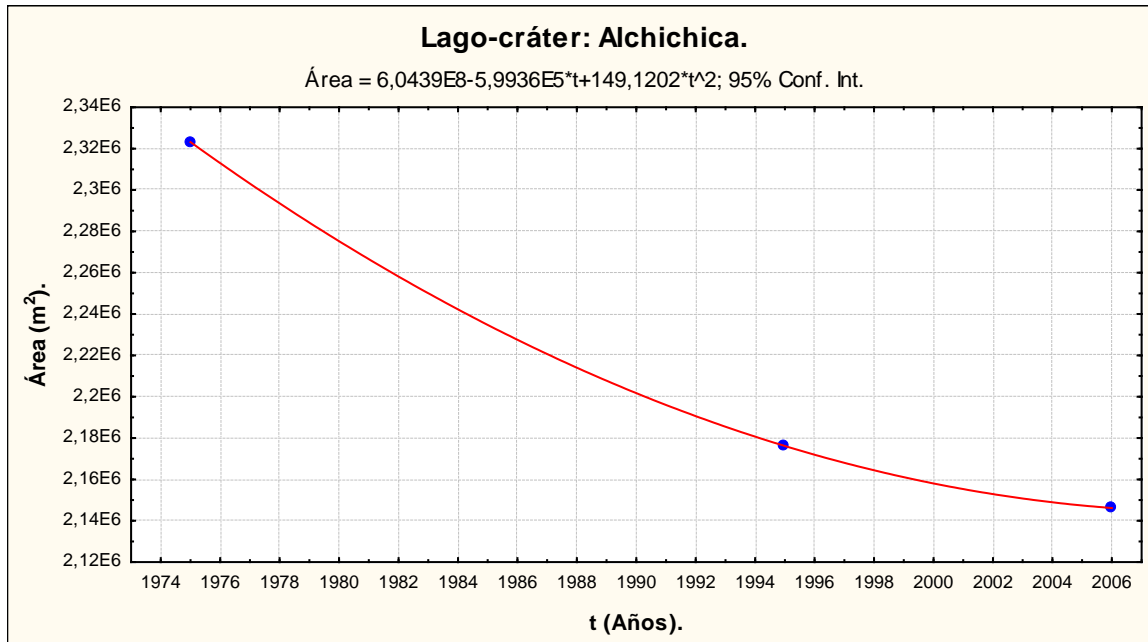


Figura 6.2. Grafica de tendencia del área del espejo del lago-cráter Alchichica.

La pérdida de área del espejo de agua, se puede atribuir al impacto de los efectos de la variabilidad climática (El Niño), la cual provoca una disminución en la precipitación pluvial y un incremento, en la temperatura, reflejándose en un incremento en la variable de evaporación. Estos efectos climáticos impactan sobre los cuerpos de agua, provocando abatimiento en sus niveles y como consecuencia, una reducción del área del espejo de agua de los mismos.

6.4. Altitud y Nivel estático.

Como no se contaba con datos de altitud de cada uno de los aprovechamientos usados por SOAPAP en su estudio (Tabla 1, Apéndice III), se usó el programa gratuito, GoogleHarthwin, para determinar la altitud de cada uno de los aprovechamientos. Posteriormente, se seleccionaron 40 aprovechamientos que integran la red de flujo (Figura 6.3., Tabla 2), de los 122 (Apéndices III y IV), censados y visitados en la región de Tepeyahualco.

Para determinar la elevación media del nivel estático del lago-cráter (msnm), se promedió la información de cuatro puntos ($R_1 = 2317.59$, $R_2 = 2317.52$, $R_3 = 2317.56$, y $R_4 = 2317.53$), distribuidos alrededor del Lago y referenciados al nivel del mismo (Alcalá, 2004), y se tiene como resultado, 2317.55 msnm.

El abatimiento del nivel estático del lago-cráter estimado en campo es de 4.5 m, en cuarenta años (Alcalá, 2004), lo que arroja, una tasa anual de 0.1125 m.

Dado que el aforo de los aprovechamientos, realizado por SOAPAP fue en 1996, se multiplicó por 9 años a la tasa anual, obteniéndose 1.0125 m, cantidad que se sumó, a la elevación media del nivel estático del lago, para obtener el nivel estático (2318.563 msnm), correspondiente al año de 1996. Esta altura se restó a los niveles estáticos de los pozos 14 y 23, (Tabla 2., Apéndice III.), que se encuentran alineados, a los canales de la red de flujo (Figura 6.3). Con esto se obtiene el espesor saturado que permite calcular el flujo subterráneo, que aporta el acuífero al lago, tomando en cuenta los postulados propuestos por Llamas y Custodio (1983) (Apéndice VI), para determinar la línea teórica de la interfase salina.

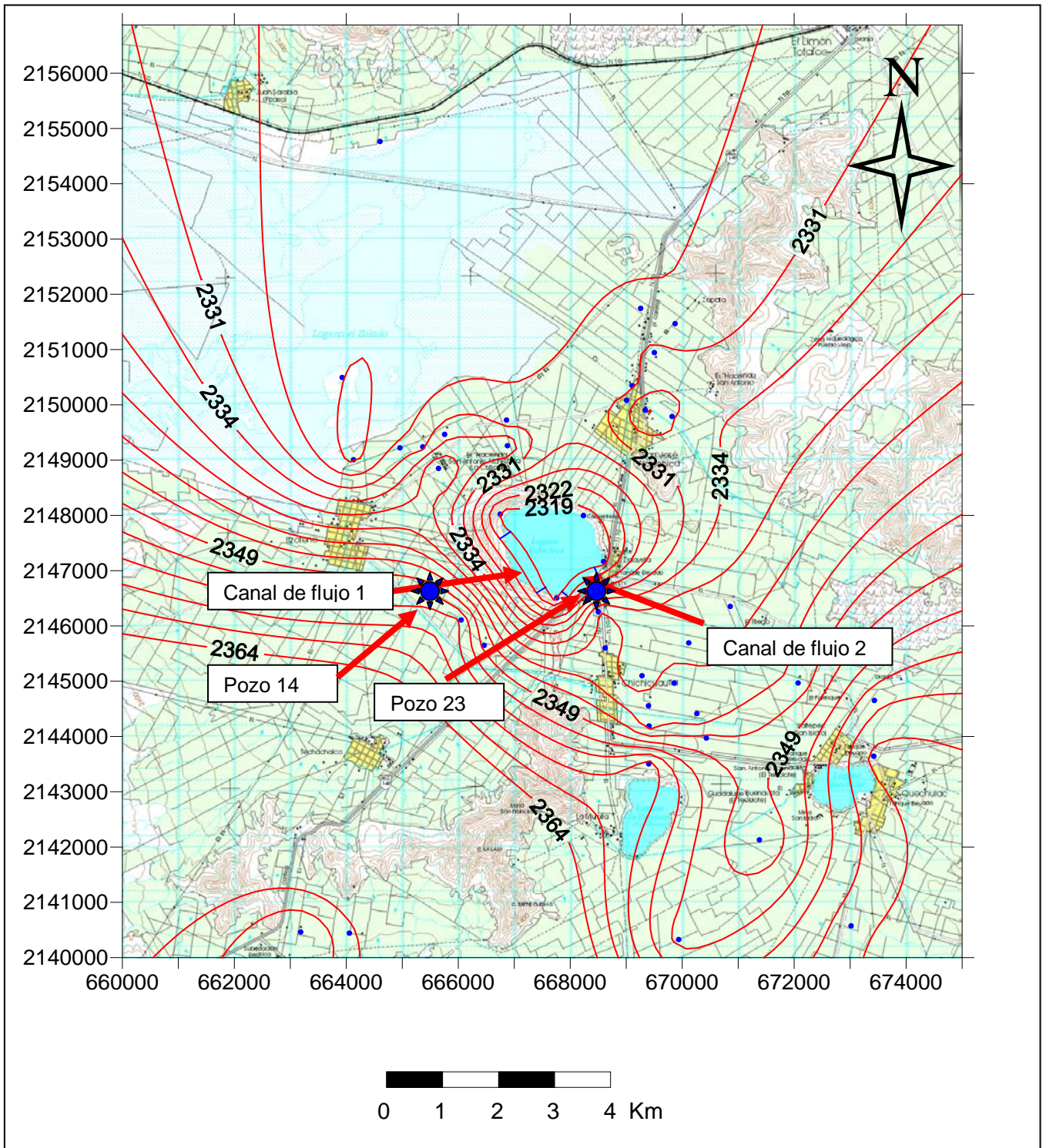


Figura 6.3. Representación de la elevación del nivel estático (msnm) y canales de flujo, para el año 1996.

7. METODOLOGIA Y RESULTADOS.

7.1. Introducción.

El procedimiento requerido para mostrar el impacto de la variabilidad climática, en el área de estudio, es el siguiente:

- Verificar los efectos originados por la variabilidad.
- Verificar el efecto de la sequía meteorológica.
- Calcular la evapotranspiración para aplicar en el balance hídrico.
- Realizar el balance Hidrogeológico del lago-cráter Alchichica, para verificar si existe abatimiento, sobre su nivel estático.
- Analizar la tendencia de precipitación y evaporación, para determinar si existe un incremento o déficit, de las mismas, en el periodo considerado.
- Proponer un modelo conceptual.

7.2. Variabilidad climática en el Área de estudio.

7.2.1. Metodología.

Para determinar la existencia y comportamiento de la variabilidad climática, y su impacto sobre la zona de estudio, se llevó a cabo un análisis comparativo de la temperatura media anual y precipitación media anual, obtenidas en las estaciones climatológicas de Alchichica, Zalayeta y Guadalupe Buena Vista durante el periodo 1967 – 2001, de los años, La Niña, y los años El Niño, contra los años normales y cuyos valores promedio se muestran en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Análisis comparativo de los eventos La Niña y El Niño, con los años sin Enso periodo (1967- 2001).

Alchichica			
	Temp.Med	Precip_Med	Evapor_Med
	°C/año	mm/año	mm/año
Promedios	8.1	423.7	1709.3
Promedios	7.4	415.6	1667.2
Promedios	8.2	375.1	1805.7
Zalayeta			
	Temp.Med	Precip_Med	Evapor_Med
	°C/año	mm/año	mm/año
Promedios	7.3	436.3	1851.2
Promedios	7.0	425.8	1854.8
Promedios	7.4	367.7	1922.2
Guadalupe Buenavista			
	Temp.Med	Precip_Med	Evapor_Med
	°C/año	mm/año	mm/año
Promedios	9.6	364.8	1908.7
Promedios	8.9	344.8	1882.7
Promedios	9.7	433.0	1968.4
	= Año Normal, 14 eventos		
	= Niña, 8 eventos		
	= Niño, 11 eventos		

En la Tabla 7.1, se puede apreciar la diferencia que existe entre estas variables climatológicas durante la presencia de La Niña y El Niño, comparado con los años normales. Sin embargo, estadísticamente (Prueba de Fisher), solo resulta significativa para la estación climatológica de Alchichica. Mostrando así, de esta forma, el el cambio en la variable de temperatura en presencia de ambos (El Niño y La Niña); y sobre precipitación pluvial, solo durante el evento, El Niño.

Esto muestra, la variabilidad climática existente en presencia de estos eventos (La Niña y El Niño), y su efecto, en forma puntual y espacial, en las variables meteorológicas tomadas de la estación climatológica, Alchichica.

Considerando lo anterior, se puede deducir, que durante la presencia del evento El Niño, existe un incremento en la temperatura y un déficit en la precipitación pluvial, que dependiendo de las características, temporales y espaciales provoca un incremento en la evaporación y en la evapotranspiración. Esto ocasiona pérdidas de agua, tanto en humedales y acuíferos, como en cuerpos de agua superficiales. Por esta razón, es de suma importancia determinar la existencia y efecto de la variabilidad climática, sobre todo en las regiones de climas áridos y semi-áridos, para así, diseñar estrategias adecuadas para un mejor manejo del recurso.

En las Figuras (7.1 y 7.2), se muestran las anomalías de la evaporación y precipitación pluvial, originadas por el impacto del fenómeno El Niño en el periodo de 1967–2001.

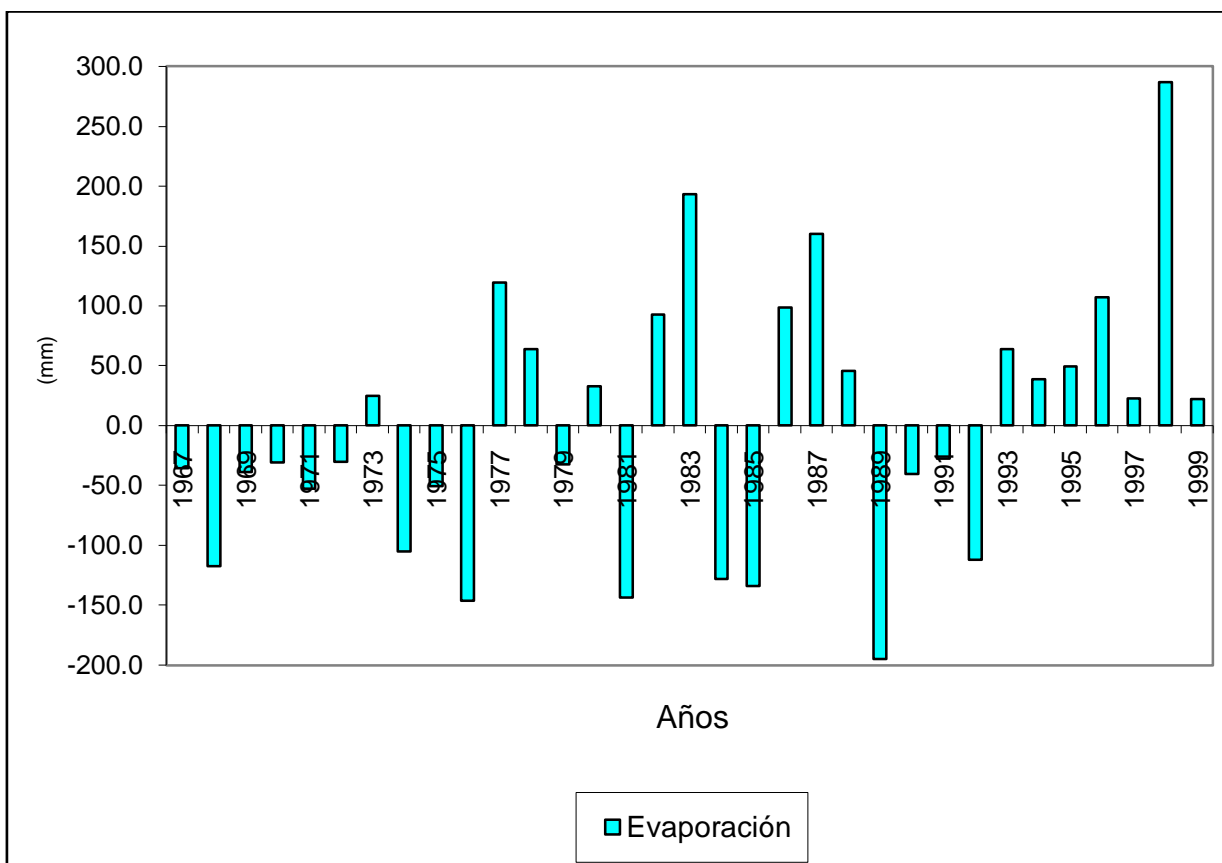


Figura 7.1. Anomalías de evaporación en presencia del evento el Niño (1967–2001).

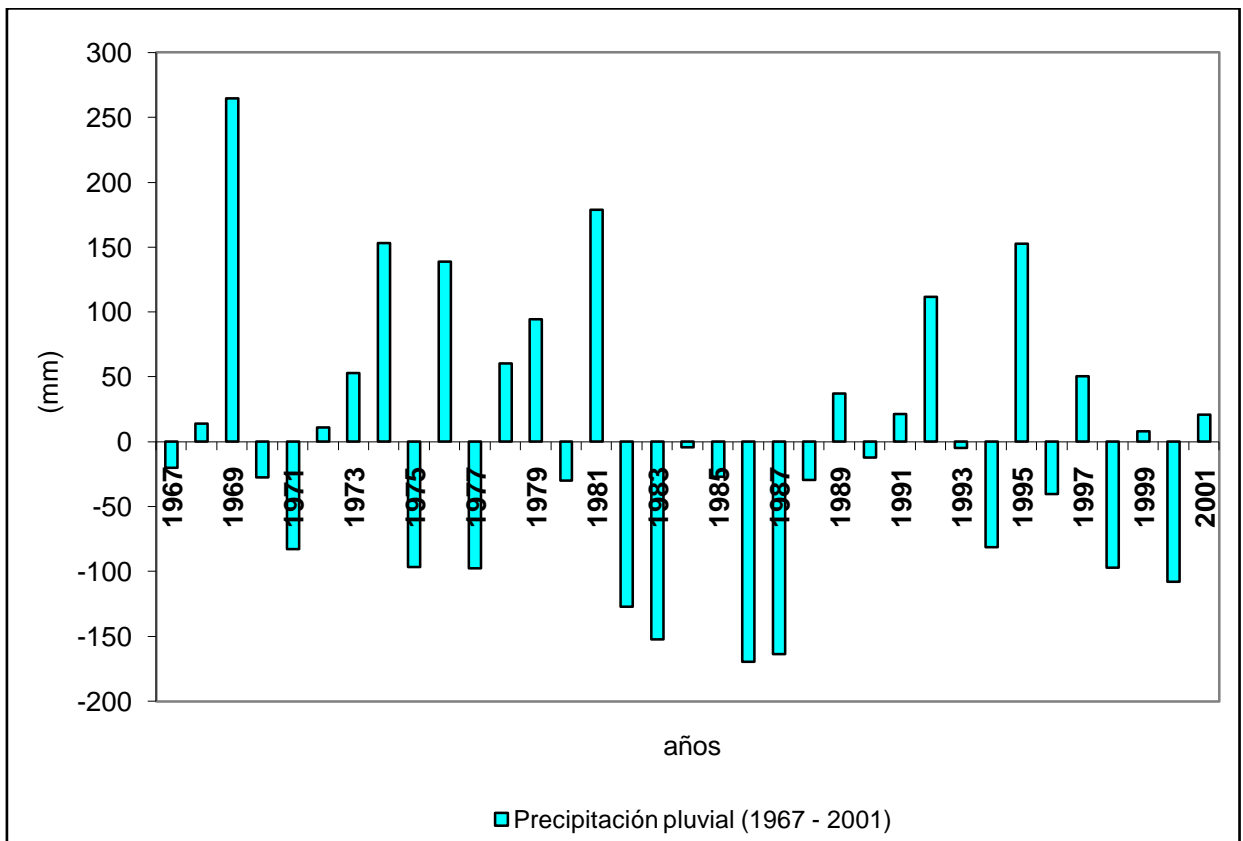


Figura 7.2. Anomalías de la precipitación pluvial en presencia del evento el Niño (1967–2001).

7.3. Sequía meteorológica.

El análisis de los efectos de la sequía meteorológica, puede llevarse a cabo, a partir de diferentes puntos de vista: agrícola, ambiental, urbano, biológico, meteorológico e hidrológico (Tecnociencia, 2009).

En el presente estudio, se analizó la sequía desde los puntos de vista: meteorológico e hidrológico, por la estrecha relación que existe entre ambos, ante un déficit de precipitación pluvial.

7.3.1. Metodología.

Para llevar a cabo el análisis se usaron los datos secundarios de precipitación pluvial (Apéndice I) correspondientes a cada estación climatológica

(Alchichica, Zalayeta y Guadalupe Buenavista), con el fin verificar la existencia o no, de la sequía meteorológica.

El cálculo del índice de severidad de la sequía meteorológica (ecuación 7.1) para cada año del periodo estudiado (1967– 2001), se realizó con los datos de precipitación mensual registrada en cada una de las estaciones climatológicas (Alchichica, Zalayeta y Guadalupe buenavista), comparados con sus respectivas medias mensuales.

$$IS = \left| \frac{\left(\sum P - \sum \bar{P} \right)}{\sum \bar{P}} \right|, \quad \sum P < \sum \bar{P} \quad (7.1)$$

Donde:

P = precipitación mensual registrada

\bar{P} = precipitación promedio mensual del periodo considerado (1967–1996).

Un ejemplo que ilustra el procedimiento de esta técnica, se muestra en el Apéndice II.

Usando la técnica descrita anteriormente, se calcularon los índices para cada año del periodo de información correspondiente a cada estación climatológica.

Posteriormente, se calculó el promedio anual de los índices del período (1967 – 2001) de cada estación, obteniéndose, los resultados siguientes:

- Achichica I.S = 0.4
- Zalayeta I.S = 0.5
- Guadalupe Buenavista I.S = 0.5

Con base en su clasificación, se caracterizan como muy fuertes (Tabla 7.3).

Tabla 7.3. Índices de severidad de la sequía meteorológica (Tomado de: Hernández *et al.*, 2000).

Extremadamente severo	> 0.8
Muy severo	0.6 – 0.8
Muy fuerte	0.4 – 0.5
Fuerte	0.35 – 0.4
Leve	0.2 – 0.35
Ausente	< 0.2

Los valores de I.S obtenidos coinciden con el estudio de Hernández *et al.*, (2000), de sequía meteorológica, para el doble de CO₂, representado por el escenario actual (Figura 7.1), que corresponde al periodo de precipitación pluvial (1950–1980).

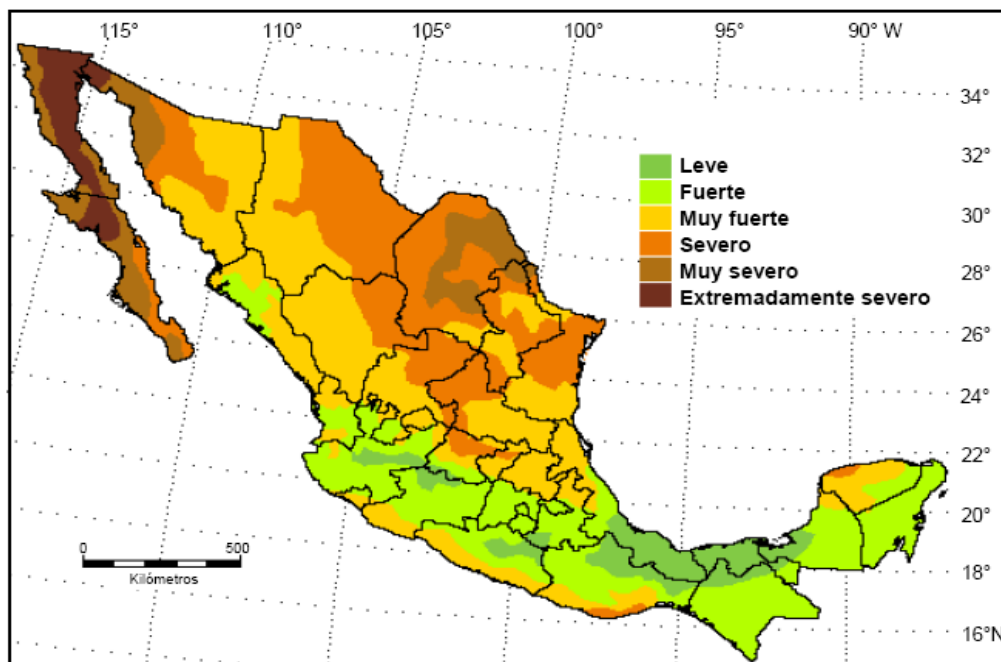


Figura 7.1. Índice de severidad de la sequía meteorológica (1950 – 1980). Tomado de: Hernández *et al.*, 2000.

El resultado del análisis indica, la presencia, de la sequía meteorológica en cada una de las estaciones (Alchichica, Zalayeta y Guadalupe Buenavista). Desde el punto de vista meteorológico, este fenómeno se caracteriza por una marcada reducción de la cantidad de precipitación en una zona, produciéndose serios desbalances hidrológicos (Nacional Drought Mitigation Center, 2002).

Desde el punto de vista hidrológico, se habla de sequía cuando se presenta una precipitación menor, a la media estacional en escala regional, lo que se traduce en un nivel de distribución anormal de los recursos de agua y de los reservorios de agua superficial o subterránea (Barakat y Handoufe, 1998).

En el sector agrícola, la sequía se refiere al déficit marcado y permanente de lluvias que reduce significativamente la producción agrícola con relación a la normal o los valores esperados para una región. Para algunos especialistas, el déficit de humedad en el suelo, ligado a los efectos sobre la producción vegetal-agricultura y pastizales en ganadería, es frecuentemente denominado como sequía edáfica (Barakat y Handoufe, 1998; Bootsma *et al.*, 1996).

En el sector socio-económico, la sequía ocurre cuando las lluvias son insuficientes y tienen un efecto significativo, sobre las comunidades y su economía (energía hidroeléctrica, suministro de agua potable, en la industria, etc....) (Barakat y Handoufe, 1998; Bergaoul y Alouini, 2001).

7.4. Cálculo de la evapotranspiración

7.4.1. Metodología.

Para el cálculo de la evapotranspiración (Potencial ET_P y Real ET_R .) por estación, se usaron la ecuación de Turc modificada y la ecuación de Turc diseñada para calcular la evapotranspiración Real (ET_R), (apéndice II). Propuestas para zonas áridas y semiáridas (Torres, 1995), las cuales además de contar con los datos para su aplicación, cumplen con las características climáticas (clima semiárido), que prevalece en la región de estudio, así, como los datos secundarios de temperatura media mensual correspondientes a las estaciones climatológicas (Alchichica, Guadalupe Buenavista y Zalayeta), y precipitación pluvial (Apéndice I., Tablas (1-3), y de radiación solar total (RA) recibida en una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera, para periodos

mensuales, en cal cm⁻² por día (Tabla 4., Apéndice II). Las expresiones matemáticas, para el cálculo de la ET_R y ET_p son:

$$ET_R = P\sqrt{(0.9 + P^2 / L^2)} \quad (7.2)$$

De donde:

ET_R = Evapotranspiración real en mm/año.

P = Precipitación en mm/año.

$L = 300 + 25t + 0.05t^3$

t = Temperatura media anual °C.

$$ET_p = \frac{(0.008)tRA + (0.66)t}{t + 15} \quad (7.3)$$

De donde:

ET_p = evapotranspiración mensual en mm por día
(Posteriormente de multiplicarse por el número de días de cada mes).

t = temperatura media mensual en °C.

RA = radiación recibida en una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera en cal cm⁻² por día (valor medio para cada mes).

Los valores calculado de ET_R y ET_p , se muestran en la Tabla 7.4; así como también los valores calculados de la evaporación y precipitación, promedio anual. El análisis comparativo de la evaporación y la precipitación pluvial para cada una de las estaciones climatológicas, muestran las siguientes diferencias:

Alchichica = 1317.3 mm/año.

Guadalupe Buenavista = 1559.1 mm/año.

Zalayeta = 1477.7 mm/año.

Esto pone de manifiesto que la evaporación es mayor que la precipitación pluvial en la región de Tepeyahualco.

Tabla 7.4. Resultados de evapotranspiración real y potencial, por estación, comparados con la evaporación y la precipitación, por estación.

Estación Climatológica	Temperatura media anual.	ET_R.	ET_p.	Evaporación.	Precipitación.
	°C/año	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)
Alchichica	7.9	318.4	895.6	1720.2	402.9
Guadalupe Buenavista	9.4	316.3	852.8	1932.3	373.2
Zalayeta	7.3	311.7	1004.7	1888.6	410.9

Por tal motivo, si los cuerpos de agua no estuviesen alimentados por otra fuente, el proceso de desecación sería muy acelerado, como por ejemplo el Lago El Salado.

Los resultados de esta comparación permiten reflexionar la necesidad de entender los efectos de la variabilidad climática ante el cambio climático, que puede ocasionar pérdidas económicas en los diferentes sectores (Hurbano, Agrícola, etc.), así como desecación en los cuerpos de agua.

7.5. Balance Hidrogeológico del lago–cráter Alchichica.

7.5.1. Metodología

En la base de datos CLICOM, se consultaron y analizaron datos secundarios de las estaciones climatológicas pertenecientes al Estado de Puebla, con el fin de determinar cuántas estaciones climatológicas cuentan con información continua durante un periodo de por lo menos 30 años. De un total de 231 estaciones climatológicas consultadas, solamente dos (Alchichica y Guadalupe Buenavista) presentan registros continuos en un periodo de 33 años. La estación Zalayeta en el estado de Veracruz, presenta las mismas características del registro, de las dos anteriores.

La Figura 7.2, muestra la ubicación de las estaciones climatológicas, Alchichica (1), Zalayeta (2) y Guadalupe Buenavista (3).

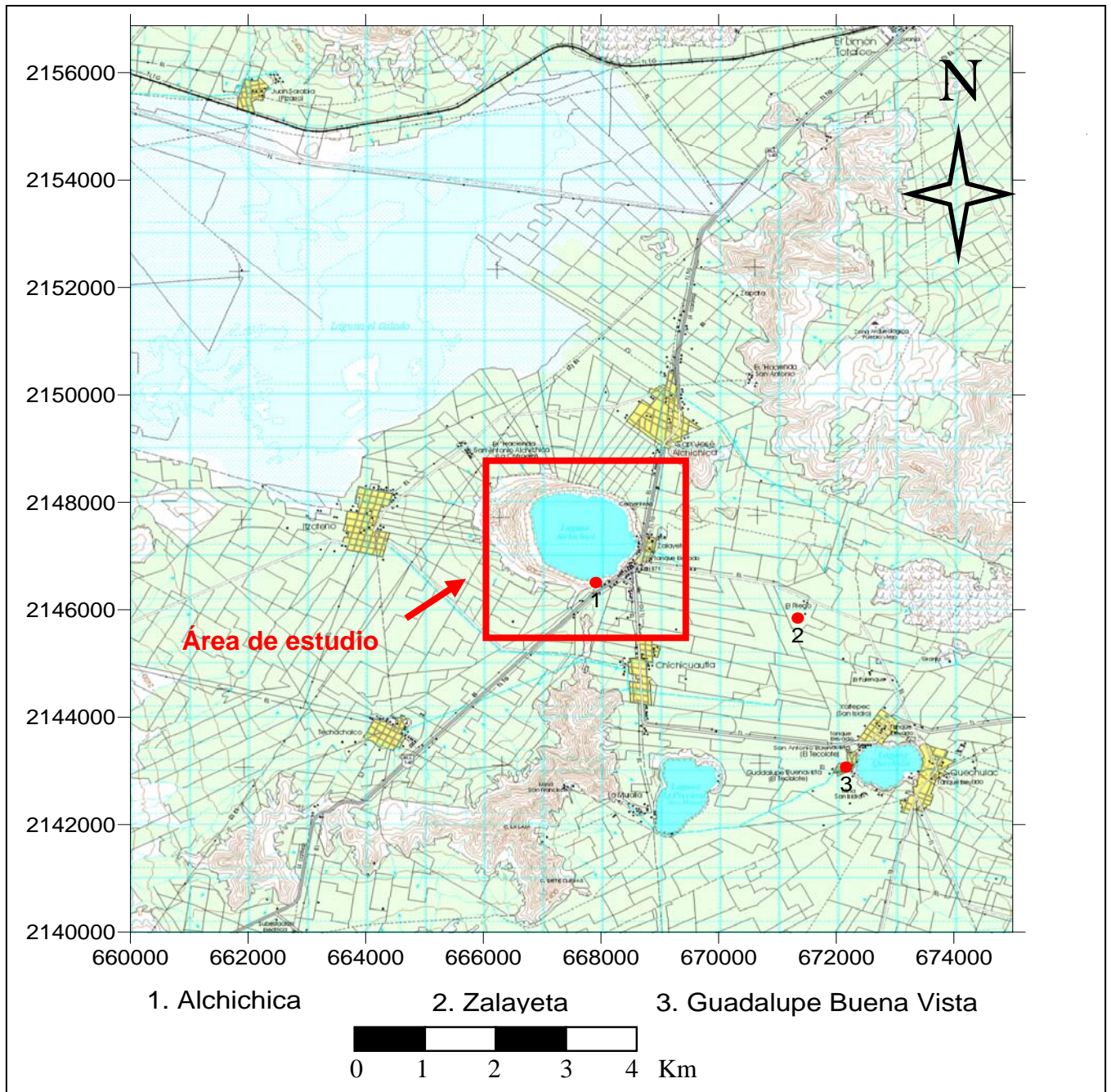


Figura 7.2. Ubicación de estaciones climatológicas.

El procedimiento para el cálculo del balance hidrogeológico, se describe a continuación:

Usando la ecuación general de balance hídrico:

$$P + I_S + I_G - E_V - ET_P - O_S - O_G - \Delta S - \nu = 0. \quad (7.4)$$

Los términos a determinar, son los siguientes:

Entrada

P = Precipitación (m^3/s).

I_S = Flujo superficial (m^3/s).

I_G = Flujo subterráneo (m^3/s).

Salida

E_V = Evaporación (m^3/s).

ET_P = Evapotranspiración ($m^3/año$).

O_S = Flujo superficial (m^3/s).

O_G = Flujo subterráneo (m^3/s).

Almacenamiento

ΔS = volumen de agua almacenado (diferencia entre el volumen del agua total de entrada y el volumen de agua total de salida).

ν = término residual (errores por lecturas y por estimaciones).

Por las características topográficas que presenta el terreno del cráter, los flujos superficiales de entrada y salida se pueden considerar nulos. Además la captación pluvial y la evaporación se dividen en dos partes, dado que el área total al fondo del cráter, al nivel estático del lago, es la suma del área del espejo del lago-cráter, más el área sólida restante. Por lo que la ecuación anterior queda de la siguiente forma:

$$P_L + P_{Cráter} + I_G - E_{VL} - E_T P_{Cráter} - O_G - \Delta S - v = 0 . \quad (7.5)$$

De donde:

P_L = Precipitación Pluvial captada por el área del lago (m^3/s).

$P_{Cráter}$ = Precipitación Pluvial captada por el área localizada entre el espejo de agua y el perímetro del cráter (m^3/s).

E_{VL} = Evaporación del Lago (m^3/s).

$E_T P_{Cráter}$ Cráter = Evapotranspiración emitida por el área localizada entre el espejo del lago y el perímetro del cráter ($m^3/año$).

Para obtener el volumen de agua precipitada (P) sobre el lago-cráter, se calculó primero el promedio anual de la precipitación pluvial ($P_{Prom.} = 407.1$ mm/año) correspondiente al periodo de 30 años (1967-1996), usando información histórica de la estación climatológica Alchichica. Posteriormente, se determinó como se indica a continuación:

Precipitación pluvial captada por la parte terrena del área del cráter ($P_{Cráter}$)

$$P_{Cráter} = (\text{área del cráter} - \text{área del espejo de agua}) \times (P_{Prom.})$$

Las áreas para el lago-cráter, fueron determinadas usando una ortofoto (1995) y fotografías aéreas (1975, 2006, Apéndice V) y el programa arcview versión 3.2.

Así:

$$P_{Cráter} = (3,615,157.48 m^2 - 2,165,905.92 m^2) (0.4071 m/año) = \mathbf{589,990.31}$$

$m^3/año$

Precipitación pluvial captada por el lago $P_L = P_{\text{Prom.}} \times \text{Área superficial de él lago.}$

$$P_L = (0.4071 \text{ m/año}) (2,165, 905.92 \text{ m}^2) = \mathbf{881,740.30 \text{ m}^3/\text{año.}}$$

Para la evaporación del agua en el lago-cráter Alchichica, se calculó el promedio anual de la evaporación (1720.2 mm/año), para el periodo antes mencionado, correspondiente a la estación climatológica de Alchichica, la cual se midió en un evaporímetro "clase A". Por lo tanto, la relación para calcular el volumen de agua evaporada sobre el lago se expresa como:

$$E_{VL} = \text{Evaporación media anual} \times (0.70) \times \text{Área del lago.}$$

Donde (0.70) es el coeficiente de corrección del evaporímetro para lagos. Sin embargo, dado que el clima de la región de estudio es semí-árido, se redujo un 20 por ciento (Allen *et al.*, 2006), obteniendo así el valor de 0.56.

Usando el nuevo valor del coeficiente, el volumen de agua evaporada en el lago es:

$$E_{VL} = (1.7202 \text{ m/año}) (0.56) (2,165, 905.92 \text{ m}^2) = \mathbf{2, 086,443.16 \text{ m}^3/\text{año.}}$$

Para calcular la evapotranspiración potencial ($E_T P_{\text{Cráter}}$) para la parte terrena del cráter, se utilizó la siguiente expresión:

$$E_T P_{\text{Cráter}} = ET_p \times \text{Área terrena del cráter.}$$

Para usar la evapotranspiración potencial es necesario que la humedad del suelo y la cobertura vegetal estén en condiciones óptimas. Por lo tanto, como este no es el caso en el área de estudio, se aplicó el valor calculado (Apéndice II, Tabla 5) de la evapotranspiración real ($ET_R = 318.4 \text{ mm/año}$), que es la que se produce en las condiciones existentes en cada caso (Thornthwaite, 1948).

Por lo tanto, la expresión anterior se representa como:

$$E_T R_{Cráter} = ET_R \times \text{Área terrena del cráter.}$$

Sustituyendo los datos correspondientes de ET_R y del área, se obtiene:

$$\begin{aligned} E_T R_{Cráter} &= (0.3184 \text{ m/año}) (3,615,157.48 \text{ m}^2 - 2,165,905.92 \text{ m}^2) \\ &= \mathbf{461,441.70 \text{ m}^3/\text{año.}} \end{aligned}$$

Para llevar a cabo el balance hidrogeológico en el lago-cráter Alchichica, se requirió el diseño de la red de flujo subterráneo. Para esto, se utilizaron datos de piezometría de 41 de los 122 aprovechamientos censados y visitados en la región de Tepeyahualco (Apéndices III y IV), entre norias y pozos reportados por SOAPAP, así como cuatro puntos (R_1 , R_2 , R_3 , R_4), Alcalá (2004), que hacen referencia al nivel del lago y que se localizan en la periferia del área de estudio (Figura 7.3).

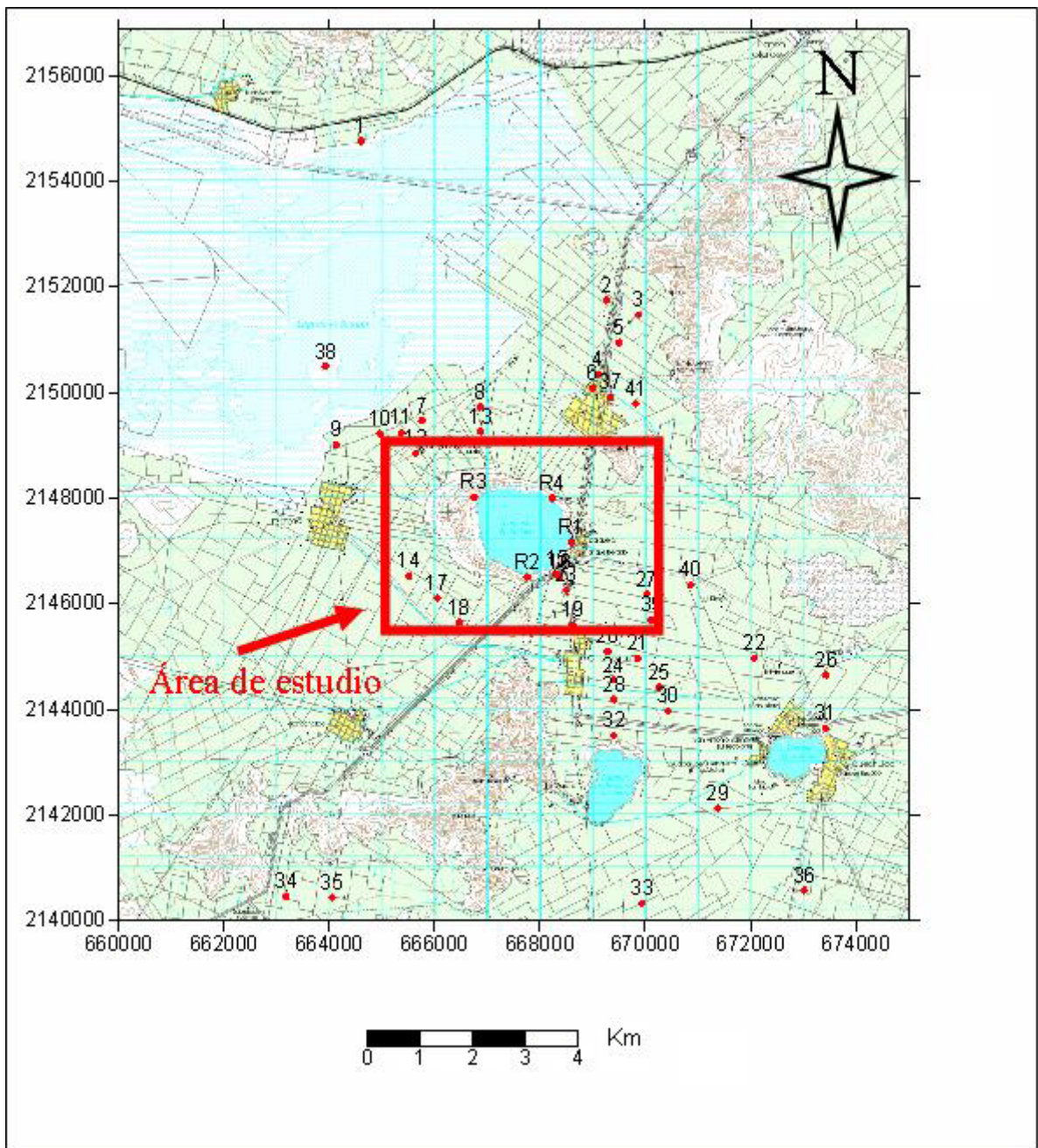


Figura 7.3. Ubicación de 41 aprovechamientos y puntos de referencia (R1, R2, R3 y R4).

7.5.2. Red de flujo.

La red de flujo esta constituida por líneas ortogonales a curvas equipotenciales (líneas de igual carga hidraulica). Sus valores se pueden calcular utilizando la ecuación (Apéndice V),

$$\left(\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} \right) = 0, \quad (7.6)$$

ó

$$\nabla^2 h = 0,$$

conocida también como Ecuación de Laplace, cuya solución es una función de la forma $h = (x, y, z)$ que describe el valor de la carga hidráulica en un espacio bidimensional (Fetter, 1999).

La determinación de las curvas de elevación del nivel estático (Tabla 2, Apéndice III), se realizó con el programa Surfer versión 8. En la Figura 7.4, se presenta la configuración de las isolineas de carga hidraulica y las líneas ortogonales, que indican la red de flujo subterráneo.

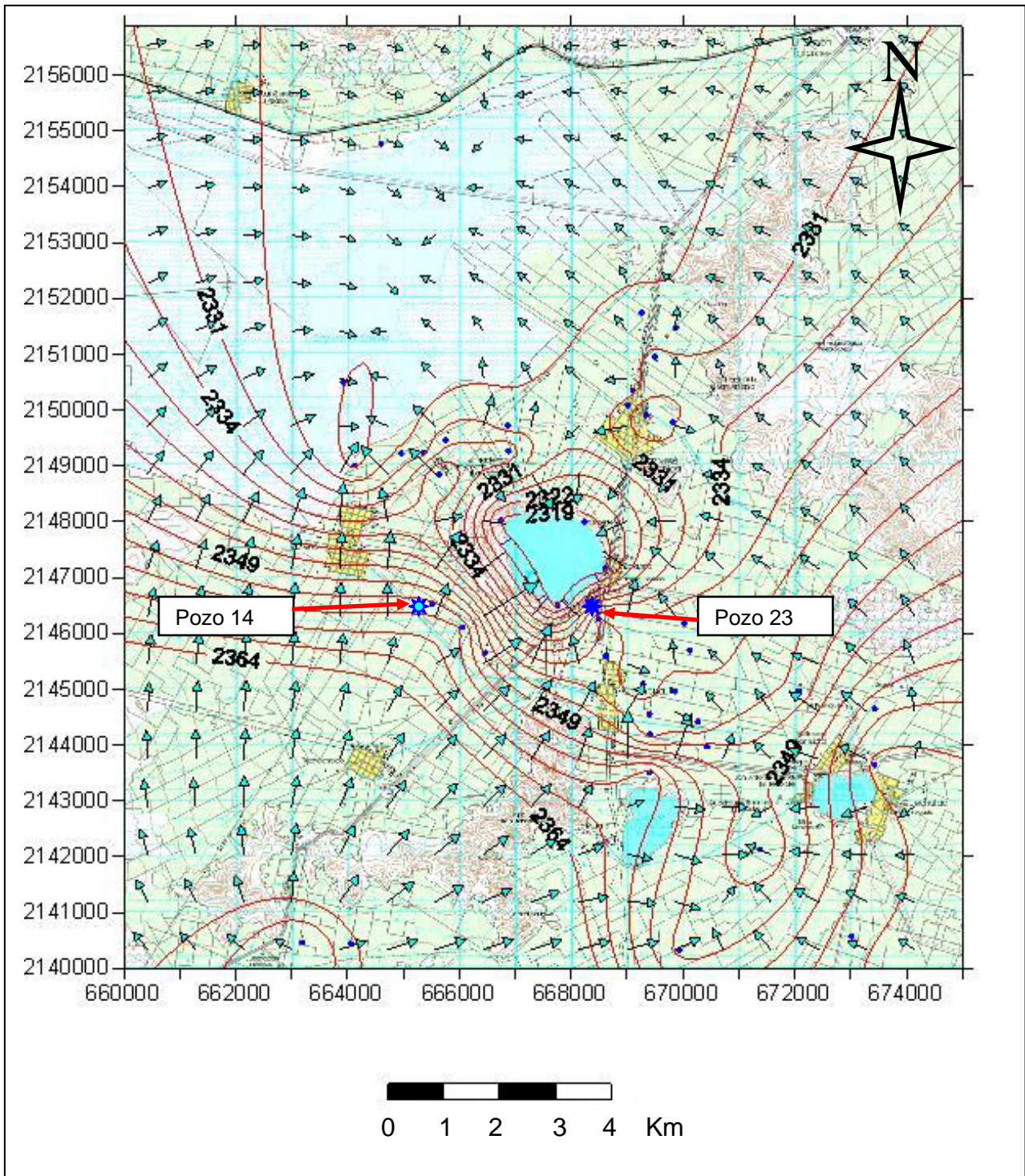


Figura 7.4. Red de flujo Subterraneo

La ley de Darcy establece que un flujo a través de un medio poroso de área A , es directamente proporcional a la pérdida de carga hidráulica y a un coeficiente k , e inversamente proporcional al trayecto recorrido (Darcy, 1856).

La ley de Darcy, puede ser expresada como:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl}. \quad (7.7)$$

En donde:

Q = Descarga volumétrica (m^3/s).

K = Constante de proporcionalidad, conocida como conductividad hidráulica (m/s).

A = Área de sección transversal (m^2).

$\frac{dh}{dl}$ = Gradiente de carga hidráulica (adimensional).

Haciendo, $A = b \times B$.

En donde:

b = espesor saturado.

B = ancho del espesor saturado (distancia entre las líneas de flujo, que forman el canal de flujo).

La ley de Darcy se puede expresar como:

$$Q = -KbB \frac{dh}{dl}. \quad (7.8)$$

La capacidad transmisora de un acuífero se puede representar por medio del coeficiente de transmisividad, y su valor es el resultado de multiplicar la conductividad hidráulica promedio del acuífero por su espesor saturado. Por lo tanto, la ley de Darcy, se puede expresar matemáticamente como:

$$Q = -TB \frac{dh}{dl} \text{ [m}^3\text{/s]}, \quad (7.9)$$

que es la relación que representa el caudal que circula a través de un canal de flujo.

En donde:

T transmisividad = K b

B = ancho medio del flujo (distancia media entre los límites de flujo del canal).

En este estudio, se usó la conductividad equivalente resultante de la columna estratigráfica de los estratos perforados por el Pozo Zalayeta1 (Tabla 7.5) calculada, como lo indican las expresiones siguientes (Domenico, 1990):

$$K_x = \frac{\sum m_i k_i}{\sum m_i} \quad K_z = \frac{\sum m_i}{\sum \left(\frac{m_i}{k_i} \right)} \quad (7.10)$$

En donde:

K_x = Conductividad equivalente (en el plano horizontal).

K_z = Conductividad equivalente (en la vertical).

m_i = espesor del estrato.

K_i = Conductividad hidráulica del material correspondiente a cada estrato.

Y cuyos resultados se muestran a continuación:

Tabla 7.5. Columna estratigráfica y Conductividad hidráulica Equivalente.

Pozo Zalayeta No. 1(perforado en 1973).					
		Estratigrafía	Latitud N	Longitud W	Altitud msnm
Profundidad			19° 24' 24''	97° 23' 09	2331.19
Intervalo	Espesor	Clasificación	Conductividad	miki	mi/ki
(m)	(m)	Muestra	K (m/s)	(m ² /s)	seg
0.00 - 5.00	5	Arenas finas	1.00E-04	5.01E-04	5.00E+04
5.00 - 8.00	3	Arenas finas	1.00E-04	3.00E-04	3.00E+04
8.00 - 10.00	2	Arcillas	2.355E-09	4.71E-09	8.49E+08
10.00 - 17.00	7	Arenas finas y medias	3.50E-04	2.45E-03	2.00E+04
17.00 - 21.00	4	Arcillas	2.355E-09	9.42E-09	1.70E+09
21.00 - 28.00	7	Arenas medias	2.50E-04	1.75E-03	2.79E+04
28.00 - 29.00	1	Arcillas con arena	6.37E-06	6.37E-06	1.57E+05
29.00 - 34.00	5	Arenas muy finas	3.47E-05	1.74E-04	1.44E+05
34.00 - 38.00	4	Arenas medias	2.50E-04	1.00E-03	1.60E+04
38.00 - 42.00	4	Arcillas arenosas	1.275E-06	5.10E-06	3.14E+06
42.00 - 45.00	3	Arenas medias	2.50E-04	7.51E-04	1.20E+04
45.00 - 49.00	4	Arenas finas y medias	3.50E-04	1.40E-03	1.14E+04
49.00 - 53.00	4	Arenas arcillosas	8.68E-06	3.47E-05	4.61E+05
53.00 - 56.00	3	Arenas medias	2.50E-04	7.51E-04	1.20E+04
56.00 - 60.00	4	Arenas finas	1.00E-04	4.00E-04	4.00E+04
60.00 - 63.00	3	Arenas gruesas	3.00E-03	9.00E-03	1.00E+03
63.00 - 64.00	1	Arcillas	2.355E-09	2.36E-09	4.25E+08
64.00 - 65.00	1	Arenas finas	1.00E-04	1.00E-04	9.99E+03
65.00 - 68.00	3	Arenas arcillosas	8.68E-06	2.60E-05	3.46E+05
68.00 - 78.00	10	Lutita	1.00005E-09	1.00E-08	1.00E+10
78.00 - 79.00	1	Caliza	1.00005E-06	1.00E-06	1.00E+06
79.00 - 81.00	2	Lutita	1.00005E-09	2.00E-09	2.00E+09
81.00 - 85.00	4	Caliza	1.00005E-06	4.00E-06	4.00E+06
Suma	85	Suma	5.16E-03	1.87E-02	1.50E+10

$$\sum m_i = 85$$

$$\sum k_i = 5.16E - 03$$

$$\sum m_i k_i = 1.87E - 02$$

$$\sum \frac{m_i}{k_i} = 1.50E + 10$$

$$K_x = 2.20E-04 \text{ (m/s)}$$

$$K_z = 5.67E-09 \text{ (m/s).}$$

Restando el nivel estático (2318.34 msnm) del lago–cráter al nivel estático (2326.8 msnm) del pozo 14, se obtiene una diferencia de 8.46 m que es el espesor (b) saturado del acuífero por arriba del nivel estático del lago–cráter Alchichica. Del canal de flujo1 (Figura 6.3) se obtiene la distancia entre las dos

líneas de flujo B = 1222.22 m y del pozo 14 (Figura 6.3), a la equipotencial del espejo del lago, la distancia (dl) cuyo valor es de 1500 m. Así, se obtiene el gradiente ($i_1 = dh/dl$) para el primer canal de flujo; como se muestra a continuación:

$$i_1 = \frac{2326.8 - 2318.34}{1500} = \frac{8.46}{1500}$$

Para determinar el gradiente ($i_2 = dh/dl$) en el pozo 23, se resta el nivel estático del lago-cráter (2318.34msnm), al nivel estático de pozo 23 (2324.0 msnm) que da como resultado $b = 5.66$. Del canal de flujo 2 (Fig. 6.3) se obtiene la distancia entre las dos líneas de flujo B = 583.4 m, y del pozo 23 (Fig. 6.3) a la equipotencial del espejo de lago se determinó la distancia (dl) de 500 m. Por lo tanto:

$$i_2 = \frac{2324 - 2318.34}{500} = \frac{5.66}{500}$$

Aplicando la ley de Darcy $Q = -TB \frac{dh}{dl}$ a los canales de flujo (1 y 2) se

obtiene que:

$$Q_1 = (-0.00022 \text{ m/s})(8.46 \text{ m})(1222.22 \text{ m}) \left(\frac{-8.46}{1500} \right) \left(31536000 \frac{\text{s}}{\text{año}} \right) = 404,602.11 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

y

$$Q_2 = (-0.00022 \text{ m/s})(5.66 \text{ m})(583.4 \text{ m}) \left(\frac{-5.66}{500} \right) \left(31536000 \frac{\text{s}}{\text{año}} \right) = 259,333.47 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

Por lo tanto, el flujo subterráneo total Q_T que se incorpora al lago-cráter es la suma de Q_1 y Q_2 . Así:

$$Q_T = 404,602.11 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} + 259,333.47 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} = 663,935.58 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

Como en la red de flujo no se observa salida de flujo subterráneo, el término O_G de la ecuación de balance se considera nulo, quedando:

$$P_L + P_{Cráter} + I_G - E_L - ET_{RCráter} - \Delta S - \nu = 0. \quad (7.11)$$

Sustituyendo el valor de los términos calculados y despejando ΔS y ν en la Ec. (7.11) se obtiene que:

$$\Delta S + \nu = 881,740.30 \text{ m}^3/\text{año} + 589,990.31 \text{ m}^3/\text{año} + 663,935.58 \text{ m}^3/\text{año} - 2,086,443.16 \text{ m}^3/\text{año} - 461,441.70 \text{ m}^3/\text{año}.$$

$$\Delta S + \nu = -412,218.67 \text{ m}^3/\text{año}.$$

Considerando nulo el término de volumen residual, se obtiene que:

$$\Delta S = -412,218.67 \text{ m}^3 / \text{año}.$$

7.6. Análisis de tendencia de Precipitación y Evaporación.

En la Figura 7.5, se observa que la precipitación pluvial tiende a disminuir en el transcurso del periodo considerado (1967–2001). Para determinar la magnitud del déficit, se ajustaron a una tendencia lineal los datos ($P = (-1.8136)t + 4001$) que representa la línea de decremento para la precipitación. La tasa de déficit de la precipitación anual se calculó para un periodo de 30 años (1967 – 1996), como se indica a continuación:

$$P = (-1.8136)t + 4000.9965$$

$$P_1 = (-1.8136)(1967) + 4000.9965 = 433.65 \text{ mm.} / \text{año}.$$

$$P_2 = (-1.8136)(1996) + 4000.9965 = 381.1 \text{ mm} / \text{año}.$$

Restando P_2 de P_1 , se obtiene la tasa del déficit de precipitación pluvial durante el periodo de 30 años.

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (433.65 \text{ mm/año}) - (381.1 \text{ mm/año.}) = -52.6 \text{ mm/año.}$$

$$\Delta P = -52.6 \text{ mm/año} = -0.056 \text{ m/año} .$$

Si se multiplica la tasa de precipitación pluvial por el periodo de 30 años (1967–1996), se obtiene la altura (h) de la lámina de agua originada por el déficit de precipitación pluvial. Por lo tanto:

$$h = (-0.056 \text{ m/año})(30 \text{ años}) = -1.68 \text{ m.}$$

Cabe mencionar que se tomó el periodo de 30 años, para igualar con el periodo (1967–1996) usado en el balance del lago–cráter y así obtener el déficit de la precipitación pluvial en el mismo periodo de estudio.

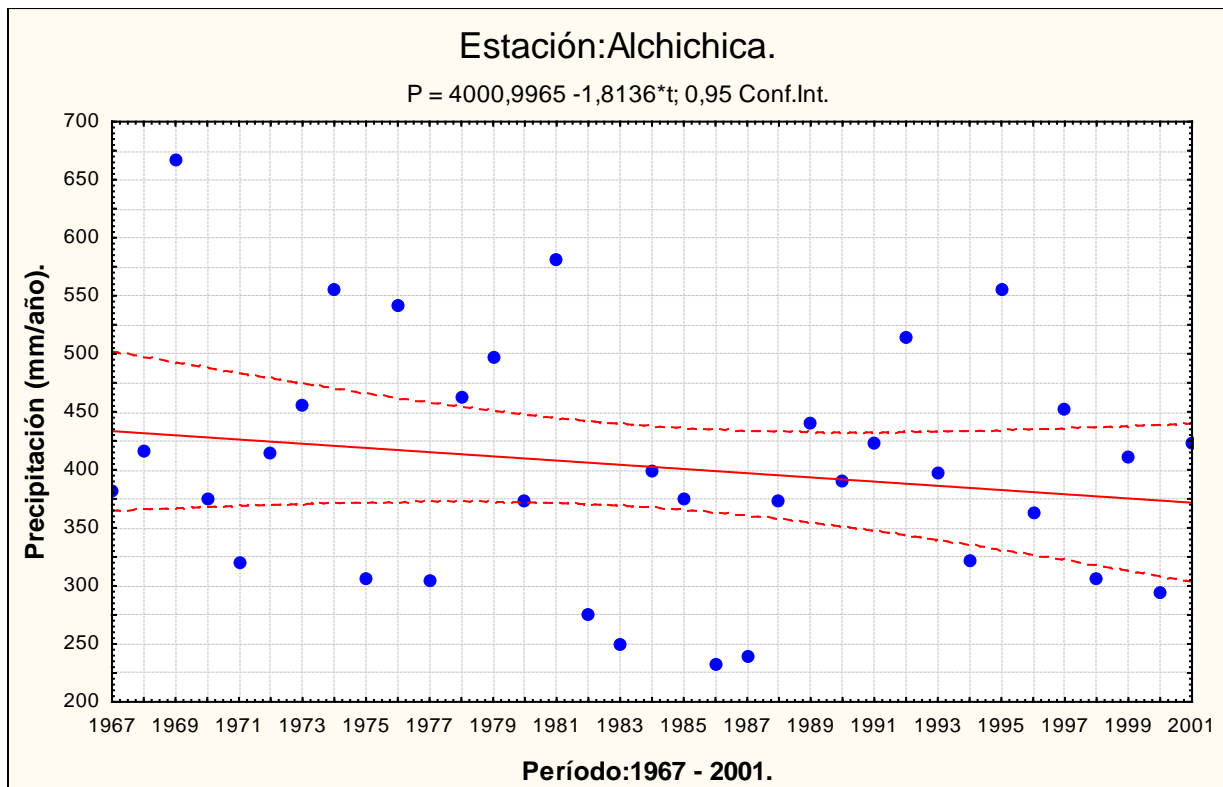


Figura 7.5. Grafica de precipitación pluvial.

La línea de la evaporación en la Figura 7.6 muestra una tendencia al incremento en el transcurso del tiempo considerado (1967–2001). De igual forma que en el cálculo del déficit de precipitación, y usando la ecuación ($E_v = (3.9012)t + 6004.8406$) que representa la línea de tendencia de la evaporación, se obtiene la tasa de incremento de la evaporación y la altura de la lamina de agua evaporada. Así, para el periodo de 30 años (1967–1996), se obtiene que:

$$E_v = (3.9012)t - 6004.8406$$

$$E_{v_1} = (3.9012)(1967) - 6004.8406 = 1668.82 \text{ mm / año ,}$$

$$E_{v_2} = (3.9012)(1996) - 6004.8406 = 1781.95 \text{ mm / año.}$$

Restando E_{v_1} de E_{v_2} se obtiene la tasa del incremento de evaporación durante el periodo de 30 años (1967–1996):

$$E_{v_2} - E_{v_1} = 1781.95 \text{ mm / año} - 1668.82 \text{ mm / año} = 113.1 \text{ mm / año.}$$

$$\Delta E_v = 113.1 \text{ mm / año.} = 0.1131 \text{ m / año.}$$

La cual se multiplica por 30 años, para obtener la altura de la lamina de agua evaporada en el periodo considerado (1967–1996). Por lo que:

$$h = (0.1131 \text{ m / año})(30 \text{ año}) = 3.4 \text{ m}$$

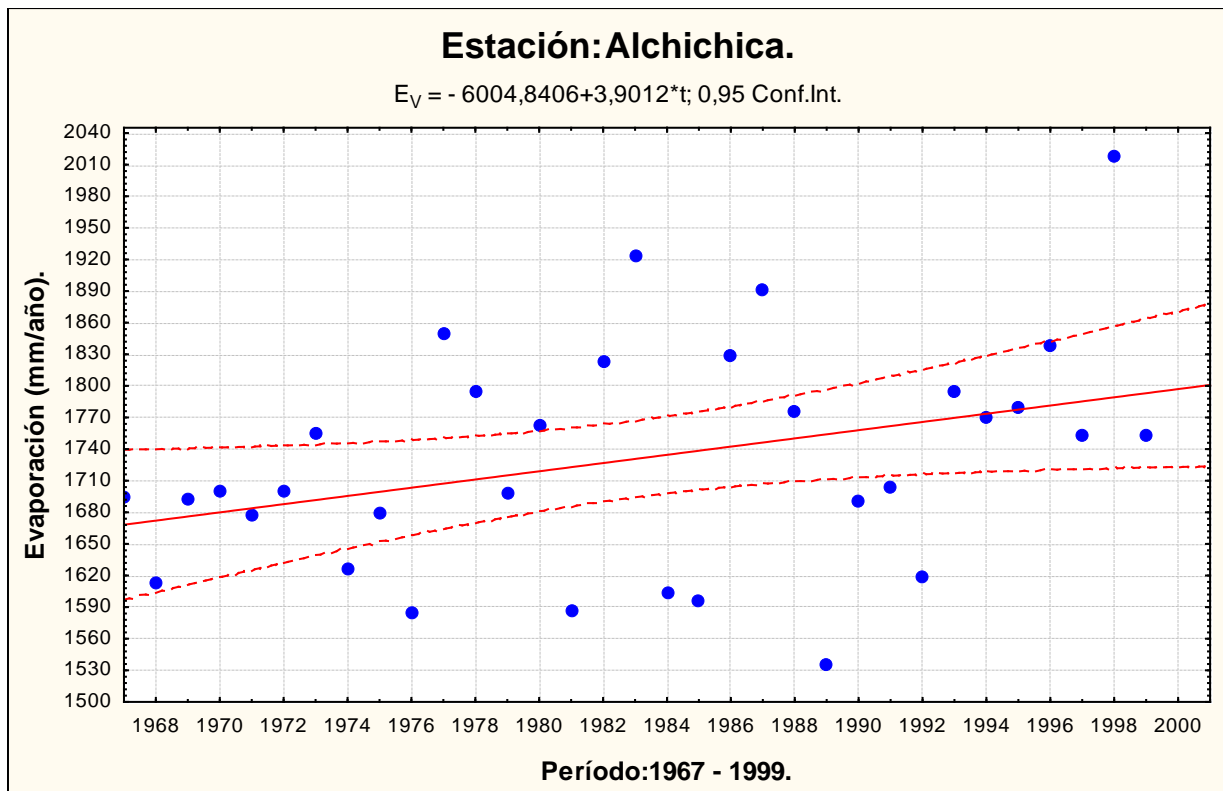


Figura 7.6. Grafica de evaporación (medida en estanque de evaporación, clase A).

El Climograma que se muestra en la Figura 7.7, representa el promedio mensual de precipitación pluvial, evaporación y temperatura de la estación climatológica de Alchichica, durante el periodo 1967–1996. El Climograma muestra como la evaporación mensual supera a la precipitación pluvial durante todo el año. Esto indica que la cantidad de agua mensual captada por el lago-cráter Alchichica, siempre va a ser menor que la que se evapora, lo cual se reflejará en el abatimiento del espejo de agua.

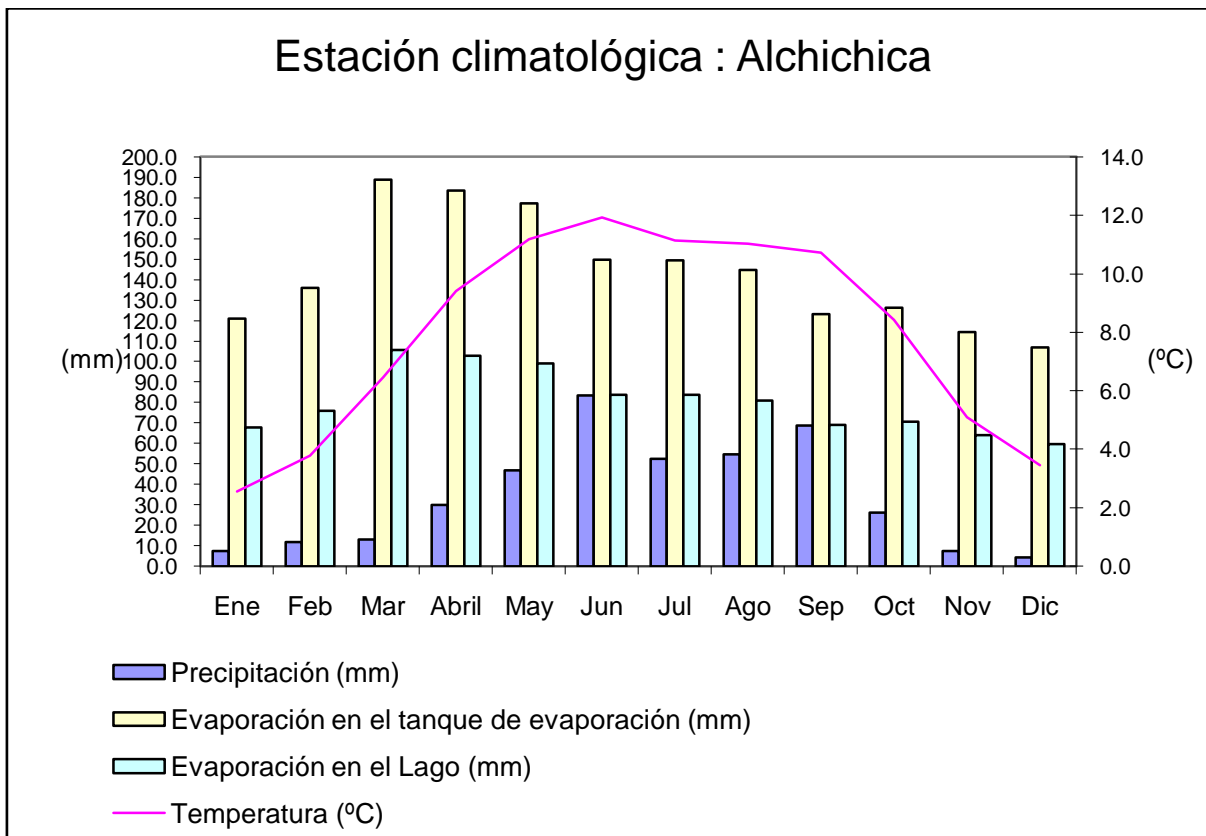


Figura 7.7. Climograma representativo del promedio mensual de las variables Climatológicas: precipitación, evaporación y temperatura (periodo 1967–1996).

7.7. Modelo conceptual del lago–cráter Alchichica.

La Figura 7.8, muestra, el modelo conceptual de las entradas y salidas de agua presentes en el área de estudio y su interacción con el acuífero de la zona. El acuífero en la región de Alchichica es de tipo granular (Carrasco-Núñez et al., 2007), con un alto poder de infiltración, ya que al caer la lluvia se infiltra tan rápido que no da paso a la escorrentía superficial (Gasca, 1981, citado por Alcocer *et al.*, 2005). Por este motivo y de acuerdo, a la morfología del área de estudio se despreció la salida superficial, así como el flujo de salida subterránea, de la ecuación de balance. Por lo tanto, usando la Ec. (7.11), se obtiene:

$$P_L + P_{Cráter} + I_G - E_L - ET_{RCráter} - \Delta S - v = 0,$$

y

$$\Delta S = -412,218.67m^3 / año.$$

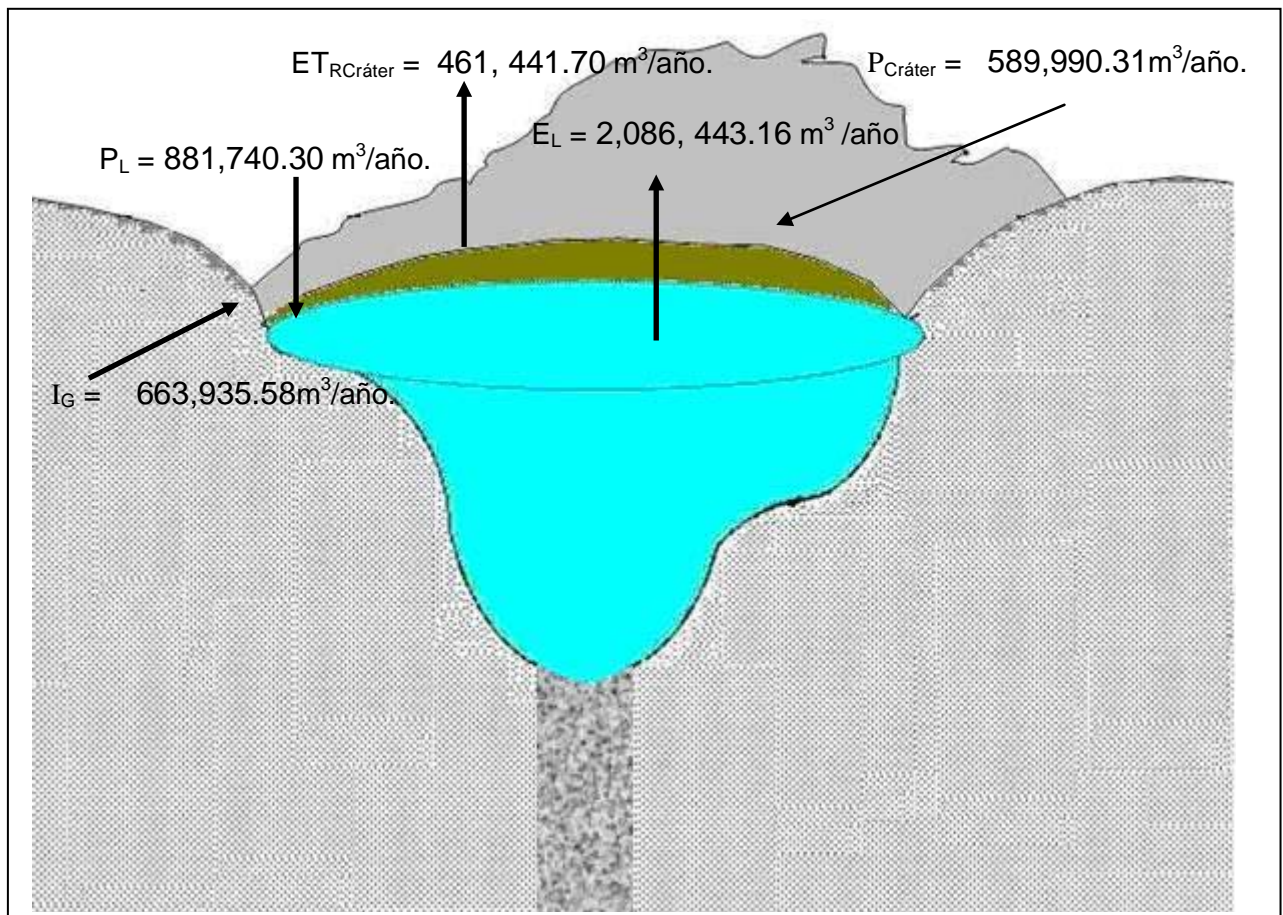


Figura 7.8. Modelo conceptual del lago-cráter Alchichica.

Esta cantidad representa el déficit, del volumen de agua en el lago-cráter Alchichica.

Dividiendo ΔS entre el área total del cráter (Tabla 6.1), obtenemos:

$$(- 412, 218.67 \text{ m}^3/\text{año.}) / (3, 615,157.48 \text{ m}^2) = - \mathbf{0.11 \text{ m/año.}}$$

Al multiplicarse la tasa del déficit anual de agua del lago-cráter por el periodo de 30 años correspondiente (1967–1996), y tomando en cuenta los datos piezométricos (1996), se obtiene una estimación del abatimiento del lago-cráter de Alchichica, para este periodo. Así, el abatimiento estimado para el lago-cráter en 30 años es de:

$$(- 0.11 \text{ m/año.})(30 \text{ años}) = - \mathbf{3.42 \text{ m.}}$$

7.8. Resultados.

La Tabla 7.6, muestra los elementos usados en el balance hídrico del lago-cráter Alchichica y los resultados obtenidos para el periodo de estudio (1967–1996).

Tabla 7.6. Balance y abatimiento: lago-cráter Alchichica.

Balance (1967 - 1996) 30 años		
Preipitación Media anual =	0,4071	m/año
Evaporación Media anual =	1,7202	m/año
Área de la boca del Cráter =	3615157,48	m ²
Coeficiente de evaporimetro Clase "A" =	0,56	
Área del lago-cráter =	2165905,92	m ²
Área Terrenal, interna del lago-cráter =	1449251,56	m ²
$\sum Entradas - \sum Salidas = \Delta S$		
Entradas		
Precipitación captada por el lago-cráter =	881740,30	m ³ /año
Precipitación captada por el área terrenal =	589990,31	m ³ /año
Flujo subterráneo =	663935,58	m ³ /año
Suma =	2135666,19	m³/año
Salidas		
Evaporación der lago-cráter =	2086443,16	m ³ /año
Evapotranspiración real ET _R =	461441,70	
Suma =	2547884,86	m³/año
ΔS =	-412218,67	m³/año
(ΔS/Área de la boca del cráter) =	-0,11	m/año
Abatimiento h =	-3,42	m

7.8.1. Proyección del Balance hídrico para los años 2004, 2006 y 2010.

Tomando en cuenta la superficie del cráter (Tabla 1., Apéndice V), y considerando constantes la precipitación media anual, la evaporación media anual, la evapotranspiración real media anual y el flujo subterráneo, se calculó la

proyección del balance hídrico para los siguientes periodos: 38 años (1967–2004), 40 años (1967–2006) y 44 años (1967–2010). Tablas (7.7 – 7.9).

Tabla 7.7. Proyección del balance hídrico y abatimiento: lago-cráter Alchichica.

Balance (1967 - 2004) 38 años		
Preipitación Media anual =	0,4071	m/año
Evaporación Media anual =	1,7202	m/año
Área de la boca del Cráter =	3615157,48	m ²
Coficiente de evaporimetro Clase "A" =	0,56	
Área del lago-cráter =	2142865,92	m ²
Área Terrenal, interna del lago-cráter =	1472291,56	m ²
$\sum Entradas - \sum Salidas = \Delta S$		
Entradas		
Precipitación captada por el lago-cráter =	872360,72	m ³ /año
Precipitación captada por el área terrenal =	599369,89	m ³ /año
Flujo subterráneo =	663935,58	m ³ /año
Suma =	2135666,19	m³/año
Salidas		
Evaporación del lago-cráter =	2064248,46	m ³ /año
Evapotranspiración real ET _R =	468777,63	
Suma =	2533026,09	m³/año
ΔS =	-397359,90	m³/año
(ΔS/Área de la boca del cráter) =	-0,11	m/año
Abatimiento h =	-4,18	m

Tabla 7.8. Proyección del Balance hídrico y abatimiento: lago-cráter Alchichica.

Balance (1967 - 2006) 40 años		
Preipitación Media anual =	0,4071	m/año
Evaporación Media anual =	1,7202	m/año
Área de la boca del Cráter =	3615157,48	m ²
Coeficiente de evaporímetro Clase "A" =	0,56	
Área del lago-cráter =	2146000	m ²
Área Terrenal, interna del lago-cráter =	1469157,48	m ²
$\boxed{\sum Entradas - \sum Salidas = \Delta S}$		
Entradas		
Precipitación captada por el lago-cráter =	873636,60	m ³ /año
Precipitación captada por el área terrenal =	598094,01	m ³ /año
Flujo subterráneo =	663935,58	m ³ /año
Suma =	2135666,19	m³/año
Salidas		
Evaporación del lago-cráter =	2067267,552	m ³ /año
Evapotranspiración real ET _R =	467779,7416	
Suma =	2535047,29	m³/año
$\Delta S =$	-399381,10	m ³ /año
$(\Delta S/\text{Área de la boca del cráter}) =$	-0,11	m/año
Abatimiento h =	-4,42	m

Tabla 7.9. Proyección de balance hídrico y abatimiento: lago-cráter Alchichica.

Periodo de 44 años (1967 - 2010).		
Precipitación Media anual =	0,4071	m/año
Evaporación Media anual =	1,7202	m/año
Área de la boca del Cráter =	3615157,48	m ²
Coefficiente de evaporimetro Clase "A" =	0,56	
Área del lago-cráter =	2138000	m ²
Área Terrenal, interna del lago-cráter =	1477157,48	m ²
$\sum Entradas - \sum Salidas = \Delta S$		
Entradas		
Precipitación captada por el lago-cráter =	870379,80	m ³ /año
Precipitación captada por el área terrenal =	601350,81	m ³ /año
Flujo subterráneo =	663935,58	m ³ /año
Suma =	2135666,19	m³/año
Salidas		
Evaporación del lago-cráter =	2059561,056	m ³ /año
Evapotranspiración real ET _R =	470326,9416	
Suma =	2529888,00	m³/año
ΔS =	-394221,81	m³/año
(ΔS/Área de la boca del cráter) =	-0,11	m/año
Abatimiento h =	-4,80	m

7.9. Línea de Interfase salina.

Considerando las diferentes propiedades del agua dulce (acuífero) y salada (lago Alchichica), se calculó la profundidad a la cual se encuentra la línea de la interfase salina (1996), mediante las aplicaciones de Ghyben–Herzberg (Ghyben, 1889; Kerzberg, 1901) y el de Glover (Glover, 1964), para los pozos 14 y 23 (Apéndice VI).

Para esto, se realizaron mediciones de las densidades respectivas (acuífero, lago-cráter). Se tomaron muestras del agua que fluye del manantial, ubicado a un costado de lago-cráter (Fotografía 1, Apéndice VI). Así, como 10 muestras de agua en la superficie del lago-cráter y 10 más, a 2 m de profundidad

(Fotografía 2., Apéndice VI). Distribuidas (Tabla 1. Apéndice VI), alrededor del mismo.

A continuación, se promediaron las lecturas de ambas muestras de agua, obteniéndose los siguientes resultados:

$$\text{Densidad de agua del manantial } \rho_m = 0.997 \frac{\text{kg}}{\text{Lit.}}$$

$$\text{Densidad del agua del lago } \rho_L = 1.008 \frac{\text{kg}}{\text{Lit.}}$$

Posteriormente se cálculo profundidad a la que se encuentra la línea de la interfase salina; mediante la relación de Ghyben–Herzberg, en cada pozo.

$z_{14} = -766.7$ m, por debajo del nivel del Lago.

$z_{23} = -513.00$ m, por debajo del nivel del Lago.

Y usando el modelo de Glover, la profundidad obtenida es:

$z_{14} = -796.06$ m, por debajo del nivel del Lago,

$z_{23} = -580.41$ m, por debajo del nivel del Lago.

8. ANÁLISIS, DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

8.1. Análisis de los resultados.

En el estudio de la variabilidad climática sobre las variables físicas (temperatura y precipitación) de la estación climatológica Alchichica, se determinó que la presencia de la variabilidad climática, fue significativa para la temperatura, en presencia de los eventos (El Niño y La Niña), comparada con los años neutros

(años sin La Niña y El Niño) manifestándose en el primero, por un incremento en la temperatura y disminución de la misma, en el segundo. En lo que respecta, a la precipitación, se muestra una disminución significativa en presencia del evento El Niño. En cada caso, para confirmar la presencia de la variabilidad climática, se aplicó el discriminante estadístico (Prueba de las varianzas inversas de Fisher), para un nivel de confianza del 95% (valor crítico $\alpha = 0.05$).

Para conocer cuándo se presentó mayor evaporación, se comparó el valor promedio de las tres muestras, tomando en cuenta el número de eventos (años neutros, años La Niña y años El Niño). Observándose, que durante la presencia de El Niño el valor promedio de evaporación es mayor, no obstante el número de eventos. Por lo que se concluye que en presencia de El niño, se presentan los siguientes escenarios:

- Incremento en la temperatura.
- Déficit en la precipitación.
- Incremento en la evaporación.

Que impactan sobre el lago–cráter Achichica ocasionando un abatimiento en los niveles del mismo. Alcalá (2004), establece que el abatimiento del lago–cráter es de 4.5m. Los resultados de los abatimientos obtenidos en el balance hidrogeológico se muestran en la Tabla 8.1.

Tabla 8.1. Abatimientos del lago–cráter Alchichica.

Años	Abatimiento
	m
1996	3.42
2004	4.18
2006	4.42
2010	4.80

De los cuales se puede ver que el valor calculado para el 2004, es aceptable, comparado con en valor estimado en campo.

Sin embargo, es conveniente recordar que el clima de la región es semi-árido, que la cantidad de evaporación supera a la precipitación pluvial y la sequía meteorológica existente, así como el crecimiento demográfico, implican una mayor extracción de agua subterránea.

8.2. Discusión de los resultados.

Los resultados de la sequía meteorológica, muestran los efectos de la variabilidad climática en las variables climatológicas (temperatura y precipitación pluvial). Estos efectos impactan al sistema hidrológico como un incremento en la variable climatológica de evaporación, afectando los cuerpos de agua al aire libre. Tal y como se ha planteado en este estudio.

Durante el desarrollo del balance, se determinaron las variables climatológicas de evapotranspiración real y potencial. La primera, se reproduce realmente en cada caso y la segunda, es la que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas. La evapotranspiración potencial, no aplica en la zona de estudio ya que la cobertura vegetal es escasa. Cabe recordar que el clima de la región es semi-árido. Por lo tanto, en el cálculo del balance de agua del lago-cráter Alchichica se aplicó la evapotranspiración real.

Para llegar a los resultados obtenidos durante el balance, fue necesario multiplicar por el nuevo índice de 0.56, obtenido después de reducir el 20% al índice de 0.7. Dado que el clima de la región de estudio es semi-árido.

Los resultados obtenidos, comparados con el valor estimado en campo (4.5 m), son concordantes.

8.3. Conclusiones.

- La presencia de variabilidad climática en la región de estudio es evidente. Afecta las variables climatológicas de temperatura y precipitación durante los eventos La Niña y El Niño.
- El impacto del efecto climático, sobre la evaporación en el lago-cráter Alchichica se manifiesta en un incremento en la evaporación del cuerpo de agua, ocasionando el abatimiento del nivel estático del mismo. Así lo confirman los resultados, obtenidos en el balance de agua del lago-cráter Alchichica (Ver Tabla 8.1).
- Se confirma la sequía meteorológica, sobre el área de estudio, originada por el déficit de precipitación pluvial. Ocurre en presencia del evento El Niño, propiciando una disminución de la precipitación pluvial, e incremento en la evaporación.

A continuación se presenta la Tabla 8.2.

Tabla 8. 2. Análisis comparativo de los eventos La Niña y El Niño, con los años Neutros, período (1967- 2001).

	Alchichica		
	Temp.Med	Precip_Med	Evapor_Med
	°C/año	mm/año	mm/año
Promedios	8.1	423.7	1709.3
Promedios	7.4	415.6	1667.2
Promedios	8.2	375.1	1805.7
	= Año Normal, 14 eventos		
	= Niña, 8 eventos		
	= Niño, 11 eventos		

BIBLIOGRAFÍA

Alcocer J., Lugo A., 2003. "Efects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central Mexico". *Geofísica Internacional*, Vol. 42 Núm. 3, pp. 523 – 528.

Alcocer J., Escolero O., Marín L., 2005. "Problemática del agua de la cuenca Oriental, Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala". Texto: El Agua en México Vista desde la Academia. Academia de Ciencias. Edición digital 2005. Pag. 57–77, de 411 paginas. http://cisnex.sytes.net/amc/amc_agua.pdf#page=72

Alcalá R. A., 2004. "Estudio Hidrogeológico de Alchichica, Estado de Puebla". Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura, No. de paginas 52.

Ayala–Carcedo F. J., 2001. "Impactos del Cambio Climático sobre los recursos hídricos en España y variabilidad del Plan Hidrológico Nacional 2000", en Arrojo ed. *El Plan Hidrológico Nacional a debate*, Bakeaz, Fundación Nueva Cultura del Agua, pp. 51 – 66.

Arredondo, F. J., L. Borrego, R., Castillo y M. Valladolid, 1983. "Biótica Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México". *Biótica* Vol. 8. No.1, pag. 31-47.

Arya S. Pal, 2001, *Introduction to Micrometeorology*, Academia Press.

Anderson, R. R. 1954. Energy budget studies, p. 71–119. In *Waterloss investigations: Lake Herfner studies*. Tech. Rep. U. S. Geol. Surv. Prof. Pap. 269. USGS.

ArcView. GIS., 1995. Versión 3.2. Software para Sistema de Información Geográfica Copyright © 1990 -1998. Esri, Inc.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirement – FAO Irrigation and drainage paper 56. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>

Allen Richard G., Pereira, Luis S., Raes Dirk, Smith Martin, 2006. “Evapotranspiración del cultivo”. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. © FAO 2006. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Rome, 2006. , pág. 316.

Blanken, P. D., Rouse, W. R., Culf, A. D., Spence, C., Boudreau, L. D., Jasper, J. N., Kochtubajda, B., Scertzer, W. M., Marsh, P., Versegny, D., 2000. Eddy covariance measurements of evaporation from Great Slave Lake, Northwest Territories, Canada. *Water Resources Research* 36 (4), 1069 – 1077.

Bradbury, J. P. 2000. Limnologic history of Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México for the past 48,000 years: impacts of climate and man. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* , 163:69–95.

Bradbury, J. P., 1997. Sources of glacial moisture in Mesoamerica. Copyright © 1997 Published by Elsevier Ltd. U.S. Geological Survey, MS 980 Box 25046 Federal Center, Denver, CO 80225, U.S.A.

Budyko, M.I., 1974. *Climate and Life*. Academia Press, New York. 508 pp.

Bijlsma, J. 1996. Effects of climate change on coral reefs. Contribution to IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996. *Climate Change 1995 – Impacts, Adaptation and mitigation of Climate Change: scientific technical analysis*. Contribution of Working Group II to the second Assessment of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.

Blaney, H. F. and Criddle, W. D. 1950. Determining water requirement in Irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA soil Conservation Serv. SCD – TP 96.

Barakat, F., Handoufe, A. 1998. Approche agroclimatique de la Sécheresse agricole au Maroc. *Sécheresse* 9(3): 201-208.

Bergaoui M., Alouini, A. 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique: Cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse*, 12(4): 205-213.

Bergkamp, G., Orlando B. 1999. "Los humedales y el cambio climático".
<http://www.ramsar.org/indexsp.htm-21k> .

Bootsma A., Boisvert, J., Baier, R. 1996. La sécheresse et l'agriculture canadienne: une des moyens d'action. *Sécheresse*, 7(4). 277-285.

Cano C. M., 2007. "Evolución del Volcán Hoya de Estrada". Tesis para obtener el grado de Maestra en Ciencias de la Tierra. Centro de Geociencias UNAM. Campus Juriquilla.

Carrasco-Núñez G, H.Michael, Romero C., 2007. "Evolution and hydrological condition of a maar volcano (Atexcac crater, Easter Mexico)". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 159(2007) 179 – 1997.

Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2006. Cuenca Oriental.
http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_070.html

Caballero M., Vilaclara G., Rodríguez A., Juárez D., 2003. "Short – term climatic change in lake sediments from lake Alchichica, Oriental Mexico". *Geofísica Internacional*, Vol. 42, Núm. 3, pp. 529 – 537.

CLICOM, 1999, Version 3.1. Software de Base de datos climatológicos.

Comisión Nacional del Agua (C. N. A), 2002. "Determinación de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Libres–Oriental, Estado de Puebla". Subdirección de Evaluación y Modelación Hidrogeológica.

Canales A. G. y A. Islas L., 2005. "Disponibilidad sostenible de agua subterránea a partir del control de las descargas de un acuífero". Revista Latinoamericana de Recursos Naturales, pp. 41-48.

Coe Michael T, Birkett Charon M, 2004. "Calculation of river discharge and prediction of lake height from satellite radar altimetry: Example for the Lake Chad basin". Resources research, vol. 40.

Custodio E., Llamas M. R., 1996."Hidrología Subterránea". Editorial Omega, Vol. I., 1157 Pags.

Custodio E., Llamas M. R., 1983."Hidrología Subterránea". Editorial Omega, Vol. II., 1165 – 2308 Pags.

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), 1992., sitio web: <http://www.unfccc.de>

Darcy H., 1956. Les fontaine publiques de la ville de dijon: París, V. Dalmont, 674 pp.

Domenico P. A., Schwarts F. W., 1990. "Physical and Chemical Hydrogeology". Copyright © 1990 by John Wiley & Sons, Inc., 824 págs.

El manejo de las aguas subterráneas. RAMSAR, 2007., sitio web: http://www.ramsar.org/lib/lib_handbooks2006_s09.pdf.

Feetter C.W., 1999. "Contaminant Hydrogeology". Segunda edición. Heditorial Prentice Hall; ,500 págs.

Fritschen, L. J. 1966. " Energy balance Method". Proceedings, American Society of Agricultural Engeniens Conference on Evapotranspiration and its role in Water Resources Management, December 5 – 6, Chicago, IL. St. Joseph, MI.pp 34 – 37.

García V. H., Reyes V. A., Yanez G. C., 1979. "Termometría y Batimetría de las Lagunas situadas en la cuenca Libres–Oriental". Brigada de Evaluación y Estudios especiales; Proyecto geotérmico Los Humeros– Derrumbadas. Comisión Federal de Electricidad.

García E., 2004. "Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Copen". Serie de libros del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Quinta edición, v. No. 6, 90 Págs.

Geological U.S. Survey. Scientific Investigations Report 2006-5252. "Evaporation from Lake Mead, Arizona and Nevada", 1997–99. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2006.

<http://www.usgs.gov/pubprod>.

Geología de México, 2005.

<http://www.coremisgm.gob.mx/educacion/edgeologia.html>

Guitjens, J. C. 1982. " Models os alfalfa yield and evapotranpiration", J Irrig. Drain. Div. Porc. Am. Soc. Civ. Eng., 108 (IR3) 212 – 222.

Harbeck, G. E., Jr.. 1962. A parctical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass- transfer theory, Geological Survey Professional Paper 272 – E. U. S. Government Printing Office, Washington , D. C. pp. 101 – 105.

Hernández C. M. E., Torres T. L. A. y Valdez M. G., 2000. "Sequía Meteorológica". Instituto de Geografía, UNAM., y Facultad de Ciencias, UNAM.

http://ccaunam.atmosfcu.unam.mx/editorial/libros/cambio_climatico/index.html

Holman P. I, 2006."Climate change impacts groundwater recharge-Uncertainty, shortcomins, and the way forward?" Institute of Water and Environment, Granfield University, Hydrogeology Journal 14, pp. 637-647.

Hargraves, G. H., 1974. Estimation of potential and crop evapotranspiration. Trans. ASAE 17: 701 – 704.

Israde, I. A., V. H. Garduño-Monroy, y M. R. Ortega, 2002. Paleoambiente lacustre del cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo Late cuaternary lacustrine paleoenvironment in the centre of lake Cuitzeo. *Hidrobiológica*, 12 (1)61:78

Islebe G.A., Hooghiemstra H., van 't Veer R. 2005. Historia holocénica de la vegetación y del nivel de agua en dos turberas de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. En: Kapelle M., Horn S.P. (Eds). *Páramos de Costa Rica*. Editorial INBio. Costa Rica. pp. 237-252.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1975, Guadalupe Victoria E14b35, Fotografía Aérea a escala 1:50,000, Zona E14-3 Veracruz, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1995, Guadalupe Victoria E14b35, Fotografía Aérea a escala 1:75,000, Zona E14-3 Veracruz, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1995, Guadalupe Victoria E14b35, Ortofoto a escala 1:20,000, Zona E14-3 Veracruz, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2002, Veracruz E14 – 3, Carta Hidrológica a escala 1:250,000; Veracruz, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2003, Guadalupe Victoria E14b35, Carta Topográfica a escala 1:50,000; Veracruz, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2006, Guadalupe Victoria E14b35, Fotografía Aérea a escala 1:40,000, Zona E14B Veracruz, INEGI

Instituto Nacional de Ecología (INE). 2005. Cambio Climático en México.

http://cambio_climatico.ine.gob.mx/faq.html#11

Ikebuchi Shuichi, Seki Mazakazu, Ohtoh Akiyoshi, 1988, "Evaporation from Lake Biwa". *Journal of Hydrology*, 102, pp. 427-449.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 1996). *Climate Change 1995 – Impacts, Adaptations and mitigation of Climate change: scientific technical analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge.

Jensen, M. E. and Haise, H. R. 1963. Estimation evapotranspiration from solar radiation. *J. Irrig. And Drain. Div. ASCE*, 89:14 – 41.

Kohler, M. A., Nordenson, T. J. and Fox, W. E. 1995. "Evaporation from pans and lakes". *Weather Bureau Research Paper 38 US Department of Commerce, Washington, D. C.*

Leng M. J, Metcalfe S. E., and Davies S. J., 2005. "Investigating Late Holocene climate variability in central Mexico using carbon isotope ratios in organic materials and oxygen isotope ratios from diatom silica within lacustrine sediments". *Journal of Paleolimnology* Núm. 34, pp. 413–431.

Lioubimtseva E., 2004. "Climate change in arid environments: revisiting the past to understand the future". *Progress in Physical Geography* 28, pp. 502-530.

Lenters J. D., K. Kratzb T., J. Bowserc C., 2005. "Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA)". *Journal of Hydrology*, Núm. 308, pp.168–195.

Likens, G. E., Johnson, N. M., 1969. Measurement and analysis of the annual heat budget for the sediments in two Wisconsin lakes. *Limnology and Oceanography* 14, 115 – 135.

Ludlow-Wiechers B., Almeida-Leñero L. and Islebe G. 2005. Paleoecological and climatic changes of the Upper Lerma basin, Central Mexico during the Holocene. *Quaternary Research*. 64: 318-332.

Lozano-García, M.S. and Xelhuantzi-López, S., 1997. Some problems in the pollen records from central Mexico- The basin of Mexico and Zacapu. *Quaternary International*, 43/44:117-123.

Lozano-García, M.S., Sánchez Colón, R., Xelhuantzi-López, S. y Cruz-Cisneros, R., 1995. El polen de *Alnus* como posible indicador de condiciones paleoecológicas. *Investigaciones recientes en Paleobotánica y Palinología*. Colección Científica, INAH. 294: 63-76.

Lozano-García, M. A. S. y Xelhuantzi-López, S., (sin año). Tendencias climáticas de los registros palinológicos del Pleistoceno Tardío y Holoceno en la faja volcánica transmexicana.

<http://www.igeofcu.unam.mx/pagumec/taxco/slg2.htm>

Lozano-García, M. A. S., Sosa, S. N. Y Ortega, B. G., (sin año) Pollen and magnetic susceptibility. Records from southern basin of Mexico, lake Chalco. <http://www.igeofcu.unam.mx/pagumec/taxco/slg.htm>

Maderey R. L.E., Jiménez R. A., 2006."Los Recursos Hidrológicos del Centro de México ante un Cambio Climático Global" Instituto de Geofísica de la UNAM.

Maderey R. L. E., Jiménez R. A., M. E. Cea H y C. Torres R., 1995."Aplicación de un modelo climatológico para conocer la disponibilidad de agua en cuencas de clima húmedo en la República Mexicana", ante el Cambio Climático. Segundo taller de Estudio de País: México, Cuernavaca, Morelos, México. Pp. 159 – 164.

Magaña V. O., Vázquez J.L., Pérez J. L. y Pérez J. B. 2002. " Impact of El Niño on precipitation in Mexico". *Geofísica Internacional*(2003), Vol. 42, Num. 3, pp. 313–330.

Miranda S., Leal Ma. T, 2003. " Estudio de la reducción de la evaporación mediante un método químico". Anuario IMTA.

Mosner M. S. and T. Aulenbach B., 2003, "Comparison of Methods used to estimate Lake Evaporation for a Water Budget of Lake Seminole, Southwestern Georgia and Northwestern Florida" . Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference, at the University of Georgia.

Metcalf, S. E., 1997. Paleolimnological records of climate change in Mexico: frustrating past, promising future?
<http://www.igeofcu.unam.mx/pagumec/taxco/sem.htm>.

Metcalf, S. E., O ' Hara, S. L., Caballero, M., y Davies, S. J. 2000. Records of Late Pleistocene - Holocene climatic change in Mexico - a review. Quaternary Science Reviews, 19:699 - 721.

Ministerio del Medio Ambiente de España, 1997. "Protocolo de Kyoto de Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". Series y Monografías, sitio web:
<http://www.unfccc.de/resource/docs/natc/spanc2.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente de España, 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Series y Monografías, sitio web:
<http://www.unfccc.de/resource/docs/natc/spanc2.pdf>.

Nathenson M., 1992. "Water balance for Crater Lake, Oregon". OPEN-FILE REPORT 92-505. This report is preliminary and has not been reviewed for conformity with U.S. Geological Survey editorial standards or with the North American Stratigraphic Code.

Ngatcha B. N; Mudry, Jacques, 2005. "Climate variability and impacts on an alluvial aquifer in a semiarid climate, the Lgone-Chari Plain(south of Lake Chad)". International Association of Hydrological Sciences, pp. 94 -100. Fuente: Regional hydrological impacts of climate change.

Nigel W. Arnell, 2003. "Relative effects of multi-decadal climatic variability and changes in the mean and variability of climate due to global warming: future streamflows in Britain". *Journal of Hydrology* 270, pp. 195–213.

Nordenson, T. J. 1968. Preparation of co-ordinated precipitation, runoff and evaporation maps. Ginebra WMO (Report N° 6, projects WOM).

National Drought Mitigation Center. (2000). <http://drought.uni.edu> University of Nebraska, Lincoln, United States of America.

NOAA, 2009. "ENSO Cycle: Recent Evolution, Current Status and Predictions". Climate Prediction Center / NCEP 20 April 2009.
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history>

NOAA, 2009. "Episodios de Enfriamiento y Calentamiento, por Estación". Centro de Predicción Climática de la NOAA(EEUU).
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml#history>

NOAA , 2007. Fenómeno "La Niña". Centro de predicción Climática de la NOAA (EEUU).
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>

Ordóñez E., 1905. "Los Xalapazcos del Estado de Puebla". Instituto Geológico de México; imprenta y fototipia de la Secretaría de Fomento. Callejón de Betlemitas No. 8. 408 Pag.

Ortega-Ramírez J. R., Valiente-Banuet A., Urrutia-Fucugauchi J., Mortera-Gutiérrez C. A. Alvarado-Valdéz G., 1998."Paloclimatic Changes during the Late Pleistocene-Holocene in Laguna Babícora, near the Chihuahua Desert, Mexico". *Canadian Journal of Earth Sciences* 35 (10), pp 1168-1179(1998)., sitio web:
<http://rparticle.webp.cisti.nrc.ca/rparticle/AbstractTemplateServlet?calyLang=eng&journal=cjes&volume=35&year=1998&issue=10&msno=e98-060>

Ortega-Gutiérrez, F.(1992). Carta Geológica de la República Mexicana. 5ª ed. 1992. [México D. F.]: Consejo de Recursos Minerales y en el Instituto de Geología de la U N A M.

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (PICC, 2001). Cambio Climático 2001: La base científica — Contribución del Grupo de trabajo I al Tercer informe de evaluación del IPCC 2001., sitio web:
<http://www.ipcc.ch/>

Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (PICC, 2001). Cambio Climático 2001: Informe de síntesis., sitio web:
<http://www.ipcc.ch/pub/ipccwg1s.pdf>.

Patterson, J. 1999. Wetlands and climate change. Feasibility investigation of giving credit for conserving wetlands as carbon sinks. Wetlands International Special Publication 1, pág. 35.

Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London A, 193, 120 – 145.

Philander, S. G. H., y E. M. Rasmusson. 1985. The Southern Oscillation and El Niño, Adv. Geophys. 28A, 197-215.

Qin Boqiang, Qun Huang, 1998. "Evaluation of the Climate Change Impacts on the Inland Lake-a case study of Lake Qinghai, China". Climate Change 39, pp. 695-714.

Reyes C. M., 1979. "Geología de la Cuenca de Oriental". Puebla–Veracruz–Tlaxcala Departamento de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia. Colección Científica Prehistoria 71, México, 62 pag.

Rodríguez S. R., Siebe C., Komorpwski J. C., 2002. " The quetzalapa Pumice: a voluminous late Pleistocene rhyolite deposit en the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt". Journal of Volcanology and Geothermal Research 113 (2002) 177-212.

Riggs N., Carrasco-Nuñez G., 2004. "Evolution of a complex isolated dome system, Cerro Pizarro, central México". Bull volcanol(2004) 66; 322 – 335.

Ramírez G. P., Vázquez G. F., 1988., "Contribuciones al Estudio Limnobotánico de la Zona Litoral de seis Lagos Cráter del Estado de Puebla". Contribución No. 640 del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Rincón G. P., Algélvis de M., Álvarez C.C., Chacón N., Vivas J. y Alva M., 2008. "El fenómeno de La Niña". Universidad de los Andes Táchira.
http://servidor-opsu.tach.ula.ve/profeso/maldo_h/pass/2008/e_f_nina.pdf

Small E.E., Giorgi Filippo, Cirbus Sloan Lisa, Hostetler Steven, 2001, "The Effects Desiccation and Climatic Change on the Hidrology of the Aral Sea". Fuente: Journal of Climate 14, no.3 pp. 300-322 Tipo de doc.: Journal Bibliotecas de todo el mundo: 472.

Sánchez San R. F. J., 2006, "Evapotranspiración". Dpto. de Geología de la Universidad de Salamanca.
<http://web.usal.es/javisan/hidro>.

Sancho y Cervera, J., Zavala, Z. F., V. M. Sánchez, y V. V. Martínez, Monitoreo de sequías y heladas, México, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Dirección de inventarios de agua y suelo, Proyecto IA 800/, 1980,. pp. 14-16.

Schot P., Winter T., 2006, "Groundwater–surface water interactions and wetlands for integrated water resources management". Faculty of Geosciences, Utrecht University, P.O. Box 80.115, 3508TC Utrecht, The Netherlands. Journal of Hydrology 320, pp. 261–263.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH., 1981). “Informe Geohidrológico del Valle de Perote”. Jefatura del Programa Hidráulico Residencia de Geohidrología. Delegación General del Estado de Veracruz.

Surfer, 2002. Version 8.01. Software for Surface Mapping System. Copyright © 1993 - 2002. Golden Software Inc.

Stanley N. Wiest, 1971. “Hidrogeología”. , Ediciones Ariel Barcelona, versión castellana de Francisco Javier Martínez Gil, 563 págs.

SOAPAP., 1997, “Estudio de las Fuentes de Abastecimiento para el Suministro de Agua Potable para el Programa de Desarrollo Regional Angelópolis”.

Sene, K. J., Gash, J. H. C., McNeil, D. D., 1991. Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements. *Journal of Hydrology* 127, pp.193 – 217.

Sene, K. J., Tate E.L., Farquharson F.A.K., 2001. “Sensitivity studies of impacts of Climate Change on white Nile Flows”. Fuente: *Climatic Change* 50, no.1-2 , pp. 177-208 Tipo de doc.: Journal Bibliotecas de todo el mundo: 380.

Standard, D. I., Rosenberry, D.O., 1991. A comparison of short term measurements of lake evaporation using eddy correlation and energy budget methods. *Journal of Hydrology* 122, pp. 15 – 22.

Sturrock, A. M., Winter, T. C., Rosenberry, D. O., 1992. Energy budget evaporation from Williams lake – a closed lake in North Central Minnesota. *Water Resources Research* 28 (6), pp. 1605 – 1617.

Singh V. P. and C.- Y.XU. 1997. “Evaluation and Generalization of 13 Mass – Transfer Equation for determining Free Water Evaporation”. *Hidrological Processes*, Vol. 11, 311 – 323.

Torres R. E., 1995. “Agrometeorología”. Editorial Trillas; Primera edición, 154 págs.

Turc, L., 1954. Le bilan d'eau des sols. Relation entre les precipitation, l'évaporation et l'écoulement. Annales Agronomiques 5:491 - 596.

Turc, L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour. (in French). Ann. Agron. 12:13-49.

Thornwite, C. W.,1948. An approach towards a racional classification of climate. Geogr.. Rev., 38: 55 – 89.

Tecnociencia, 2009. "Tipos de Sequía".
<http://www.tecnociencia.es/especiales/sequia/tipos.htm>.

Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open wather, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London A, 193: 120 – 145.

Urrutia–Fucugauchi, J., Sin año. Depositos Holocenicas de la región semi-arida de la laguna de Babicora (LAT.29°.15'N; 108°.00'O): Implicaciones Paleoclimáticas.
<http://www.igeofcu.unam.mx/pagumec/taxco/jor.htm>

Urrutia–Fucugauchi, J . Ortega–Ramírez, Cruz–Gatica, 1997. "Rock-magnetic study of Late Pleistocene- Holocene sediments from the Babícora lacustrine basin, Chihuahua, northern Mexico". Laboratorio de Paleomegnetismo y Geofísica Nuclear, Instituto de Geofísica UNAM, México. Vol. 36, 2, April-June, 1997., sitio web:<http://www.geofisica.unam.mx/divulgacion/geofinternacional/iframes/anteriores/1997/02/ortega.html>.

UNESCO, 1998. Evaluación de los recursos hídricos.
<http://www.unesco.org.uy/phi/libros/manual.pdf>

UNESCO, ROSTLAC. 1982. "Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur". Oficina Regional Ciencia y Tecnología, Unesco para América Latina y el Caribe". Montevideo, Uruguay. 173 p.

Vilaclara G., Chávez M, Lugo A, González H, Gaytán M. 1993. "Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla state, Mexico". *Verh. Int. Ver. Limnol.* 25: 435–440.

Vavrus S. J., Wynne R. H., Foley J. A., 1996. "Measuring the sensitivity of southern Wisconsin lake ice to climate variation and lake depth using a numerical model. *Limnol. Oceanogr.*, 41(5), pp. 822 – 831.

Villegas C. A., 2007. "El Holoceno en México". Colegio de la frontera Sur unidad Chetumal.

http://w2.ecosur-qroo.mx/cna/investig/El_Holoceno_en_M%C3%A9xico-avc.doc

WMO – No.100, 1983. "Guide to climatological Practices". Secretariat of the World Meteorological – Geneva – Switzerland. Second Edition, pp. 198.

http://www.wmo.ch/pages/prog/wcp/ccl/guide/guide_climat_practices.html

WMO – No.100, 2007. "Guide to climatological Practices". Secretariat of the World Meteorological – Geneva – Switzerland. Draft Third Edition, pp. 117.

<http://www.wmo.ch/pages/prog/wcp/ccl/guide/guide.2e/WMOno100.pdf>

Watson R. T., Albritton D. L., y muchos otros autores y revisores del IPCC. 2001."Cambio climático 2001: Informe de síntesis". Resumen para Responsables de Políticas. <http://www.ipcc.ch/pub/ipccwg1s.pdf> .

Wikipedia, 2007. Cambio Climático.

http://es.wikipedia.org/wiki/Cambio_clim%C3%A1tico#Causas_de_los_cambios_clim.C3.A1ticos

Winter, T. C., 1981. Uncertainties in estimating the water balance of lakes. *Water Resources Bulletin* 17 (1), 82 – 115.

Winter, T. C., Rosenberry, D. O., Sturrock, A. M., 1995. "Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in north central United States". *Water Resources Research* 31, pp. 983 – 993.

Winter T. C, Buso D. O. Rosenberry D., E. Likens Gene, M. Sturrock A., Jr., Mau D. P., 2003. "Evaporation determined by the energy-Budget method for Mirror Lake, New Hampshire". *Limnol, Oceanogr.* , 48(3), pp. 995-1009.

Walker Lan R. and Pellatt Marlow G. 2003. "Climate Change in Coastal British Columbia- a Paleoenvironmental Perspective". *Canadian Water Resources Journal*. Vol. 28, No. 4.

Whitmore, T. J., M. Brener, J. H. Curtis, B. H. Dahlin y B. W. Leyden. 1996. Holocene climatic and human influences on lakes of the Yucatan Peninsula, Mexico: an interdisciplinary palaeolimnological approach. *The Holocene*, 6,3:273-287.

Young, A. A. 1947. "Evaporation from water surface in California; summary of pan records and coefficients, 1881–1946", Bulletin 54. Public Works Department, Sacramento, CA.

Zimmermann E, 2006. "Bayesian approach to daily rainfall modeling to estimate monthly net infiltration using the Thornthwaite water budget and Curve Number methods". *Hydrogeology Journal* 14, pp. 648-656.

APÉNDICES

Apéndice I.

Información climatológica media mensual (temperatura, precipitación y evaporación).

Tabla 1.

Estación Alchichica: Temperatura media, promedio mensual (°C).													
			Latitud N				Longitud W				Altitud		
			(gms)				(gms)				(msnm)		
			19	24	21.1		97	24	3.1		2317		
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
1967	2,3	3,4	4,3	8,6	11,3	12,2	11,2	11,3	10,7	9,0	4,4	4,3	
1968	0,9	2,3	4,5	9,4	11,2	11,8	10,6	10,7	10,7	8,5	5,7	4,7	
1969	9,5	7,5	8	8	9	8	7	8	9	8,5	6,5	7,5	
1970	2,4	4,4	7,8	10,5	9,5	12,7	11,7	10,9	11,2	8,6	2,6	1,4	
1971	1,5	2,5	4,7	7,7	10,8	12,4	11,3	10,1	11,6	8,9	5,2	4,1	
1972	3,4	2,3	6,1	8,9	11,7	12,7	12,4	11,0	10,5	8,5	7,8	3,5	
1973	1,1	3,9	8,2	10,9	10,7	11,6	11,5	11,5	10,7	9,8	5,0	1,7	
1974	1,5	2,1	4,6	8,5	10,7	11,0	9,3	9,6	9,2	6,9	2,6	2,1	
1975	1,6	3,8	6,3	8,0	11,1	11,8	10,9	10,3	9,8	7,9	3,3	1,8	
1976	0,4	-0,3	5,1	9,2	10,5	11,3	11,8	10,4	10,3	8,4	6,8	3,4	
1977	0,5	3,0	5,3	7,5	9,4	10,3	9,7	10,3	9,9	9,5	4,8	4,5	
1978	2,2	3,6	5,6	9,4	11,9	12,1	11,5	11,2	11,2	8,5	5,5	3,8	
1979	1,8	5,0	7,4	10,1	11,2	11,3	12,3	11,5	9,7	5,5	5,9	3,7	
1980	3,0	2,6	6,6	10,0	13,7	12,1	12,3	11,9	11,5	7,9	4,7	1,8	
1981	1,8	3,2	8,4	9,7	12,8	13,7	12,2	12,0	11,0	9,4	3,3	4,5	
1982	2,6	4,5	6,5	10,2	12,8	12,0	11,4	10,3	10,1	9,5	3,5	1,5	
1983	2,7	2,8	5,7	10,3	13,0	12,8	12,4	12,0	11,9	9,1	7,7	3,8	
1984	3,4	4,7	7,4	10,9	11,5	12,5	11,6	11,4	11,9	8,4	4,4	2,5	
1985	2,4	3,9	6,7	9,7	10,6	12,4	11,2	11,2	10,7	9,5	4,0	4,6	
1986	0,0	2,6	4,6	8,9	12,6	12,5	10,3	10,3	11,1	9,3	6,2	3,8	
1987	2,5	6,1	8,9	9,8	11,1	12,6	12,3	11,6	11,6	5,3	4,6	3,7	
1988	2,9	4,0	8,5	11,4	11,2	12,8	11,4	12,3	10,0	8,0	2,9	2,9	
1989	1,4	2,2	4,2	7,0	10,5	12,4	10,5	11,3	11,1	6,5	5,8	3,8	
1990	3,4	5,4	6,3	10,0	11,5	11,4	10,8	11,0	10,8	8,7	5,5	1,9	
1991	4,0	4,4	7,1	10,5	11,4	12,1	10,9	10,3	11,1	9,2	4,8	4,3	
1992	5,1	4,9	7,6	10,4	10,7	11,9	11,6	11,0	11,3	8,7	8,1	3,3	
1993	4,2	5,3	6,8	9,5	10,7	12,8	11,5	11,5	11,6	9,0	5,7	2,6	
1994	2,5	4,8	7,5	9,3	10,5	11,5	9,9	11,7	9,8	8,5	4,2	3,5	
1995	4,2	5,1	6,5	10,3	11,7	11,8	11,5	12,7	10,4	7,7	6,7	4,6	
1996	1,8	3,6	6,8	8,8	10,3	11,8	11,2	11,5	11,4	9,7	5,4	4,3	
1997	3,1	5,6	8,3	11,7	11,3	12,1	12,3	11,5	11,5	9,2	8,5	6,5	
1998	4,5	4,5	6,7	10,9	10,3	11,0	11,5	10,6	12,5	10,7	7,7	2,8	
1999	2,1	2,5	6,2	7,9	8,8	10,2	10,4	10,2	9,9	8,0	5,0	3,7	
2000	1,4	2,4	5,3	6,2	9,8	11,6	8,8	10,3	9,2	8,0	6,7	2,3	
2001	2,2	3,9	5,9	8,4	9,6	11,7	10,1	10,9	10,8	9,4	6,0	4,8	
Promedio	2,6	3,8	6,5	9,4	11,0	11,8	11,1	11,0	10,7	8,5	5,3	3,5	

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Tabla 2.

Estación Guadalupe Buenavista: Temperatura media, promedio mensual (°C).													
			Latitud N				Longitud W				Altitud		
			(gms)				(gms)				(msnm)		
			19	22	32.0		97	21	37.9		2365		
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
1962	4,5	6,6	9,2	10,3	11,4	13,1	14,0	12,4	13,1	10,6	5,8	6,6	
1963	3,5	4,1	8,8	9,6	12,5	14,6	14,0	13,2	12,6	10,6	8,1	5,7	
1964	6,9	7,9	10,8	12,6	14,2	16,2	15,6	14,0	12,5	8,5	7,8	6,0	
1965	3,5	6,9	8,4	12,3	14,5	15,9	14,7	15,0	13,2	11,4	8,2	6,3	
1966	3,7	5,9	7,6	11,3	13,9	15,2	14,3	14,3	13,1	10,8	7,2	6,3	
1967	3,9	4,9	6,8	10,3	13,2	14,4	14,0	13,5	13,0	10,3	6,2	6,2	
1968	2,9	4,6	7,0	11,1	13,6	14,0	13,6	13,0	12,1	9,7	7,2	7,0	
1969	3,9	8,2	10,5	12,2	13,0	13,7	14,1	13,6	13,9	10,2	6,0	5,1	
1970	4,3	5,9	9,0	11,4	11,1	14,0	12,8	12,4	12,7	9,7	3,0	1,5	
1971	3,2	4,8	6,5	8,5	11,0	12,7	11,5	10,9	12,9	9,9	6,0	5,5	
1972	4,1	3,8	7,3	9,9	11,6	13,3	12,4	11,5	11,6	9,2	8,8	5,0	
1973	3,7	5,1	9,6	12,1	12,8	12,4	12,5	12,6	11,6	10,8	7,1	4,2	
1974	3,8	4,7	6,8	10,3	13,1	13,0	10,9	10,3	9,2	8,2	4,5	3,9	
1975	3,7	5,2	7,8	9,9	12,0	13,2	11,5	11,1	10,6	8,5	4,6	3,7	
1976	2,3	1,7	6,3	10,2	10,9	11,7	12,3	11,2	11,2	9,7	8,1	4,8	
1977	4,4	5,2	7,2	8,4	11,0	12,2	11,4	10,8	11,0	9,6	6,1	5,1	
1978	3,2	6,6	7,0	10,2	12,6	13,5	13,0	12,0	12,1	9,7	8,0	6,1	
1979	4,0	6,3	7,6	10,7	12,2	12,4	13,1	12,4	10,7	6,1	7,1	5,6	
1980	5,6	5,3	8,1	9,5	12,4	10,8	13,0	13,0	11,5	7,0	5,6	2,8	
1981	4,1	6,7	10,1	11,3	12,7	13,7	13,5	13,3	10,7	9,0	4,4	6,3	
1982	4,5	8,5	9,8	10,6	12,0	9,6	11,4	11,7	9,7	9,1	7,3	7,5	
1983	8,0	7,6	9,4	11,0	11,9	9,5	7,7	11,4	12,1	9,4	9,0	5,3	
1984	6,3	7,9	10,0	10,6	11,3	11,5	9,8	12,1	12,7	10,0	9,0	8,9	
1985	9,7	10,3	11,2	11,2	11,4	11,3	11,2	11,8	11,3	10,5	7,3	6,5	
1986	2,6	5,1	6,1	10,6	13,3	13,4	12,7	11,7	11,3	9,2	8,7	7,0	
1987	4,5	7,0	10,1	9,2	11,8	12,5	13,0	12,0	12,4	5,7	6,9	5,7	
1988	5,0	6,8	10,1	9,7	12,2	12,6	12,8	11,8	11,9	6,2	6,5	5,7	
1989	5,5	6,6	10,1	10,2	12,6	12,7	12,6	11,6	11,4	6,8	6,2	5,7	
1990	6,0	6,3	10,1	10,8	13,0	12,9	12,3	11,4	10,9	7,3	5,8	5,7	
1991	6,5	6,1	10,2	11,3	13,4	13,0	12,1	11,2	10,4	7,9	5,5	5,7	
1992	6,1	9,8	13,0	13,0	11,2	13,1	12,0	10,6	10,3	9,3	10,5	5,3	
1993	5,9	5,9	10,6	11,8	14,0	12,9	13,1	12,1	11,5	10,0	8,2	4,6	
1994	4,5	8,0	9,9	11,3	13,4	13,2	12,7	12,4	10,7	9,6	6,5	6,0	
1995	6,2	5,7	10,0	11,3	15,0	13,3	11,6	12,6	12,0	10,3	9,1	7,0	
1996	2,9	5,5	8,5	11,6	13,2	12,6	11,8	11,3	11,4	10,3	6,9	4,5	
1997	4,8	7,0	10,1	11,8	12,3	13,2	13,6	13,4	11,0	9,7	9,3	7,5	
1998	6,2	6,7	8,5	13,9	15,3	17,8	14,4	13,3	13,4	11,1	7,6	3,6	
1999	3,5	5,2	8,2	13,6	15,1	13,5	13,8	12,9	11,8	8,3	6,0	6,9	
2000	4,3	5,0	8,5	10,6	14,3	13,7	12,9	10,9	11,0	7,9	8,7	3,9	
2001	4,5	5,2	7,5	11,1	12,6	14,1	13,3	11,6	10,7	9,8	8,2	6,7	
2002	4,3	6,1	9,5	9,6	10,8	12,9	13,7	13,6	11,8	10,2	5,7	7,9	
Promedio	4,7	6,2	8,9	10,9	12,7	13,1	12,7	12,2	11,7	9,2	7,0	5,6	

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Tabla 3.

Estación Zalayeta: Temperatura media, promedio mensual (°C).													
			Latitud N				Longitud W				Altitud		
			(gms)				(gms)				(msnm)		
			19	24	2.6		97	22	5.9		2300		
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
1966	6,1	9,1	10,9	11,4	12,5	13,6	13,6	12,6	12,3	10,8	4,7	1,6	
1967	3,6	2,9	4,7	9,0	10,4	13,2	12,3	12,2	12,8	10,7	7,7	8,8	
1968	5,2	5,0	6,5	9,6	11,8	12,1	8,4	10,9	11,8	10,3	6,8	7,2	
1969	7,6	8,2	8,5	9,2	9,8	10,7	12,2	12,6	12,7	9,3	6,0	6,1	
1970	6,0	7,8	10,2	11,5	9,7	12,0	11,9	11,8	11,6	9,7	3,4	4,3	
1971	5,0	6,3	8,3	9,7	9,9	2,5	6,5	5,3	11,3	10,5	8,7	8,2	
1972	7,3	5,2	9,1	10,6	11,5	13,3	12,6	10,9	11,4	10,4	9,3	5,4	
1973	2,7	7,7	11,1	12,0	11,6	11,9	12,4	12,0	11,4	10,5	8,6	6,2	
1974	5,5	4,2	4,0	8,8	12,2	11,9	8,9	8,2	9,0	7,5	3,0	0,9	
1975	0,7	2,7	5,4	6,6	10,0	11,4	9,6	9,1	8,5	7,0	2,5	3,4	
1976	3,2	-0,5	3,1	7,3	9,0	9,3	9,5	8,7	8,9	6,2	5,6	4,0	
1977	0,6	3,3	5,4	4,8	7,8	9,4	8,9	5,6	9,5	9,0	4,6	3,9	
1978	2,2	4,1	4,3	6,2	9,0	11,6	10,7	9,1	9,7	8,6	7,9	6,2	
1979	1,5	5,3	6,5	9,3	9,0	9,7	10,5	9,7	8,7	5,4	6,7	4,5	
1980	3,1	3,2	6,1	7,8	11,7	10,0	9,6	10,8	10,7	8,1	5,5	0,3	
1981	1,7	4,9	9,2	10,8	11,2	12,8	11,8	11,0	10,6	9,3	0,5	3,5	
1982	3,1	6,5	7,6	12,0	13,1	11,1	10,6	9,2	9,1	8,8	3,5	1,5	
1983	4,1	2,1	3,6	6,4	6,9	7,1	9,8	8,7	9,2	5,6	5,1	1,0	
1984	0,3	2,5	3,0	4,2	7,6	8,6	8,8	7,6	10,2	4,6	-0,4	-1,8	
1985	-2,0	-0,2	2,5	6,6	5,3	7,8	8,1	7,3	6,6	5,7	0,8	2,1	
1986	-3,1	-2,8	0,0	3,5	8,0	10,0	9,2	9,3	9,7	8,7	4,8	1,1	
1987	-2,5	2,2	8,1	8,4	10,7	12,8	12,5	12,0	11,8	3,6	2,7	1,6	
1988	1,3	2,3	7,1	10,5	9,9	11,8	11,3	12,3	9,2	7,3	0,9	2,0	
1989	-0,1	-0,3	0,9	5,5	8,5	11,2	9,4	9,7	10,7	5,6	5,3	4,2	
1990	1,4	1,5	2,6	7,5	9,5	11,4	10,2	9,7	10,9	7,0	4,7	3,7	
1991	2,9	3,3	4,3	9,6	10,5	11,6	11,1	9,6	11,1	8,4	4,0	3,2	
1992	5,1	4,7	7,3	9,2	10,0	11,0	10,8	11,1	11,5	8,8	7,4	0,7	
1993	2,7	5,1	5,9	9,9	10,4	12,9	10,9	11,3	11,1	8,1	5,3	0,3	
1994	0,9	3,5	8,5	11,3	10,3	11,4	10,0	11,1	9,5	8,5	3,1	3,0	
1995	2,3	4,1	5,5	10,0	12,5	12,7	11,8	12,5	10,4	7,9	7,2	3,9	
1996	-1,0	2,9	7,1	8,4	7,8	11,2	10,4	10,8	11,0	8,6	5,9	4,2	
1997	0,9	4,9	9,0	9,7	9,1	9,1	10,7	9,2	9,8	7,7	8,5	4,7	
1998	2,2	2,0	4,0	6,4	5,4	9,2	9,8	9,7	12,6	10,5	6,9	2,2	
1999	1,5	1,6	4,7	7,6	8,6	9,7	9,1	8,5	9,6	7,5	5,6	1,0	
2000	1,2	2,5	4,7	5,7	9,5	10,8	7,8	9,7	8,2	5,6	3,4	1,5	
2001	0,7	2,0	4,8	4,7	7,8	9,5	9,9	10,3	9,6	8,5	5,0	4,0	
2002	3,3	4,3	5,1	4,9	6,3	8,9	9,1	8,5	10,0	8,7	4,0	4,9	
Promedio	2,4	3,6	5,9	8,3	9,6	10,7	10,3	10,0	10,3	8,1	5,0	3,3	

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Tabla 4.

Estación Alchichica: Precipitación pluvial, promedio mensual (mm).												
	Latitud N			Longitud W				Altitud				
	(gms)			(gms)				(msnm)				
	19 24 21.1			97 24 3.1				2317				
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1967	7,2	0,0	15,3	21	48,8	24,3	20,2	56,7	108,1	75,5	4,5	1,1
1968	10,1	31,3	2,4	87,1	37,8	105,6	27,4	32	47	13,8	4,8	17,5
1969	30,2	32,6	31,95	35	33,8	48,6	57,6	289,7	88,8	18,1	1	0,2
1970	2,6	11,7	0,0	0,0	23,4	113,7	43,4	71,8	104,3	4,3	0,0	0,0
1971	1,5	0,0	4	11,7	44,2	68,1	21,5	18,7	68,1	60,2	19,3	2,7
1972	1,7	0,0	28,3	25,3	78	90,4	49,2	27,6	65,6	12,6	31,4	3,9
1973	0,0	0,4	1	25,1	32,6	164,8	63	63,6	59,5	38,4	7,2	0,5
1974	0,3	0,0	30,6	58	84,2	106,1	89,4	9,2	176,9	0,3	1,1	0,0
1975	5,5	10,7	2,6	3,4	107	47,2	39,1	17,4	66,3	7	0,4	0,0
1976	0,0	12,3	1,9	110	86,9	64,8	105,5	61,4	22	75,6	0,3	1,2
1977	0,0	21,5	0,0	21,5	42,4	61,1	6,7	71,9	27,7	13,2	33,2	6,2
1978	5,5	3	29,7	19,8	26,9	150,7	39,9	44,9	113,9	19,7	7,3	2
1979	0,0	33,7	0,5	58,1	35,6	84,5	83,2	66,3	120,1	10	0,0	5,2
1980	5,7	0,0	0,3	31,7	53,5	38	34,4	84,7	94,4	23,4	6,7	0,0
1981	3,3	7,2	50,5	31	71,3	214,6	49,3	81,4	38,3	32,5	0,0	2,5
1982	0,0	30,4	19,8	49,3	50,3	60,7	18,9	11,8	13,4	19,6	1,8	0,0
1983	15,2	24,6	15,2	0,0	6,7	16,6	33,2	38,15	59,7	22,7	16,9	1,6
1984	26,3	9,3	25,6	0,0	22,6	29,2	80,4	34,5	161,1	5	3,5	1,3
1985	0,2	5,2	2,9	65,4	43,6	56,8	111,2	17	49,2	13,1	6	5,4
1986	1	7,8	0,0	37,4	40	39,4	19,5	6,4	24,8	28,6	24,5	4
1987	0,0	0,0	20,9	15,7	42,3	100,3	37,9	5,2	9,8	0,0	7	0,0
1988	1,9	6,1	8,6	11	67,2	62,9	31,4	74,4	106,6	3,4	0,0	0,0
1989	0,8	5	11,7	29,6	32,8	116,4	85	23,7	109,3	11,4	1,8	12,8
1990	7,2	50,8	19,2	29	47,3	31,7	78,9	48,1	60,9	17	0,5	0,0
1991	4	0,0	0,0	20	32,7	167,9	85,1	29,4	41,1	32,8	11,2	0,0
1992	51,6	3,6	34,8	45,8	108,4	59,4	57,7	22,2	55,4	52	22	1,9
1993	9,5	22,6	16,8	12,1	40,1	152,9	30,5	39,2	60,3	8,8	5,3	0,0
1994	0,6	0,0	0,0	16	34,1	115,3	11,4	94,2	28,4	19,2	2,1	0,2
1995	31,2	10,4	10,3	23,1	24,7	25,7	112,9	141,1	49,6	74,1	8,2	44,2
1996	0,0	12,7	11,5	10,4	7,1	87,6	54,2	54,8	31,4	75,5	0,0	17,5
1997	0,0	0,0	21,3	86,9	84,1	20,5	38	42,5	61,2	80,7	7,5	10,7
1998	8,3	1	0,0	1,2	0,0	36,85	73,7	19,2	130,7	21,3	13,8	0,0
1999	0,0	5	49	52,3	64,3	16,7	70,2	63,4	45,4	41,9	2,6	0,0
2000	0,0	0,0	12,4	34,9	16,2	69,2	10	86,7	52,5	1,4	7	4,5
2001	0,0	1,8	0,0	18,1	35,8	105,4	33,4	76,7	113,6	23,5	0,0	15,5
Promedio	6,6	10,3	13,7	31,3	45,9	78,7	51,5	55,0	70,4	27,3	7,4	4,6

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Tabla 5.

Estación Guadalupe Buenavista: Precipitación pluvial, promedio mensual (mm).												
			Latitud N			Longitud W				Altitud		
			(gms)			(gms)				(msnm)		
			19	22	32.0		97	21	37.9		2365	
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1962	0,0	1,5	16,0	38,0	2,5	50,5	25,0	14,0	38,0	6,0	27,4	1,0
1963	0,0	0,5	0,0	11,0	14,0	29,5	60,5	33,8	16,0	21,5	5,5	0,0
1964	3,0	0,0	7,5	22,0	20,5	22,0	25,0	33,5	16,0	0,5	11,5	2,0
1965	15,0	5,0	37,0	4,5	13,0	85,5	26,0	42,5	19,0	12,8	0,0	21,5
1966	2,5	21,0	19,5	42,5	45,0	32,0	28,0	50,8	94,5	15,0	1,0	1,5
1967	4,0	0,0	15,5	40,5	26,0	20,5	13,5	48,5	85,5	58,5	0,0	3,0
1968	15,0	29,0	0,5	51,5	45,5	143,4	9,0	24,0	58,5	20,5	6,0	6,5
1969	17,0	24,3	31,5	46,0	38,5	28,0	27,0	146,5	50,5	25,5	0,0	0,0
1970	2,5	8,5	0,0	0,0	21,5	63,5	25,0	61,0	65,5	11,0	0,0	0,0
1971	0,5	0,5	1,5	8,8	30,5	48,5	9,5	14,5	38,0	72,0	13,5	10,5
1972	6,5	0,0	19,5	34,5	69,0	57,5	20,5	12,5	16,0	8,3	14,0	4,0
1973	0,0	0,0	3,0	18,0	27,0	141,0	105,5	67,0	39,5	43,0	10,0	0,5
1974	1,0	0,0	27,0	20,5	81,5	62,0	44,0	3,0	2,5	1,0	2,0	1,0
1975	9,0	19,0	0,6	5,8	96,6	48,5	50,0	9,0	61,5	12,6	1,0	0,0
1976	0,0	14,0	5,5	67,2	56,6	84,6	58,4	34,3	41,5	88,5	2,3	2,5
1977	0,5	13,8	0,0	13,8	43,5	71,2	7,5	47,1	11,0	15,1	32,2	10,0
1978	6,5	4,6	36,5	17,0	18,5	138,9	28,5	31,5	78,8	18,0	2,0	2,0
1979	0,0	19,0	1,5	40,5	19,5	42,5	66,5	39,5	143,5	8,0	0,0	4,0
1980	9,5	0,0	0,0	15,0	117,0	32,5	37,0	34,5	80,0	9,0	6,0	0,0
1981	8,5	3,5	52,0	16,0	27,5	224,0	34,0	47,0	41,0	49,0	1,0	3,0
1982	14,0	32,0	18,0	0,0	7,0	54,0	77,5	101,0	60,0	39,0	36,0	3,0
1983	32,0	26,0	10,0	3,0	117,0	101,0	38,0	5,0	179,5	1,5	3,0	0,0
1984	0,0	1,5	0,5	34,0	33,5	44,5	55,5	13,5	30,7	8,7	5,5	2,1
1985	0,4	2,0	0,0	78,5	56,1	52,4	11,5	13,7	30,8	37,4	35,4	0,4
1986	0,0	0,0	14,5	20,4	81,3	81,4	23,6	5,7	22,1	0,0	4,7	0,0
1987	0,0	0,0	0,0	17,7	23,5	106,9	97,0	25,4	91,5	57,7	21,9	0,8
1988	14,2	1,3	17,4	18,6	34,1	90,1	81,4	27,4	88,2	48,1	24,0	0,7
1989	28,5	2,6	34,7	19,5	44,7	73,3	65,7	29,3	85,0	38,6	26,0	0,6
1990	42,7	3,8	52,1	20,4	55,2	56,4	50,1	31,3	81,7	29,0	28,1	0,5
1991	56,9	5,1	69,4	21,3	65,8	39,6	34,4	33,2	78,4	19,4	30,1	0,4
1992	7,5	24,3	10,1	22,6	45,3	135,9	46,2	59,6	61,0	2,4	0,0	0,0
1993	0,0	3,2	5,1	24,9	45,1	71,5	1,3	25,4	42,2	11,1	0,0	0,0
1994	7,2	0,0	0,0	50,3	52,1	38,7	82,1	91,7	10,6	117,9	13,9	16,2
1995	0,0	5,1	0,0	6,0	13,8	133,9	49,5	65,5	11,6	72,7	6,2	11,0
1996	0,0	0,0	34,0	55,3	86,6	29,6	26,9	14,1	44,2	90,0	22,7	14,4
1997	3,8	2,1	0,0	4,0	0,0	27,2	93,8	34,0	141,7	110,8	20,4	0,0
1998	0,0	0,0	40,5	28,5	23,7	28,6	139,8	104,6	67,0	245,3	8,8	0,0
1999	0,0	0,0	35,3	21,2	59,5	55,2	11,8	88,6	47,6	0,0	13,0	11,7
2000	0,0	0,0	2,3	29,7	44,4	43,9	38,9	39,7	96,5	56,2	0,0	14,3
2001	3,1	0,0	1,8	14,3	50,4	90,6	21,0	6,0	167,2	31,0	16,5	21,9
Promedio	7,8	6,8	15,5	25,1	43,8	69,5	43,7	40,2	60,9	37,8	11,3	4,3

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Tabla 6.

Estación Zalayeta: Precipitación pluvial, promedio mensual (mm).													
			Latitud N				Longitud W				Altitud		
			(gms)				(gms)				(msnm)		
			19 24 2.6				97 22 5.9				2300		
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
1966	3,0	14,5	27,9	41,2	54,6	67,9	26,2	61,6	94,8	19,7	0,0	1,0	
1967	7,6	0,0	31,2	23,7	62,1	19,2	33,0	54,3	151,4	80,0	0,0	0,0	
1968	11,1	28,9	0,0	83,8	31,3	114,2	26,5	20,1	45,7	11,0	3,5	5,5	
1969	16,9	20,9	30,2	36,3	43,0	27,3	41,7	161,9	56,7	28,4	15,9	0,0	
1970	3,5	10,5	0,0	0,0	13,7	89,5	28,2	66,2	95,2	7,8	16,0	10,5	
1971	5,0	0,0	0,0	12,5	40,8	1,0	66,0	51,5	36,7	67,0	21,6	5,0	
1972	0,0	0,0	28,5	30,0	60,3	68,5	43,5	24,5	67,0	11,5	29,0	5,5	
1973	0,0	0,0	3,0	23,0	22,5	161,6	76,5	76,5	39,5	45,5	11,5	0,0	
1974	0,7	0,0	37,2	48,0	120,5	86,0	74,0	1,5	158,0	1,0	2,5	0,0	
1975	12,5	18,0	1,5	3,5	155,5	64,5	42,0	11,5	75,5	13,5	0,0	0,0	
1976	0,0	17,0	3,0	73,5	90,0	71,5	91,0	42,5	90,5	29,5	2,0	2,0	
1977	0,0	16,0	29,0	31,0	44,0	92,0	8,5	55,0	16,0	14,5	33,5	9,5	
1978	5,5	6,0	48,5	29,5	48,0	176,0	39,0	48,5	106,5	16,0	3,5	4,0	
1979	0,0	29,0	1,5	65,5	23,5	54,0	71,0	56,5	147,0	17,0	0,0	6,0	
1980	11,0	0,0	0,0	22,5	90,2	37,5	35,1	50,0	133,4	11,5	15,2	0,0	
1981	5,5	5,2	43,2	19,1	58,2	200,1	52,5	88,9	57,9	49,1	1,0	2,0	
1982	0,0	28,1	11,8	55,8	61,1	33,4	21,2	10,5	20,0	18,5	3,0	0,0	
1983	18,5	29,0	14,0	0,0	6,5	31,0	83,5	16,0	84,8	35,5	18,0	1,0	
1984	35,5	5,0	24,0	0,0	105,5	86,5	83,0	11,5	166,0	8,0	5,0	0,0	
1985	0,0	2,0	1,0	66,0	51,5	46,0	89,5	41,0	49,0	14,5	0,0	0,0	
1986	3,0	4,5	0,0	43,5	44,5	43,5	9,0	10,5	18,1	11,2	31,0	0,0	
1987	0,0	0,0	20,0	26,5	17,0	101,2	17,0	2,0	10,0	0,0	8,7	0,0	
1988	0,0	6,0	12,5	13,5	71,5	69,5	38,5	88,0	97,5	3,0	0,0	0,0	
1989	1,5	4,5	13,2	55,0	28,5	135,5	80,5	27,0	110,5	2,0	0,0	0,0	
1990	1,5	4,8	6,6	33,0	35,0	151,3	100,3	22,5	81,8	26,0	10,8	0,8	
1991	1,5	5,0	0,0	11,0	41,5	167,0	120,0	18,0	53,0	50,0	21,5	1,5	
1992	52,0	6,0	61,0	33,0	120,0	36,0	57,0	30,5	49,0	49,0	23,0	0,0	
1993	12,0	24,0	13,5	17,0	33,0	146,0	26,0	35,5	75,0	5,0	6,0	0,0	
1994	0,0	0,0	0,0	13,0	29,0	103,0	10,5	77,5	32,5	10,5	3,5	0,0	
1995	28,0	8,5	14,5	23,0	16,0	11,5	92,0	146,0	39,5	92,5	7,0	39,5	
1996	0,0	11,0	10,0	9,5	5,5	88,5	31,5	44,5	29,0	57,0	1,0	18,0	
1997	0,0	0,0	20,5	66,0	75,5	14,0	46,5	31,0	25,5	91,0	5,0	10,5	
1998	11,0	0,0	0,0	2,5	0,0	9,0	74,0	20,5	126,5	55,5	17,0	0,0	
1999	0,0	0,0	7,5	10,5	13,5	16,5	26,0	38,5	60,5	281,5	5,5	0,0	
2000	0,0	0,0	10,0	16,5	32,5	72,5	13,0	114,0	64,0	2,0	10,5	3,0	
2001	0,0	4,0	0,0	16,5	46,5	97,0	68,5	60,0	142,5	21,5	0,0	15,5	
2002	0,0	4,5	3,0	8,0	24,0	43,5	24,5	21,5	87,5	44,5	8,0	0,0	
Promedio	6,7	8,5	14,3	28,7	49,1	76,6	50,5	47,0	75,5	35,2	9,2	3,8	

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Tabla 7.

Estación Alchichica: Evaporación mensual (mm).												
			Latitud N			Longitud W			Altitud			
			(gms)			(gms)			(msnm)			
			19 24 21.1			97 24 3.1			2317			
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1967	114,3	129,1	165,7	174,4	175,5	155,3	176,3	153,4	112,4	122,3	108,8	108,2
1968	96,4	121,8	195,4	154,9	158,2	132,6	152,9	139,6	112,8	116,2	118,1	114,8
1969	111,4	117,9	149,4	150,6	187,3	183,3	166,1	152,6	108,1	130,7	114,2	120,7
1970	121,3	117,5	215,7	191,1	179,3	144,9	142,3	131,7	106,0	126,9	117,6	106,1
1971	121,2	148,1	170,0	190,3	182,0	138,8	146,9	129,9	125,6	119,8	108,2	97,9
1972	107,0	151,8	186,1	191,4	170,2	156,7	125,8	132,0	135,3	130,3	109,1	105,1
1973	147,1	150,5	249,4	198,6	190,9	124,3	126,2	117,1	116,3	114,1	112,6	109,0
1974	114,0	136,2	183,5	172,3	169,0	115,0	135,9	154,9	113,7	118,5	108,2	104,8
1975	108,9	145,7	203,7	198,7	145,9	123,4	135,7	141,9	123,1	110,5	122,7	120,5
1976	117,5	113,7	180,5	152,0	151,7	140,2	141,0	138,1	129,5	115,4	101,3	104,0
1977	133,6	130,0	220,4	165,8	192,3	147,2	179,0	168,1	146,1	138,3	113,0	116,7
1978	139,1	150,2	182,0	215,8	211,0	138,7	159,4	167,9	107,0	107,7	105,5	110,6
1979	131,4	120,1	186,2	170,1	191,4	166,8	138,5	124,4	116,2	149,6	105,2	98,8
1980	109,1	151,4	219,3	186,4	161,7	157,4	166,9	142,2	108,4	145,7	111,5	103,9
1981	101,3	124,5	180,3	167,0	172,0	119,0	128,1	130,4	101,4	126,1	128,7	109,0
1982	135,8	140,8	183,5	192,3	154,6	194,4	159,8	163,8	139,5	117,3	119,2	122,9
1983	131,0	144,5	202,6	254,0	227,2	195,6	168,4	139,0	109,6	120,0	117,8	114,5
1984	105,9	139,3	195,7	242,6	92,2	131,6	141,3	130,2	91,1	136,5	99,2	97,7
1985	114,9	131,3	180,3	137,5	169,4	130,1	122,0	137,2	129,6	120,6	121,1	103,1
1986	116,7	147,7	220,0	183,0	159,6	161,3	171,3	186,1	131,4	121,5	110,6	120,4
1987	159,8	170,7	219,0	160,3	195,7	135,5	135,8	177,4	157,3	135,4	123,3	121,0
1988	136,1	153,9	172,9	206,7	178,5	127,9	143,1	135,5	137,9	127,8	139,7	116,7
1989	112,6	114,4	176,2	178,5	200,4	131,8	145,1	142,8	116,8	111,8	102,4	3,9
1990	128,3	116,8	147,8	191,5	182,4	178,8	136,2	139,1	124,6	120,9	113,7	110,6
1991	112,6	136,6	208,4	177,7	182,9	150,6	153,3	151,8	118,6	118,5	98,1	94,5
1992	104,0	129,6	155,6	137,4	149,0	160,9	141,5	148,3	134,0	132,2	108,4	118,6
1993	123,9	131,7	174,5	198,5	171,4	156,8	175,7	150,9	127,6	145,4	124,7	113,9
1994	111,9	134,1	177,8	160,8	205,1	161,5	181,7	137,2	131,3	124,6	132,2	111,7
1995	115,9	130,1	168,0	195,8	184,7	201,3	136,9	134,6	137,8	140,5	116,0	119,1
1996	141,8	144,4	193,4	204,0	220,6	126,1	152,4	144,5	143,1	140,6	121,9	105,8
1997	123,8	139,5	153,6	159,6	148,4	182,3	180,6	180,4	149,5	118,8	101,3	116,0
1998	142,3	183,7	229,2	248,2	265,8	216,2	166,5	152,8	94,1	91,6	111,7	115,8
1999	137,3	142,7	186,7	208,9	187,5	164,1	130,6	157,4	109,8	105,5	110,5	112,5
Promedio	122,1	137,6	188,9	185,4	179,2	153,0	150,4	146,5	122,6	124,3	113,8	107,5

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Tabla 8.

Estación Guadalupe Buenavista: Evaporación mensual (mm).													
			Latitud N				Longitud W				Altitud		
			(gms)				(gms)				(msnm)		
			19	22	32.0		97	21	37.9		2365		
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
1962	143,8	153,0	240,9	172,8	213,9	191,2	203,2	177,5	142,8	157,2	129,3	114,6	
1963	147,0	167,4	193,0	213,2	198,3	176,4	142,8	178,8	128,9	129,2	127,6	109,5	
1964	138,9	184,6	199,3	206,9	183,3	165,5	192,4	172,8	144,5	140,2	110,1	117,3	
1965	121,9	164,8	209,6	189,0	213,5	188,4	184,7	156,2	142,7	123,4	138,1	100,6	
1966	145,3	160,2	159,9	170,7	182,4	172,9	159,4	150,4	154,2	107,9	116,2	109,0	
1967	129,5	152,1	194,7	192,4	205,3	177,7	216,5	189,3	136,8	130,0	128,1	131,2	
1968	110,3	142,7	231,0	165,8	176,5	160,4	188,6	181,0	126,9	137,1	142,5	112,5	
1969	121,7	155,4	192,7	221,6	207,2	189,0	172,9	112,9	136,4	132,2	123,9	139,0	
1970	137,1	138,6	264,1	231,7	190,4	167,5	163,5	156,9	114,5	136,2	144,0	124,5	
1971	138,7	155,4	180,5	181,3	201,4	165,6	172,2	142,3	142,5	134,6	107,6	113,8	
1972	116,6	164,9	184,5	190,3	169,2	152,8	156,3	167,1	148,8	139,8	103,2	120,2	
1973	117,5	150,2	175,4	184,1	174,3	143,0	155,1	187,0	155,6	133,2	108,3	116,8	
1974	118,3	135,5	166,3	177,8	179,3	133,1	153,9	206,8	162,4	126,6	113,4	113,4	
1975	119,9	153,7	202,9	206,5	141,7	138,1	171,0	169,9	132,7	121,8	123,2	132,6	
1976	115,7	134,5	202,1	146,2	160,4	151,5	157,7	159,4	148,5	115,8	111,0	117,2	
1977	151,8	152,0	255,4	178,9	211,6	169,6	209,9	180,3	149,5	150,5	109,8	120,7	
1978	141,3	169,0	184,1	211,4	216,8	150,2	183,9	186,5	110,4	127,0	118,5	136,9	
1979	129,5	125,5	157,7	144,3	188,1	167,8	148,4	176,0	115,4	162,9	171,6	161,3	
1980	168,2	168,6	184,8	180,5	165,7	168,4	186,3	184,2	162,6	183,0	169,0	184,1	
1981	171,8	162,3	171,5	178,9	178,7	126,4	165,8	161,2	165,5	167,3	174,0	175,7	
1982	182,7	162,7	184,8	174,3	149,6	174,5	187,2	168,0	169,5	173,2	177,4	178,8	
1983	177,2	161,2	185,4	180,7	183,7	165,3	166,1	160,5	165,4	190,8	166,6	184,9	
1984	182,9	173,5	194,9	186,4	157,9	179,5	164,9	178,1	113,9	143,7	142,2	126,4	
1985	126,6	112,6	132,1	94,0	119,1	110,3	109,3	126,5	123,4	132,5	136,4	117,9	
1986	113,7	159,1	254,4	187,8	138,6	159,9	175,6	171,2	153,0	143,1	122,4	145,8	
1987	169,8	186,6	234,5	181,2	185,6	143,8	139,0	176,9	155,6	169,6	152,5	143,7	
1988	168,9	182,5	244,5	191,5	190,6	148,5	148,0	175,9	145,6	155,0	141,1	138,5	
1989	168,1	178,4	254,5	201,9	195,7	153,2	157,0	174,8	135,6	140,4	129,7	133,3	
1990	167,2	174,3	264,5	212,2	200,7	157,9	166,0	173,8	125,6	125,8	118,3	128,1	
1991	166,3	170,2	274,5	222,5	205,7	162,6	175,0	172,7	115,6	111,2	106,9	122,9	
1992	125,7	156,1	176,4	147,4	129,2	151,6	146,4	150,9	140,5	130,2	130,5	186,2	
1993	156,0	151,3	196,7	195,3	164,3	144,8	143,6	178,6	133,6	184,7	164,2	166,3	
1994	162,3	159,8	204,1	157,0	207,3	164,3	231,1	178,5	155,7	197,6	186,9	179,8	
1995	179,8	167,9	175,4	206,5	200,1	167,9	111,2	112,8	159,3	136,2	160,5	161,3	
1996	201,0	183,4	209,7	209,4	210,6	104,2	167,9	145,9	177,9	146,9	150,7	164,5	
1997	166,2	167,9	154,7	164,5	141,7	172,0	171,7	201,5	160,0	179,9	164,4	183,3	
Promedio	147,2	159,4	202,5	184,9	181,6	158,8	167,9	167,9	143,1	144,9	136,7	139,2	

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Tabla 9.

Estación Zalayeta: Evaporación mensual (mm).													
			Latitud N				Longitud W			Altitud			
			(gms)				(gms)			(msnm)			
			19 24 2.6				97 22 5.9			2300			
Años	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
1966	151,7	165,5	156,2	158,4	155,0	172,6	158,3	148,9	157,8	119,4	133,3	116,8	
1967	143,7	164,4	207,6	191,7	200,6	175,3	216,6	185,9	125,8	137,2	128,2	129,2	
1968	121,6	140,1	216,9	184,8	174,0	160,7	183,3	158,2	124,5	127,6	138,7	112,2	
1969	180,5	147,6	198,9	211,8	217,4	190,8	174,2	136,6	131,8	138,3	135,9	140,0	
1970	144,2	134,6	237,0	225,1	196,1	174,6	173,0	148,2	124,5	139,4	148,0	132,8	
1971	139,1	180,0	195,0	212,9	187,5	178,4	176,5	192,1	147,5	139,7	119,0	123,5	
1972	124,1	165,9	207,8	205,6	182,1	167,8	146,6	158,3	158,5	139,2	109,4	125,2	
1973	148,4	157,5	266,3	215,9	195,5	154,1	144,0	134,4	125,3	125,2	120,4	112,7	
1974	118,1	139,0	203,0	196,8	166,3	141,5	149,8	197,3	148,8	126,2	128,9	117,3	
1975	133,3	153,5	202,0	200,8	163,5	132,9	150,9	173,8	133,2	126,7	124,0	118,4	
1976	123,5	152,3	193,6	155,0	151,5	147,7	153,7	156,1	143,2	207,0	105,6	109,2	
1977	131,8	138,7	140,6	124,6	205,2	158,8	210,8	197,0	150,6	142,5	116,3	115,3	
1978	136,6	136,4	176,4	202,0	205,7	143,1	163,1	181,9	130,5	118,2	114,6	118,1	
1979	123,9	128,9	184,1	191,9	179,3	173,8	153,0	148,2	142,3	171,2	121,0	118,2	
1980	137,5	142,0	209,1	206,4	182,5	173,6	184,2	168,5	139,0	148,6	111,0	149,0	
1981	116,9	121,8	178,7	194,8	190,5	133,0	135,4	158,9	122,3	141,7	139,4	129,1	
1982	141,3	144,5	193,2	193,7	170,1	210,1	180,4	187,0	168,0	156,7	127,0	137,5	
1983	135,7	149,5	205,5	224,7	233,8	211,4	192,6	219,1	183,4	201,5	179,8	192,2	
1984	185,1	184,9	188,5	224,4	193,7	186,3	168,5	169,1	166,6	188,4	183,1	177,1	
1985	175,1	164,9	184,7	170,5	192,1	176,6	148,1	141,4	178,7	195,8	180,7	167,6	
1986	166,0	157,1	121,8	132,1	147,4	139,1	150,2	132,2	175,2	150,3	124,6	160,3	
1987	188,1	194,8	223,0	178,6	199,4	170,2	154,8	178,9	163,2	150,9	164,9	150,8	
1988	147,4	136,3	169,1	180,8	199,4	132,8	163,5	144,6	133,3	129,0	137,9	116,8	
1989	124,0	136,0	183,4	189,5	200,6	165,7	160,1	139,1	127,8	147,5	136,6	143,8	
1990	133,2	146,2	210,7	194,9	186,3	160,6	162,8	148,9	134,3	135,4	122,5	127,8	
1991	142,4	156,4	238,1	200,3	172,1	155,6	165,4	158,8	140,7	123,4	108,4	111,9	
1992	112,5	145,8	175,5	159,3	144,0	139,5	152,3	143,7	134,8	150,0	129,9	129,1	
1993	132,5	144,5	152,9	174,1	140,4	145,9	173,0	155,6	137,8	135,0	123,6	117,8	
1994	125,4	129,6	189,7	163,1	160,5	149,2	176,6	135,7	132,0	121,5	134,8	115,2	
1995	109,0	134,6	161,2	160,4	161,8	157,6	132,0	127,0	123,8	132,4	112,2	107,2	
1996	133,7	143,3	171,3	180,5	191,9	118,2	140,0	133,5	130,0	127,9	127,0	109,6	
1997	138,4	139,8	160,4	147,0	145,4	135,6	131,6	160,1	136,2	124,8	104,6	137,6	
1998	150,5	167,4	203,8	229,0	240,7	185,8	162,1	154,5	106,9	110,3	114,9	118,9	
1999	137,7	141,2	183,4	177,1	164,5	143,6	136,9	258,6	121,9	111,0	101,5	103,3	
2000	103,7	128,8	159,9	158,5	137,3	132,8	156,1	126,0	124,4	99,3	108,1	103,7	
2001	112,6	114,4	186,3	174,4	155,6	144,3	157,4	155,5	117,5	125,0	97,8	93,9	
2002	114,3	115,7	173,4	174,3	185,0	146,1	154,8	164,6	119,0	155,1	161,5	146,4	
Promedio	137,4	147,1	189,4	185,6	180,4	159,1	162,0	161,6	139,5	141,1	129,1	128,0	

Información tomada de la base de datos CLICOM.

Apéndice II.

Calculo del índice de severidad Meteorológica.

En la Tabla 7.2, se muestran los datos de precipitación mensual, correspondiente al año de 1967 y los datos de precipitación media mensual, del periodo considerado (1967–2001).

El siguiente ejemplo ilustra los pasos a seguir, para la aplicación de esta técnica (tomada de: Hernández *et al.*, 2000):

Tabla 7.2. Datos de precipitación mensual y datos de precipitación media mensual del periodo considerado (1967–1996).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
P	7,2	0,0	15,3	21,0	48,8	24,3	20,2	56,7	108,1	75,5	4,5	1,1
\bar{P}	6,6	10,3	13,7	31,3	45,9	78,7	51,5	55,0	70,4	27,3	7,4	4,6

1. Se calcula el promedio mensual (P) de la precipitación diaria registrada del periodo considerado para cada año.
2. Se calcula el promedio mensual (\bar{P}) del periodo considerado (1967–1996).
3. Se suman los valores promedios mensuales de precipitación pluvial “P” para cada año, menores que su media mensual correspondiente al renglón “ \bar{P} ”.
4. Se suman todos los valores promedio mensual del renglón “ \bar{P} ” que fueron mayores a los valores promedios mensuales sumados de la línea del renglón “P”.
5. Si $\left(\sum P - \sum \bar{P}\right) < 0.0$, hay sequía meteorológica.
6. Se calcula el índice de severidad (ecuación.7.1).

El paso 1 y 2 en este ejemplo, se muestran en la tabla 7.2.

Paso 3:

$$\sum P = 0,0 + 15.3 + 24.3 + 20.2 + 4.5 + 1.1 = 65.4$$

Paso 4:

$$\sum \bar{P} = 10.3 + 31.3 + 78.7 + 51.5 + 7.4 + 4.6 = 183.8$$

Paso 5:

$$\sum P - \sum \bar{P} = 65.4 - 183.8 = -118.4,$$

Como $\left(\sum P - \sum \bar{P}\right) < 0.0$, hay sequía meteorológica para este año (Alchichica, 1967).

Paso 6:

$$IS = \left| \left(\frac{118.4 - 183.4}{183.4} \right) \right| = 0.6.$$

Así, usando la técnica descrita anteriormente, se calcularon los índices para cada año del periodo de información correspondiente a cada estación climatológica.

Cálculo de evapotranspiración real (ET_R).

Ecuación de Turc.

Ecuación de Turc, diseñada para calcular la evapotranspiración real

$$ET_R = P / \sqrt{(0.9 + P^2 / L^2)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

ET_R = Evapotranspiración real en mm/año.

P = Precipitación en mm/año.

$L = 300 + 25t + 0.05 t^3$.

t = Temperatura media anual °C.

Tabla 5. Evapotranspiración real: estación Alchichica.

Año	Precip.	Temp.	P^2	L	L^2	ET_R
	mm/año	°C				mm/año
1967	382,7	7,8	146459,3	497,0	247012,9	313,2
1968	416,8	7,6	173722,2	492,8	242833,1	327,9
1969	667,6	8,0	445623,0	504,3	254293,4	409,9
1970	375,2	7,8	140775,0	498,1	248152,5	309,7
1971	320,0	7,6	102400,0	492,1	242194,6	278,2
1972	414,0	8,2	171396,0	508,7	258783,8	331,2
1973	456,1	8,0	208027,2	504,4	254446,5	348,0
1974	556,1	6,5	309247,2	465,0	216228,5	364,3
1975	306,6	7,2	94003,6	482,9	233227,5	268,6
1976	541,9	7,3	293655,6	484,4	234603,2	369,4
1977	305,4	7,1	93269,2	478,9	229378,4	267,2
1978	463,3	8,0	214646,9	504,1	254121,4	350,8
1979	497,2	7,9	247207,8	501,6	251596,7	362,4
1980	372,8	8,2	138979,8	507,6	257624,0	310,7
1981	581,9	8,5	338607,6	516,3	266573,7	395,0
1982	276,0	7,9	76176,0	500,9	250902,1	251,6
1983	250,6	8,7	62775,3	520,6	271065,8	235,5
1984	398,8	8,4	159041,4	512,9	263059,8	325,1
1985	376,0	8,1	141376,0	505,1	255172,3	311,8
1986	233,4	7,7	54475,6	495,1	245157,6	220,3
1987	239,1	8,3	57168,8	512,1	262220,9	226,1
1988	373,5	8,2	139502,3	507,8	257860,7	311,1
1989	440,3	7,2	193864,1	483,1	233423,8	334,7
1990	390,6	8,0	152568,4	504,3	254315,2	318,9
1991	424,2	8,3	179945,6	511,8	261915,9	336,7
1992	514,8	8,7	265019,0	521,6	272102,0	376,1
1993	398,1	8,4	158483,6	514,7	264898,2	325,2
1994	321,5	7,8	103362,3	498,5	248507,2	280,3
1995	555,5	8,6	308580,3	518,1	268479,3	388,0
1996	362,7	8,0	131551,3	504,5	254474,4	304,7
					Promedio =	318,4

Tabla 6. Evapotranspiración real: estación Zalayeta.

Año	Precip.	Temp.	P^2	L	L^2	ET_R
	mm/año	°C				mm/año
1967	462,5	9,0	213906,3	529,7	280595,6	358,7
1968	381,6	8,8	145618,6	523,7	274276,7	319,0
1969	479,1	9,4	229560,8	539,5	291067,3	368,7
1970	341,1	9,2	116349,2	533,1	284240,0	298,1
1971	307,1	7,7	94310,4	495,0	245040,2	270,9
1972	368,3	9,8	135644,9	548,6	300935,9	316,9
1973	459,6	9,8	211232,2	550,7	303236,0	363,7
1974	529,4	7,0	280264,4	477,9	228370,1	363,0
1975	398,0	6,4	158404,0	462,1	213569,2	310,6
1976	512,5	6,2	262656,3	456,6	208507,2	348,7
1977	349,0	6,1	121801,0	453,2	205432,4	285,6
1978	531,0	7,5	281961,0	489,6	239711,4	368,5
1979	471,0	7,2	221841,0	483,3	233548,4	346,3
1980	406,4	7,3	165161,0	483,9	234158,9	320,8
1981	582,7	8,1	339539,3	505,7	255713,7	390,4
1982	263,4	8,0	69379,6	503,7	253710,7	243,2
1983	337,8	5,8	114108,8	446,6	199438,5	278,4
1984	530,0	4,6	280900,0	416,3	173303,7	333,8
1985	360,5	4,2	129960,3	406,4	165123,0	277,5
1986	218,8	4,9	47873,4	422,7	178692,9	202,5
1987	202,4	7,0	40965,8	477,7	228172,0	194,8
1988	400,0	7,2	160000,0	481,8	232112,1	317,3
1989	458,2	5,9	209947,2	448,8	201428,9	328,8
1990	474,1	6,7	224770,8	469,3	220203,3	342,1
1991	490,0	7,5	240100,0	489,8	239876,6	355,4
1992	516,5	8,1	266772,3	506,6	256674,2	370,9
1993	393,0	7,8	154449,0	498,7	248652,4	318,6
1994	279,5	7,6	78120,3	493,0	243052,4	252,9
1995	518,0	8,4	268324,0	513,5	263631,7	374,0
1996	305,5	7,3	93330,3	484,4	234619,5	268,2
					Promedio =	316,3

Tabla 6. Evapotranspiración real: estación Guadalupe Buenavista.

	Precip.	Temp.	P^2	L	L^2	ET_R
	mm/año	°C				mm/año
1967	315,5	9,7	99540,3	547,8	300041,0	284,3
1968	409,4	9,6	167608,4	545,9	297968,2	338,5
1969	434,8	10,4	189007,6	564,5	318629,8	355,8
1970	258,5	9,0	66822,3	528,7	279517,8	242,2
1971	248,3	8,6	61652,9	519,4	269731,6	233,7
1972	262,3	9,1	68801,3	530,3	281267,6	245,2
1973	454,5	9,5	206570,3	542,8	294646,5	359,2
1974	245,5	8,2	60270,3	509,2	259268,9	230,7
1975	313,6	8,5	98345,0	515,6	265886,6	278,3
1976	455,4	8,4	207389,2	513,1	263316,7	350,6
1977	265,7	8,5	70596,5	517,1	267413,3	246,3
1978	382,8	9,5	146535,8	542,0	293787,0	323,7
1979	384,5	9,0	147840,3	529,1	279979,4	321,8
1980	340,5	8,7	115940,3	521,8	272234,1	295,7
1981	506,5	9,7	256542,3	546,1	298178,5	381,7
1982	441,5	9,3	194922,3	537,3	288702,5	351,8
1983	516,0	9,4	266256,0	538,3	289736,4	382,6
1984	230,0	10,0	52900,0	555,4	308492,8	222,2
1985	318,6	10,3	101506,0	563,2	317144,8	288,4
1986	253,7	9,3	64363,7	536,6	287986,0	239,4
1987	442,4	9,2	195717,8	535,3	286525,2	351,6
1988	445,3	9,3	198292,1	536,5	287829,7	353,3
1989	448,2	9,3	200883,2	537,7	289137,5	354,9
1990	451,1	9,4	203491,2	538,9	290448,4	356,6
1991	454,0	9,4	206116,0	540,2	291762,5	358,2
1992	414,9	10,4	172142,0	564,1	318253,1	345,6
1993	229,8	10,1	52808,0	556,3	309494,0	222,1
1994	480,7	9,8	231072,5	550,9	303490,9	372,9
1995	375,3	10,3	140850,1	564,1	318214,0	323,9
1996	417,8	9,2	174556,8	534,1	285238,5	339,8
					Promedio =	311,7

Cálculo de Evapotranspiración Potencial (ET_p).

(Ecuación de Turc modificada)

$$ET_p = \frac{(0.008)tRA + (0.66)t}{t + 15} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

ET_p = evapotranspiración mensual en mm por día (posteriormente debe multiplicarse por el número de días de cada mes).

t = temperatura media mensual en °C.

RA = Radiación recibida en una superficie horizontal situada en el límite superior de la atmósfera en cal cm^{-2} por día (valor medio para cada mes).

Tabla 1. Evapotranspiración potencial: estación Alchichica.

	RA	Ra					
	Latitud		Promedio.	t	Días - mes	ET_p	ET_p
	20°	19°	RA	°C		mm/mes	m
	cal cm^{-2} por día						
Enero	638	651	644,5	2,6	31	26,3	0,0263
Febrero	723	733	728	3,8	29	37,9	0,0379
Marzo	820	826	823	6,5	31	67,6	0,0676
Abril	893	894	893,5	9,4	30	90,4	0,0904
Mayo	926	923	924,5	11,2	31	106,7	0,1067
Junio	934	929	931,5	11,9	30	107,8	0,1078
Julio	930	926	928	11,1	31	106,8	0,1068
Agosto	909	908	908,5	11,0	31	104,1	0,1041
Septiembre	848	853	850,5	10,7	30	93,4	0,0934
Octubre	753	762	757,5	8,4	31	75,0	0,0750
Noviembre	655	667	661	5,1	30	45,4	0,0454
Diciembre	611	694	652,5	3,5	31	34,1	0,0341
					Promedio =	74,6	0,0746

Tabla 2. Evapotranspiración potencial: estación Guadalupe Buenavista.

	<i>RA</i>	<i>Ra</i>					
	Latitud		Promedio	<i>t</i>	Días - mes	<i>ET_p</i>	<i>ET_p</i>
	20°	19°	<i>RA</i>				
	cal cm ⁻² por día			°C		mm/mes	m
Enero	638	651	644,5	4,7	31	43,1	0,0431
Febrero	723	733	728	6,2	29	55,0	0,0550
Marzo	820	826	823	8,9	31	83,6	0,0836
Abril	893	894	893,5	10,7	30	97,4	0,0974
Mayo	926	923	924,5	12,4	31	113,1	0,1131
Junio	934	929	931,5	12,6	30	111,3	0,1113
Julio	930	926	928	12,2	31	112,5	0,1125
Agosto	909	908	908,5	11,9	31	108,8	0,1088
Septiembre	848	853	850,5	11,5	30	97,1	0,0971
Octubre	753	762	757,5	9,0	31	78,0	0,0780
Noviembre	655	667	661	6,9	30	56,0	0,0560
Diciembre	611	694	652,5	5,5	31	48,8	0,0488
					Promedio =	83,7	0,0837

Tabla 3. Evapotranspiración potencial: estación Zalayeta.

	<i>RA</i>	<i>Ra</i>					
	Latitud		Promedio	<i>t</i>	Días - mes	<i>ET_p</i>	<i>ET_p</i>
	20°	19°	<i>RA</i>				
	cal cm ⁻² por día			°C		mm/mes	m
Enero	638	651	644,5	2,4	31	24,6	0,0246
Febrero	723	733	728	3,6	29	36,3	0,0363
Marzo	820	826	823	5,9	31	63,3	0,0633
Abril	893	894	893,5	8,5	30	85,0	0,0850
Mayo	926	923	924,5	9,9	31	99,0	0,0990
Junio	934	929	931,5	10,8	30	102,0	0,1020
Julio	930	926	928	10,4	31	102,4	0,1024
Agosto	909	908	908,5	10,0	31	98,3	0,0983
Septiembre	848	853	850,5	10,4	30	91,4	0,0914
Octubre	753	762	757,5	8,0	31	72,4	0,0724
Noviembre	655	667	661	4,9	30	44,0	0,0440
Diciembre	611	694	652,5	3,5	31	34,1	0,0341
					Promedio =	71,1	0,0711

Tabla 4. Radiación solar total RA recibida en una superficie horizontal situada en el límite de la atmósfera, para periodos mensuales, en cal cm⁻² por día.

Latitud	Ene,	Feb,	Mar,	Abr,	May,	Jun,	Jul,	Ago,	Sep,	Oct,	Nov,	Dic,
55	147	271	469	702	890	976	691	777	546	326	169	114
50	217	243	534	746	910	982	945	812	605	397	240	181
45	289	414	594	785	926	986	955	843	659	465	312	253
40	362	483	650	819	937	986	961	868	708	531	384	326
35	434	549	701	847	943	981	962	888	752	593	455	399
34	448	561	710	852	944	980	962	891	760	605	470	413
33	463	574	719	856	944	978	961	894	768	617	483	428
32	477	586	728	861	944	976	960	896	771	629	497	443
31	491	599	737	865	944	974	959	899	783	640	511	457
30	505	611	746	869	944	971	957	901	790	651	525	471
29	519	623	754	872	943	968	956	903	797	662	538	486
28	532	635	763	876	942	965	954	905	804	673	552	500
27	546	646	771	879	941	962	952	906	810	684	565	514
26	560	658	778	882	939	959	949	907	816	695	578	528
25	573	669	786	884	938	955	947	908	822	705	592	542
24	586	680	793	887	936	951	944	909	828	715	604	556
23	600	691	800	889	934	947	941	909	833	725	617	570
22	613	702	807	890	931	943	938	909	839	734	630	584
21	625	712	813	892	929	938	934	909	844	744	642	597
20	638	723	820	893	926	934	930	909	848	753	655	611
19	651	733	826	894	923	929	926	908	853	762	667	624
18	663	743	832	895	919	923	922	907	857	761	679	637
17	676	752	837	896	916	918	917	906	861	780	691	650
16	688	762	842	896	912	912	913	905	864	788	703	663
15	700	771	847	896	908	906	908	903	868	796	714	676
10	757	814	869	892	894	873	879	891	881	833	769	737
5	810	852	883	881	854	834	845	873	887	864	819	894
0	857	883	891	864	818	791	805	848	886	888	863	846
-5	899	907	892	840	876	742	760	817	879	906	901	983
-10	934	926	887	810	730	689	710	780	886	918	934	934
-15	964	937	874	775	679	631	656	733	844	922	960	969
-20	987	942	855	733	623	570	598	690	817	920	980	998
-25	1004	940	830	687	564	506	536	638	784	911	994	1021
-30	1015	932	798	635	501	440	462	582	745	895	1000	1038
-35	1020	917	760	579	436	372	405	521	700	863	1001	1049
-40	1018	895	716	518	368	304	337	457	650	845	996	1054
-45	1011	868	667	455	300	236	268	391	595	810	984	1054
-50	999	835	613	388	231	169	201	323	535	770	968	1050

(Torres, 1995).

Apéndice III.

Aprovechamientos censados

Tabla 1. Aprovechamientos censados ubicados sobre la zona de estudio.

	ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	PROPIETARIO
1	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	JUAN SARABIA	LAURENTINO DE JESUS NERI
2	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 12 ALCHICHICA	SOCIEDAD EJIDAL
3	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 13 ALCHICHICA	SOCIEDAD EJIDAL
4	PUEBLA	TEPEYAHUALCO		AMBROCIO MENDOZA
5	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 6 ALCHICHICA	SOCIEDAD EJIDAL
6	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO LA VICTORIA	SABINO MONTE ROSAS CHAVEZ
7	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	EX-HACIENDA SAN ANTONIO ALCHICHICA	OCTAVIO LIMON ROSSAINZ
8	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO SAN ANTONIO ALCHICHICA	ALEJANDRO LIMON VAZQUEZ
9	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO SAN ANTONIO ALCHICHICA	FERNANDO LIMON VAZQUEZ
10	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LLANO SALITROSO POZO 1 FRC. 2	JUAN FERNANDO LIMON VAZQUEZ
11	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	EX-HACIENDA SAN ANTONIO TLALCHICHICA	JOBITA VAZQUEZ LARA
12	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO SAN ANTONIO ALCHICHICA	FAMILIA LIMON VAZQUEZ
13	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO CAMPO GRANDE	AUSTREBERTO RODRIGUEZ GONZALEZ
14	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 3 ITZOTENO	COMUNIDAD ITZOTENO
15	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LA LADERA CHICHICUAHUTLA	SERGIO MORENO MARTINEZ
16	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	PREDIO EL PIÑONAL	CARMEN GODOS RODRIGUEZ
17	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 2 ITZOTENO	COMUNIDAD ITZOTENO
18	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 1 ITZOTENO	COMUNIDAD ITZOTENO
19	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	EL ARENAL CHICHICUAHUTLA	DELIA CAMARILLO LIMON
20	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 6 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
21	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 5 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
22	VERACRUZ	PEROTE	RANCHO SAN ISIDRO DE XALTEPEC	DANIEL CAMARENA
23	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO LA QUINTA ROSA	ALEJANDRO DIEZ GALLAND

24	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN ANTONIO CHICHICUAHUTLA	COMUNIDA CHICHICUAHUTLA
25	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 8 CHICHICUAHUTLA	PEQUEÑA PROPIEDAD
26	VERACRUZ	PEROTE	RANCHO SAN ISIDRO	SIXTO HERNANDEZ MATAMOROS
27	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	NORIA ZAYAETA	GABRIEL GANCEDO BENITEZ
28	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 3 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
29	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 1 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
30	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 2 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
31	VERACRUZ	PEROTE	PORCICOLA SAN ISIDRO	RUBEN MERINO IRIGOYEN Y SOC.
32	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO LAS GOLONDRINAS CHICHICUAHUTLA	BERNANDO ESPIRITU LOPEZ
33	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN ANTONIO CHICHICUAHUTLA POZO 10	EJIDO CHICHICUAHUTLA
34	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EJIDO SAN LUIS	SOCIEDAD Ma. TERESA POZO 2
35	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EJIDO SAN LUIS	SOCIEDAD JESUS DEL VALLE POZO 1
36	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO MARIA DEL CARMEN	OSCAR HIDALGO VILLAFAÑE
37	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LOS ASOMIATES ALCHICHICA	SERGIO MORENO MARTINEZ
38	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LAS MARAVILLAS ALCHICHICA	SERGIO MORENO MARTINEZ
39	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO QUINTA ROSA CHICHICUAHUTLA	ALEJANDRO DIEZ GALLAND
40	VERACRUZ	TEPEYAHUALCO	RANCHO NUEVO CHICHICUAHUTLA	ALEJANDRO DIEZ GALLAND
41	VERACRUZ	TEPEYAHUALCO	POZO 14 ALCHICHICA	SOCIEDAD AUSTREBERTO MONOBEL

Tomada de: SOAPAP., 1997(Aforación realizada en mayo, 1996).

Continuación

Apéndice III.

Tabla 2. Aprovechamientos censados ubicados sobre la zona de estudio.

	COORDENADAS		ALTITUD	TIPO	CONDICION	PROFUNDIDAD	NIVEL ESTÁTICO	ELEVACIÓN	USO AGUA
	(UTM)			Aprov.		TOTAL		DEL N. E.	
	X	Y	Z(msnm)			(m)	(m)	(msnm)	
1	664602	2154765	2326	POZO	ACTIVO	83	14	2312	AGRICOLA
2	669258	2151746	2329	POZO	ACTIVO	120	5,5	2323,5	AGRICOLA
3	669873	2151469	2328	POZO	ACTIVO	110	10	2318	AGRICOLA
4	669108	2150346	2330	NORIA	ACTIVO		9	2321	DOMESTICO-ABREVADERO
5	669502	2150946	2332	POZO	ACTIVO	120	9,3	2322,7	AGRICOLA
6	669008	2150083	2332	POZO	ACTIVO	15	10	2322	AGRICOLA
7	665756	2149466	2333	NORIA	ACTIVO	8	6	2327	AGRICOLA
8	666862	2149725	2329	NORIA	ACTIVO	15	7	2322	AGRICOLA
9	664129	2149008	2324	NORIA	ACTIVO	20	5	2319	AGRICOLA
10	664958	2149222	2329	NORIA	ACTIVO	21	6,2	2322,8	AGRICOLA
11	665367	2149241	2330	NORIA	ACTIVO	22	7,5	2322,5	AGRICOLA
12	665647	2148850	2341	NORIA	ACTIVO	16	15	2326	DOMESTICO-ABREVADERO
13	666878	2149261	2337	NORIA	ACTIVO		10,5	2326,5	AGRICOLA
14	665514	2146527	2353	POZO	ACTIVO	80	26,2	2326,8	AGRICOLA
15	668323	2146563	2343	NORIA	ACTIVO	15	7	2336	AGRICOLA
16	668368	2146508	2343	NORIA	ACTIVO	55	22	2321	AGRICOLA
17	666052	2146108	2355	POZO	ACTIVO	100,6	38	2317	AGRICOLA
18	666462	2145648	2348	POZO	ACTIVO	112	38	2310	AGRICOLA
19	668624	2145600	2341	POZO	ACTIVO	32	10	2331	AGRICOLA

20	669282	2145099	2337	POZO	ACTIVO	120	10	2327	AGRICOLA
21	669856	2144966	2343	POZO	ACTIVO	120	9,35	2333,7	AGRICOLA
22	672070	2144968	2344	POZO	ACTIVO		25	2319	AGRICOLA
23	668501	2146257	2341	NORIA	ACTIVO		17	2324	DOMESTICO- ABREVADERO
24	669398	2144556	2342	POZO	ACTIVO	120	9,19	2332,8	AGRICOLA
25	670263	2144416	2340	POZO	ACTIVO	120	12,3	2327,7	AGRICOLA
26	673433	2144652	2357	POZO	INACTIVO	70	22	2335	AGRICOLA
27	670025	2146185	2340	NORIA	ACTIVO	27	10	2330	AGRICOLA
28	669408	2144190	2341	POZO	ACTIVO	120	10,54	2330,5	AGRICOLA
29	671379	2142130	2346	POZO	ACTIVO	120	11	2335	AGRICOLA
30	670431	2143972	2347	POZO	ACTIVO	120	10,25	2336,8	AGRICOLA
31	673422	2143644	2362	POZO	ACTIVO	100	23,1	2338,9	AGRICOLA
32	669402	2143504	2360	POZO	ACTIVO	60	17	2343	AGRICOLA
33	669937	2140327	2351	POZO	ACTIVO	120	6	2345	AGRICOLA
34	663185	2140462	2403	POZO	INACTIVO	150	48,4	2354,6	AGRICOLA
35	664055	2140442	2398	POZO	ACTIVO	150	46,42	2351,6	AGRICOLA
36	673017	2140574	2360	POZO	ACTIVO	100	20	2340	AGRICOLA
37	669340	2149905	2338	NORIA	ACTIVO	30	10	2328	AGRICOLA
38	663926	2150495	2325	NORIA	ACTIVO	23	10	2315	AGRICOLA
39	670117	2145694	2338	POZO	ACTIVO	80	18	2320	AGRICOLA
40	670858	2146353	2339	POZO	ACTIVO	50	11,3	2327,7	AGRICOLA
41	669819	2149790	2334	POZO	ACTIVO	100	9,5	2324,5	AGRICOLA

Tomada de: SOAPAP., 1997(Aforación realizada en mayo, 1996).

Apéndice IV.

Aprovechamientos censados sobre la región de Tepeyahualco.

Tabla 1.

	ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	PROPIETARIO
1	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO SANTA CRUZ	MAURO BALDERAS MUÑOZ
2	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN ROQUE	COMUNIDAD PIZARRO Y TEPEYEHUALCO
3	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN ROQUE	COMUNIDAD TEZONTEPEC GPE. SARABIA
4	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	TETIPANAPAN	COMUNIDAD TETIPANAPAN
5	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	JUAN SARABIA	LAURENTINO DE JESUS NERI
6	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 12 ALCHICHICA	SOCIEDAD EJIDAL
7	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 1 PIÑONAL DEL FUERTE DE LA UNION	SOCIEDA EJIDAL DEL FUERTE DE LA UNION
8	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 13 ALCHICHICA	SOCIEDAD EJIDAL
9	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LA GLORIA	CONRRADO HUESCA BENITEZ
10	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 4 EL FUERTE DE LA UNION	GRUPO 3 FUERTE DELA UNION
11	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LA HORTALIZA DE JALAPASCO	JUSTO SOTO GARCIA
12	PUEBLA	TEPEYAHUALCO		AMBROCIO MENDOZA
13	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 6 ALCHICHICA	SOCIEDAD EJIDAL
14	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 2 FUERTE DE LA UNION	SOCIEDAD EJIDAL DEL FUERTE DE LA UNION
15	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 7 ALCHICHICA	SOCIEDAD EJIDAL
16	VERACRUZ	PEROTE	EJIDO SAN ANTONIO	SOCIEDAD EJIDAL SAN ANTONIO LIMON
17	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN PEDRO JALAPASCO	MIGUEL GARCIA NAVOR
18	PUEBLA	TEPEYAHUALCO		BARUS RODRIGUEZ MENDOZA
19	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN PEDRO JALAPASCO	COMINIDAD DE JALAPASCO
20	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO LA VICTORIA	SABINO MONTE ROSAS CHAVEZ
21	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 8 FUERTE DE LA UNION	SOCIEDAD EJIDAL DEL FUERTE
22	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 6 FUERTE DE LA UNION	SOCIEDAD EJIDAL
23	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	EL CAÑO	AUSENCIO SOLANO RODRIGUEZ

24	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	EX-HACIENDA SAN ANTONIO ALCHICHICA	OCTAVIO LIMON ROSSAINZ
25	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 9 MAZATEPEC, DEL FURTE DE LA UNION	SOCIEDAD EJIDAL FUERTE DE LA UNION
26	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 7 FUERTE DE LA UNION	EJIDAL FUERTE DE LA UNION
27	PUEBLA	TEPEYAHUALCO		ISMAEL LANDA MATA
28	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO NAZARENO JALAPASCO	PLINIO CABRERA LOPEZ
29	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO SAN ANTONIO ALCHICHICA	ALEJANDRO LIMON VAZQUEZ
30	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO SAN ANTONIO ALCHICHICA	FERNANDO LIMON VAZQUEZ
31	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LLANO SALITROSO POZO 1 FRC. 2	JUAN FERNANDO LIMON VAZQUEZ
32	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	EX-HACIENDA SAN ANTONIO TLALCHICHICA	JOBITA VAZQUEZ LARA
33	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO SAN ANTONIO ALCHICHICA	FAMILIA LIMON VAZQUEZ
34	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO CAMPO GRANDE	AUSTREBERTO RODRIGUEZ GONZALEZ
35	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 3 ITZOTENO	COMUNIDAD ITZOTENO
36	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LA LADERA CHICHICUAHUTLA	SERGIO MORENO MARTINEZ
37	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	PREDIO EL PIÑONAL	CARMEN GODOS RODRIGUEZ
38	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 2 ITZOTENO	COMUNIDAD ITZOTENO
39	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 1 ITZOTENO	COMUNIDAD ITZOTENO
40	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	EL ARENAL CHICHICUAHUTLA	DELIA CAMARILLO LIMON
41	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 6 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
42	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 4 ITZOTENO	COMUNIDAD ITZOTENO
43	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 5 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
44	VERACRUZ	PEROTE	RANCHO SAN ISIDRO DE XALTEPEC	DANIEL CAMARENA
45	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO LA QUINTA ROSA	ALEJANDRO DIEZ GALLAND
46	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 4 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
47	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN ANTONIO CHICHICUAHUTLA	COMUNIDA CHICHICUAHUTLA
48	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 8 CHICHICUAHUTLA	PEQUEÑA PROPIEDAD
49	VERACRUZ	PEROTE		C.N.A.
50	VERACRUZ	PEROTE	RANCHO SAN ISIDRO	SIXTO HERNANDEZ MATAMOROS
51	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	NORIA ZAYALETÁ	GABRIEL GANCEDO BENITEZ
52	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 3 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
53	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN ANTONIO CHICHICUAHUTLA	COMUNIDAD ITZOTENO
54	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 1 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
55	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 2 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA

56	VERACRUZ	PEROTE	CUAUTOTOLAPAN LA GLORIA	COMUNIDAD LA GLORIA
57	VERACRUZ	PEROTE	PORCICOLA SAN ISIDRO	RUBEN MERINO IRIGOYEN Y SOC.
58	VERACRUZ	PEROTE	LA GLORIA 1	SOCIEDAD EJIDAL LA GLORIA
59	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO LAS GOLONDRINAS CHICHICUAHUTLA	BERNANDO ESPIRITU LOPEZ
60	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO MARIA DEL CARMEN	ALEJANDRO DIEZ GALLAND
61	VERACRUZ	GUADALUPE VICTORIA	QUECHULAC	SOCIEDAD CPR POZO 4
62	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	SANTA CRUZ QUECHULAC	MUNICIPIO
63	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA		SANTA CRUZ QUECHULA
64	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	PROGRESO	MUNICIPIO
65	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	QUECHULAC	JUAN BERNARDINO REYES
66	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	QUECHULAC POZO 1	
67	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN ANTONIO CHICHICUAHUTLA POZO 10	EJIDO CHICHICUAHUTLA
68	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO LIDERILLO	RAUL LUNA MONTIEL
69	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EJIDO SAN LUIS	SOCIEDAD Ma. TERESA POZO 2
70	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EJIDO SAN LUIS	SOCIEDAD JESUS DEL VALLE POZO 1
71	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	SAN ANTONIO CHICHICUAHUTLA	MUNICIPIO CHICHICUAHUTLA
72	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	SAN LUIS	MUNICIPIO
73	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	GUADALUPE VICTORIA	MARTIN GONZALEZ
74	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	MARAVILLAS	MUNICIPIO
75	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EX-HACIENDA EL DORADO	JESUS Y WUILIULFO HERNANDEZ GALVEZ
76	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EX-HACIENDA EL DORADO	JESUS Y WUILIULFO HERNANDEZ GALVEZ
77	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	GUADALUPE VICTORIA	MUNICIPIO
78	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO LA LUZ	LUIS LOPEZ HUERTA
79	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EX-HACIENDA EL DORADO	JESUS HERNANDEZ GALVEZ
80	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA		FEDERICO MONTIEL
81	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO MARIA DEL CARMEN	OSCAR HIDALGO VILLAFANE
82	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	GUADALUPE VICTORIA	BERNABE GONZALEZ
83	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	QUECHULAC	
84	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO EL EDEN	FRANCISCO CORTEZ
85	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	CONCEPCION HUECAPA	FRANCISCO CASAS ROMAN
86	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO DE LA CRUZ	GUILLERMO ALVAREZ VERA
87	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO MARIA DEL CARMEN	OSCAR HIDALGO VILLAFANE

88	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO LA UNION	ROSENDO CORTEZ
89	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	SAN PEDRO EL AGUILA	MUNICIPIO
90	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO EL YAQUI	HERMANOS GONZALEZ SOSA
91	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO MARIA DE LA LUZ	ERNESTO GONZALEZ SOSA
92	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO LA UNION	ROSENDO CORTEZ
93	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA		JUAN ALBA NAUDE
94	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA		
95	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	SAN ANTONIO MEXCALTILAHUAC 2	ERASTO SERRANO HERNANDEZ
96	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA		EMELIA CARRILLO SOTO
97	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	SAN ANTONIO MEXCALTILAHUAC 1	ERASTO SERRANO HERNANDEZ
98	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO SAN ANTONIO	ARTURO REULOBIA
99	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO CINCO	MARIO MINUTTI BARTOLOTTI Y COOP.
100	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO SAN ALFONSO	BEATRIZ HIDALGO
101	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO CINCO	MARIO MINUTTI BARTOLOTTI Y COOP.
102	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO VERDE Y CREMA	GUILLERMO FUENTES ORTIZ
103	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	RANCHO SAN ALFONSO	ERNESTO GONZALEZ SOSA
104	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	SAN RAFAEL HUECAPA	RAMIRO REYES GOMEZ
105	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA		C.N.A.
106	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	LA NORIA	SECTOR DE PRODUCCION LA NORIA
107	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	GUADALUPE VICTORIA	MUNICIPIO
108	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	SAN RAFAEL HUECAPA	FRANCISCO JAVIER REYES BLANCO
109	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	GUADALUPE VICTORIA	MUNICIPIO
110	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EL PALMAR	GRUPO DE PRODUCCION EL PALMAR 1
111	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA		MUNICIPIO
112	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EL PALMAR	GRUPO SOLIDARIO DE TRABAJO No. 4
113	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EL PALMAR	EJIDO GUADALUPE VICTORIA
114	PUEBLA	GUADALUPE VICTORIA	EL PALMAR 2	GRUPO DE PRODUCCION EL PALMAR 2
115	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	POZO 7 CHICHICUAHUTLA	EJIDO CHICHICUAHUTLA
116	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LA GRANJA AGUA BENDITA	ANTONIO LIMON E HIJOS
117	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LOS ASOMIATES ALCHICHICA	SERGIO MORENO MARTINEZ
118	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	LAS MARAVILLAS ALCHICHICA	SERGIO MORENO MARTINEZ
119	PUEBLA	TEPEYAHUALCO	RANCHO QUINTA ROSA CHICHICUAHUTLA	ALEJANDRO DIEZ GALLAND

120	VERACRUZ	TEPEYAHUALCO	RANCHO NUEVO CHICHICUAHUTLA	ALEJANDRO DIEZ GALLAND
121	VERACRUZ	TEPEYAHUALCO	POZO 14 ALCHICHICA	SOCIEDAD AUSTREBERTO MONOBEL
122	VERACRUZ	TEPEYAHUALCO	SAN JOSE ALCHICHICA	DAVID PARAMO DOMINGUEZ

Tomada de: SOAPAP., 1997.

Continuación

Apéndice IV.

	No. Campo	COORDENADAS UTM		ALTITUD (msnm)	TIPO Aprov.	CONDICION	PROF. TOTAL (m)	NIVEL ESTATICO (m)	USO AGUA
		X	Y						
1	GI-853	652632	2158045	2365	POZO	ACTIVO	42,00	36,50	AGRICOLA
2	GI-851	653268	2157676	2374	POZO	ACTIVO	100,00	50,00	PUBLICO-URBANO
3	GI-852	651754	2157417	2358	POZO	ACTIVO	100,00	38,00	PUBLICO-URBANO
4	GI-856	651690	2155983	2353	POZO	ACTIVO	100,00	31,00	PUBLICO-URBANO
5	GI-854	664602	2154765	2326	POZO	ACTIVO	83,00	14,00	AGRICOLA
6	GI-842	669258	2151746	2329	POZO	ACTIVO	120,00	5,50	AGRICOLA
7	GI-862	652302	2151534	2344	POZO	ACTIVO	80,00	N/D	AGRICOLA
8	GI-844	669873	2151469	2328	POZO	ACTIVO	110,00	10,00	AGRICOLA
9	GI-863	651807	2150456	2335	POZO	ACTIVO	12,00	8,00	AGRICOLA
10	GI-861	652459	2150551	2336	POZO	ACTIVO	81,00	5,00	AGRICOLA
11	GI-846	656484	2150232	2328	NORIA	ACTIVO	7,00	2,50	AGRICOLA
12	GI-840	669108	2150346	2330	NORIA	ACTIVO		9,00	DOMESTICO-ABREVADERO
13	GI-841	669502	2150946	2332	POZO	ACTIVO	120,00	9,30	AGRICOLA
14	GI-860	653224	2150551	2333	POZO	ACTIVO	80,00	5,00	AGRICOLA
15	GI-843	668069	2151351	2327	POZO	ACTIVO	120,00	N/D	AGRICOLA
16	GI-870	675273	2152342	2375	POZO	ACTIVO	100,00	80,00	AGRICOLA
17	GI-845	656782	2150185	2328	NORIA	ACTIVO	5,00	3,00	AGRICOLA
18	GI-839	669100	2150275	2330	NORIA	ACTIVO	13,17	N/D	AGRICOLA
19	GI-847	656449	2149952	2335	POZO	ACTIVO	50,00	N/D	PUBLICO-URBANO
20	GI-838	669008	2150083	2332	POZO	ACTIVO	15,00	10,00	AGRICOLA
21	GI-858	654048	2149642	2334	POZO	ACTIVO	85,00	10,50	AGRICOLA

22	GI-859	652892	2149411	2339	POZO	ACTIVO	80,00	7,00	AGRICOLA
23	GI-850	657082	2149582	2330	NORIA	ACTIVO	6,00	4,00	AGRICOLA
24	GI-821	665756	2149466	2333	NORIA	ACTIVO	8,00	6,00	AGRICOLA
25	GI-864	649262	2149571	2340	POZO	ACTIVO	80,00	10,00	AGRICOLA
26	GI-857	653832	2148936	2341	POZO	ACTIVO	83,00	11,00	AGRICOLA
27	GI-849	657189	2149411	2333	NORIA	ACTIVO	7,00	4,00	AGRICOLA
28	GI-848	658695	2149320	2328	NORIA	ACTIVO	3,50	1,50	AGRICOLA
29	GI-826	666862	2149725	2329	NORIA	ACTIVO	15,00	7,00	AGRICOLA
30	GI-822	664129	2149008	2324	NORIA	ACTIVO	20,00	5,00	AGRICOLA
31	GI-823	664958	2149222	2329	NORIA	ACTIVO	21,00	6,20	AGRICOLA
32	GI-824	665367	2149241	2330	NORIA	ACTIVO	22,00	7,50	AGRICOLA
33	GI-825	665647	2148850	2341	NORIA	ACTIVO	16,00	15,00	DOMESTICO- ABREVADERO
34	GI-837	666878	2149261	2337	NORIA	ACTIVO		10,50	AGRICOLA
35	GI-801	665514	2146527	2353	POZO	ACTIVO	80,00	26,20	AGRICOLA
36	GI-818	668323	2146563	2343	NORIA	ACTIVO	15,00	7,00	AGRICOLA
37	GI-817	668368	2146508	2343	NORIA	ACTIVO	55,00	22,00	AGRICOLA
38	GI-802	666052	2146108	2355	POZO	ACTIVO	100,60	38,00	AGRICOLA
39	GI-803	666462	2145648	2348	POZO	ACTIVO	112,00	38,00	AGRICOLA
40	GI-827	668624	2145600	2341	POZO	ACTIVO	32,00	10,00	AGRICOLA
41	GI-813	669282	2145099	2337	POZO	ACTIVO	120,00	10,00	AGRICOLA
42	GI-804	665323	2145136	2332	POZO	ACTIVO	81,00	N/D	AGRICOLA
43	GI-812	669856	2144966	2343	POZO	ACTIVO	120,00	9,35	AGRICOLA
44	GI-874	672070	2144968	2344	POZO	ACTIVO		25,00	AGRICOLA
45	GI-834	668501	2146257	2341	NORIA	ACTIVO		17,00	DOMESTICO- ABREVADERO
46	GI-811	670546	2144806	2343	POZO	ACTIVO	120,00	N/D	AGRICOLA
47	GI-806	669398	2144556	2342	POZO	ACTIVO	120,00	9,19	AGRICOLA
48	GI-810	670263	2144416	2340	POZO	ACTIVO	120,00	12,30	AGRICOLA
49	GI-873	672908	2144576	2354	POZO	ACTIVO		N/D	AGRICOLA
50	GI-872	673433	2144652	2357	POZO	INACTIVO	70,00	22,00	AGRICOLA
51	GI-815	670025	2146185	2340	NORIA	ACTIVO	27,00	10,00	AGRICOLA
52	GI-807	669408	2144190	2341	POZO	ACTIVO	120,00	10,54	AGRICOLA
53	GI-805	670929	2144066	2345	POZO	ACTIVO	30,00	N/D	PUBLICO-

									URBANO
54	GI-809	671379	2142130	2346	POZO	ACTIVO	120,00	11,00	AGRICOLA
55	GI-808	670431	2143972	2347	POZO	ACTIVO	120,00	10,25	AGRICOLA
56	GI-877	677383	2146216	2385	POZO	ACTIVO	98,00	70,00	INDUSTRIAL
57	GI-871	673422	2143644	2362	POZO	ACTIVO	100,00	23,10	AGRICOLA
58	GI-878	679178	2146790	2415	POZO	INACTIVO	98,00	98,00	AGRICOLA
59	GI-830	669402	2143504	2360	POZO	ACTIVO	60,00	17,00	AGRICOLA
60	GI-832	669941	2143611	2349	POZO	ACTIVO	80,00	N/D	AGRICOLA
61	GI-339	669985	2139580	2354	POZO	ACTIVO	107,00	60,00	AGRICOLA
62	GI-337	674299	2142908	2365	POZO	ACTIVO	60,00	N/D	PUBLICO-URBANO
63	GI-338	675760	2158278	2363	POZO	ACTIVO	100,00	28,00	PUBLICO-URBANO
64	GI-340	670371	2138246	2358	POZO	INACTIVO		N/D	PUBLICO-URBANO
65	GI-341	675496	2142833	2377	POZO	INACTIVO	0,00	N/D	AGRICOLA
66	GI-342	655791	2139228	2416	POZO	ACTIVO	120,00	N/D	AGRICOLA
67	GI-829	669937	2140327	2351	POZO	ACTIVO	120,00	6,00	AGRICOLA
68	GI-346	671874	2139232	2357	POZO	ACTIVO	30,00	10,97	AGRICOLA
69	GI-329	663185	2140462	2403	POZO	INACTIVO	150,00	48,40	AGRICOLA
70	GI-328	664055	2140442	2398	POZO	ACTIVO	150,00	46,42	AGRICOLA
71	GI-828	670020	2139611	2355	POZO	ACTIVO	120,00	6,70	AGRICOLA
72	GI-333	662873	2139782	2411	POZO	ACTIVO	80,00	48,00	PUBLICO-URBANO
73	GI-344	671616	2139605	2356	POZO	ACTIVO		9,95	AGRICOLA
74	GI-336	675939	2139861	2416	POZO	ACTIVO		N/D	PUBLICO-URBANO
75	GI-363	668695	2138944	2356	POZO	INACTIVO	88,00	N/D	
76	GI-362	668918	2138749	2358	POZO	INACTIVO	57,00	N/D	
77	GI-046	673455	2133485	2419	POZO	INACTIVO		N/D	PUBLICO-URBANO
78	GI-370	673676	2139074	2373	POZO	ACTIVO		26,68	AGRICOLA
79	GI-361	668910	2138681	2358	POZO	INACTIVO	57,00	12,00	
80	GI-364	669121	2138628	2359	POZO	INACTIVO		10,25	
81	GI-369	672050	2138806	2363	POZO	ACTIVO	150,00	16,00	AGRICOLA

82	GI-345	675496	2142833	2377	POZO	ACTIVO	120,00	N/D	AGRICOLA
83	GI-343	669810	2136989	2363	POZO	ACTIVO	120,00	12,00	AGRICOLA
84	GI-360	668554	2138401	2361	POZO	ACTIVO	50,00	16,00	AGRICOLA
85	GI-367	672031	2138369	2367	POZO	ACTIVO	120,00	N/D	DOMESTICO- ABREVADERO
86	GI-347	672519	2138608	2367	POZO	ACTIVO	50,00	13,00	AGRICOLA
87	GI-368	673017	2140574	2360	POZO	ACTIVO	100,00	20,00	AGRICOLA
88	GI-335	668637	2137006	2366	POZO	ACTIVO	40,00	12,36	AGRICOLA
89	GI-334	668385	2136736	2369	POZO	ACTIVO		18,94	PUBLICO- URBANO
90	GI-366	673092	2137534	2380	POZO	ACTIVO	120,00	33,84	AGRICOLA
91	GI-365	674015	2118796	2809	POZO	ACTIVO	120,00	N/D	AGRICOLA
92	GI-330	668278	2136991	2367	POZO	ACTIVO	50,00	17,00	AGRICOLA
93	GI-325	667331	2136810	2375	POZO	ACTIVO		N/D	AGRICOLA
94	GI-371	674020	2136648	2404	POZO	ACTIVO		55,53	AGRICOLA
95	GI-326	665420	2136365	2385	POZO	ACTIVO	150,00	34,66	AGRICOLA
96	GI-323	667463	2136048	2377	POZO	ACTIVO	100,00	21,67	AGRICOLA
97	GI-327	664727	2135860	2410	POZO	ACTIVO	150,00	54,64	AGRICOLA
98	GI-324	666049	2135547	2388	POZO	ACTIVO	45,00	27,23	AGRICOLA
99	GI-319	668589	2135527	2368	POZO	INACTIVO	65,00	18,87	AGRICOLA
100	GI-321	667838	2135615	2379	POZO	ACTIVO	120,00	21,36	AGRICOLA
101	GI-318	668557	2135508	2369	POZO	ACTIVO	70,00	N/D	AGRICOLA
102	GI-322	666730	2135457	2387	POZO	ACTIVO	129,00	24,00	AGRICOLA
103	GI-320	667972	2135023	2378	POZO	ACTIVO	100,00	N/D	AGRICOLA
104	GI-316	671796	2134490	2392	POZO	ACTIVO	120,00	40,95	AGRICOLA
105	GI-317	671780	2134582	2393	POZO	INACTIVO	120,00	40,33	
106	GI-313	669942	2134131	2381	POZO	ACTIVO	150,00	26,00	AGRICOLA
107	GI-348	673795	2134530	2422	POZO	ACTIVO		70,00	PUBLICO- URBANO
108	GI-315	673055	2134111	2409	POZO	ACTIVO	150,00	57,72	AGRICOLA
109	GI-332	673697	2134139	2430	POZO	INACTIVO		15,73	PUBLICO- URBANO
110	GI-312	672381	2133453	2424	POZO	ACTIVO	100,00	63,91	AGRICOLA
111	GI-331	673455	2133485	2087	POZO	ACTIVO		N/D	PUBLICO-

									URBANO
112	GI-311	672841	2132606	2452	POZO	ACTIVO	113,00	90,00	AGRICOLA
113	GI-310	672393	2131845	2460	POZO	INACTIVO		100,98	AGRICOLA
114	GI-314	673020	2131906	2473	POZO	INACTIVO	145,00	N/D	AGRICOLA
115	GI-814	670548	2146131	2338	POZO	ACTIVO	120,00	N/D	AGRICOLA
116	GI-816	668635	2146593	2342	POZO	ACTIVO	51,00	N/D	AGRICOLA
117	GI-819	669340	2149905	2338	NORIA	ACTIVO	30,00	10,00	AGRICOLA
118	GI-820	663926	2150495	2325	NORIA	ACTIVO	23,00	10,00	AGRICOLA
119	GI-831	670117	2145694	2338	POZO	ACTIVO	80,00	18,00	AGRICOLA
120	GI-833	670858	2146353	2339	POZO	ACTIVO	50,00	11,30	AGRICOLA
121	GI-835	669819	2149790	2334	POZO	ACTIVO	100,00	9,50	AGRICOLA
122	GI-836	668938	2148807	2335	NORIA	ACTIVO	14,50	N/D	AGRICOLA

Tomada de: SOAPAP., 1997.

Continuación

Apéndice IV.

	METODO DE OBTENCION	TIPO POZO	CULTIVOS	SUPER. RIEGO (Ha)	COTA DEL BROCAL
1	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,TRIGO,ALFALFA,TOMATE,PASTO	45	
2	INFORMACION				
3	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO			
4	INFORMACION	MUESTREO			
5	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,FRIJOL,HABA	60	
6	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,ALFALFA	55	
7	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	HORTALIZAS	40	
8	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,HABA,HORTALIZAS	60	
9	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	HORTALIZAS	1	2332,69
10	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO			
11	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	HORTALIZAS	4	
12	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ	1	
13	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,ALFALFA	50	
14	INFORMACION	MUESTREO	HORTALIZAS	63	
15	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,ALFALFA,LEGUMBRES	60	
16	DEMANDA/HABITANTE		MAIZ,FRIJOL,HABA,PAPA,ALFALFA	30	
17	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,HABA	7	
18	DEMANANDA/HABITANTE	MUESTREO	HORTALIZAS	8	
19	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO			
20	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,HORTALIZAS	20	
21	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,ALFALFA,AVENA,HABA	64	
22	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,AVENA,ALFALFA	40	
23	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	ALFALFA	2	

24		MUESTREO, PILOTO	MAIZ,TRIGO	50	
25	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,AVENA,ALFALFA,HABA	60	
26	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,ALFALFA,HORTALIZAS	45	
27	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	ALFALFA,PAPA	2	
28	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	ALFALFA,PASTO	10	
29	INFORMACION		MAIZ,ALFALFA	5	
30	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,TRIGO	15	
31	INFORMACION		MAIZ,ALFALFA	20	
32	INFORMACION	PILOTO	MAIZ,ALFALFA	40	
33	INFORMACION				
34	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ	7	
35	INFORMACION		MAIZ,FRIJOL	75	
36	INFORMACION	MUESTREO,PILOTO	MAIZ,HORTALIZAS	1	
37	INFORMACION	MUESTREO, PILOTO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA,HABA	25	
38	INFORMACION		MAIZ,HORTALIZAS	75	
39	INFORMACION		MAIZ,ALFALFA,HORTALIZAS	75	
40	DEMANDA/HABITANTE		MAIZ,FRIJOL,TRIGO	7	
41	INFORMACION	PILOTO, MUESTREO, P. BOMBEO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	40	
42	INFORMACION		MAIZ,TRIGO,TOMATE	90	
43	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	41	
44	INFORMACION		MAIZ	35	
45	INFORMACION	MUESTREO			
46	INFORMACION	MUESTREO, PILOTO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	41	
47	INFORMACION	MUESTREO, PILOTO	MAIZ,ALFALFA	38	
48	INFORMACION		MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	40	
49	INFORMACION				
50	INFORMACION				
51	INFORMACION	PILOTO	MAIZ,ALFALFA,HABA	4	
52	INFORMACION	MUESTREO, PILOTO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	38	
53	INFORMACION	MUESTREO			
54	INFORMACION	MUESTREO, PILOTO,	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	41	

55	INFORMACION	MUESTREO, PILOTO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	40	
56	INFORMACION				
57	CANAL		ALFALFA,MAIZ,PAPA	80	
58	INFORMACION		ALFALFA.PAPA,MAIZ	70	
59	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,ALFALFA	27	
60	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	30	
61			MAIZ,FRIJOL	50	
62		PILOTO			
63		PILOTO			
64					
65					
66		PILOTO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA,HORTALIZAS	70	
67	INFORMACION		MAIZ,FRIJOL	66	
68	ESCUADRA	PILOTO	MAIZ,HORTALIZAS	61	
69		PILOTO			
70	INFORMACION	PILOTO	MAIZ.HORTALIZAS	68	
71	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA,HABA	66	
72		PILOTO			
73		PILOTO	MAIZ,HORTALIZA	30	
74					
75					
76	ESCUADRA				
77					
78	ESCUADRA	PILOTO, P. BOMBEO	MAIZ,ALFALFA,HORTALIZAS	50	
79		PILOTO			2353,88
80		PILOTO			
81	INFORMACION		ALFALFA,HORTALIZAS	32	
82			MAIZ,FRIJOL,ALFALFA,CEBADA	70	
83		PILOTO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA,HORTALIZAS	60	
84	ESCUADRA		HORTALIZAS	8	
85	INFORMACION	PILOTO	MAIZ,FRIJOL,HORTALIZAS	55	
86	INFORMACION		MAIZ,FRIJOL,ALFALFA	110	

87	INFORMACION		ALFALFA	38	
88	INFORMACION		HORTALIZAS	30	
89		PILOTO			
90	INFORMACION	PILOTO	MAIZ,HORTALIZAS	100	2364,31
91	INFORMACION		MAIZ.ALFALFA,HORTALIZAS	70	2368,78
92	INFORMACION		MAIZ.HORTALIZAS	12	
93			ALFALFA,HORTALIZAS	19	
94		PILOTO			
95		PILOTO	MAIZ	45	2366,50
96	ESCUADRA	PILOTO	MAIZ	20	2369,86
97	INFORMACION	PILOTO	MAIZ,ALFALFA	25	2369,32
98	INFORMACION	PILOTO	MAIZ,HORTALIZAS,CEBADA	16	
99		PILOTO			
100	INFORMACION	PILOTO	MAIZ	125	
101	INFORMACION	PILOTO	ALFALFA,PAPA	60	
102	INFORMACION		ALFALFA	30	
103	INFORMACION		MAIZ,HORTALIZAS,TRIGO	70	
104	ESCUADRA	PILOTO	MAIZ,HORTALIZAS,HABA	90	2389,57
105		PILOTO			
106	INFORMACION		MAIZ,ALFALFA,HORTALIZAS,HABA	60	
107		PILOTO			
108	INFORMACION	PILOTO	MAIZ	60	2406,07
109		PILOTO			
110	INFORMACION	PILOTO	MAIZ,FRIJOL,HORTALIZAS	54	
111		PILOTO			
112			MAIZ,FRIJOL,PAPA	57	
113		PILOTO, MUESTREO			
114					
115	INFORMACION	PILOTO, MUESTREO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA,HABA	36	
116	INFORMACION	MUESTREO, PILOTO	MAIZ,FRIJOL,TRIGO,AVENA,HABA	32	2338,82
117	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA,HABA	3	
118	CANAL	MUESTREO	MAIZ,FRIJOL,ALFALFA,HABA	73	

119	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	MAIZ,FRIJOAL,ALFALFA,PAPA	60	
120	DEMANDA/HABITANTE	MUESTREO	ALFALFA,HORTALIZAS	26	
121	INFORMACION	MUESTREO	MAIZ,FRIJOL,TRIJO	49	
122	CANAL	MUESTREO	MAIZ,FRIJOL	6	

Tomada de: SOAPAP., 1997.

Apéndice V.

Fotos aéreas de diferentes tiempos y escalas, que presentan el área del espejo del lago-cráter Alchichica (AL).

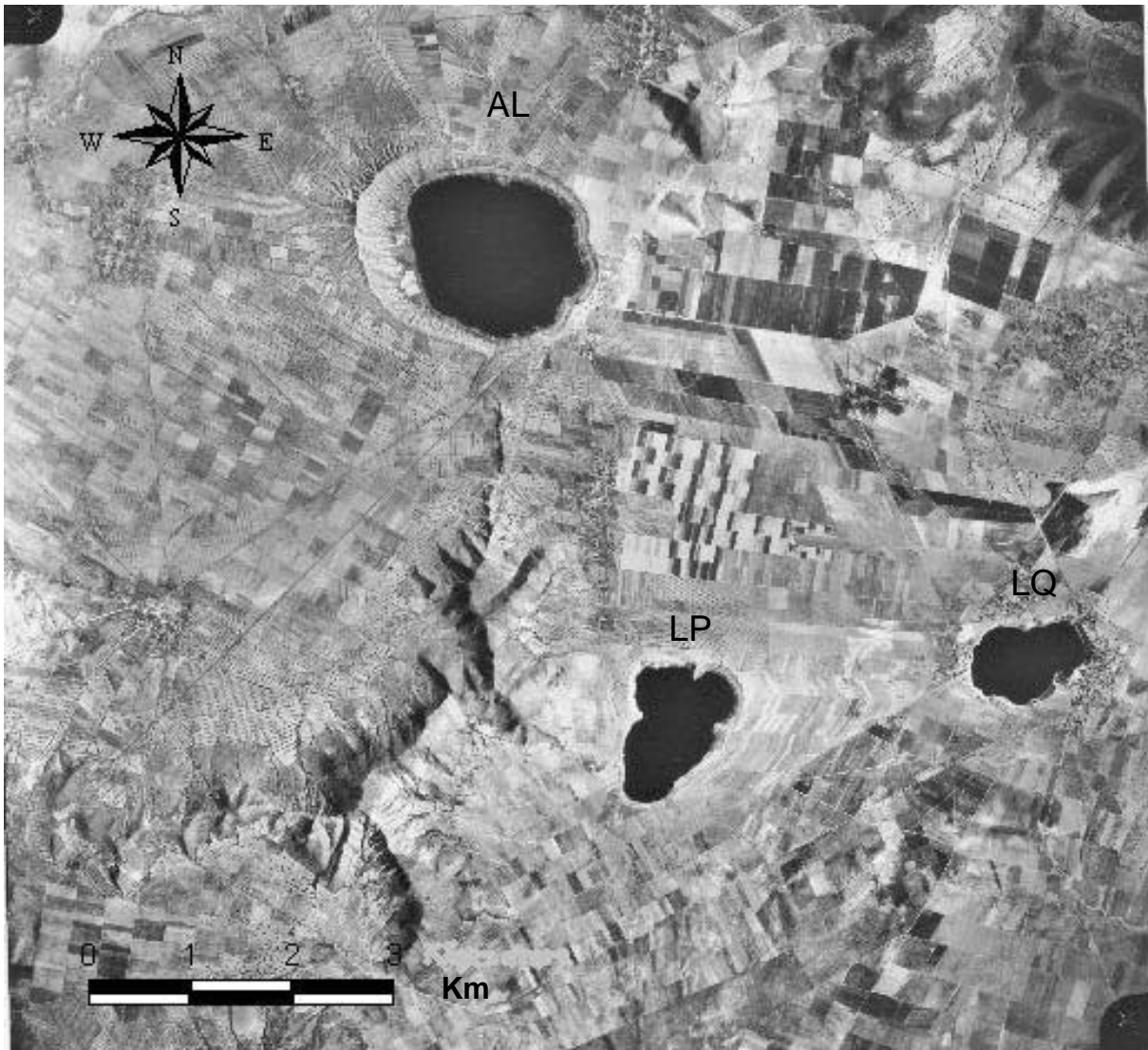


FOTO AEREA 1. CETENAL , AGOSTO -1975 ZONA 18 A A LINEA 1.
Lagos-cráter: AL; Alchichica, LP; La preciosa, LQ; Quechulac.

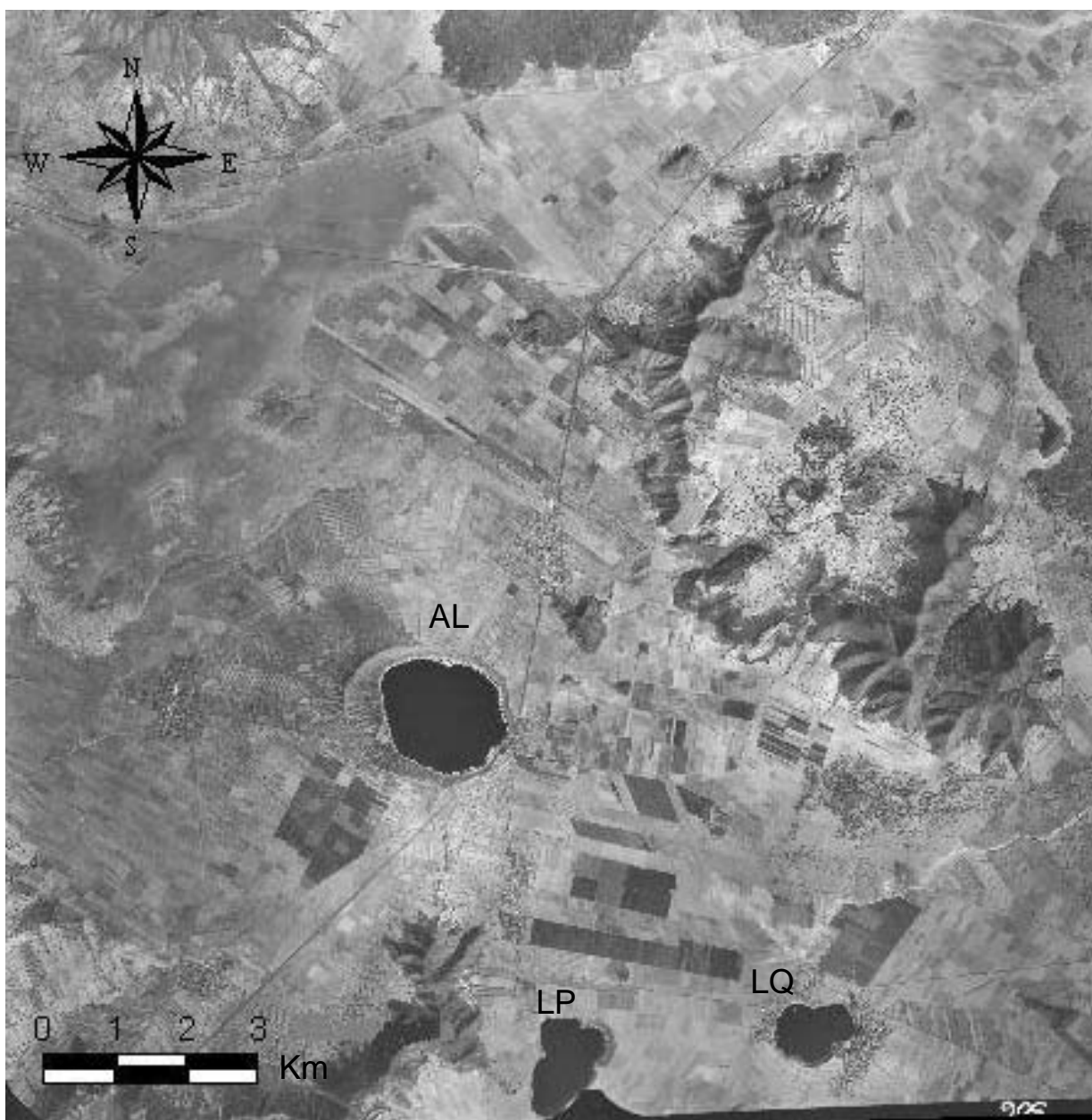


FOTO AEREA 2. INEGI SINFA, 28-FEBRERO -1995 ZONA E14-3 LINEA 180.
Lagos-cráter: AL; Alchichica, LP; La preciosa, LQ; Quechulac.



FOTO AEREA 3. INEGI SINFA , 22-FEBRERO-2006 ZONA E14-B LINEA 359.
Lagos-cráter: AL; Alchichica; LP; La Preciosa.

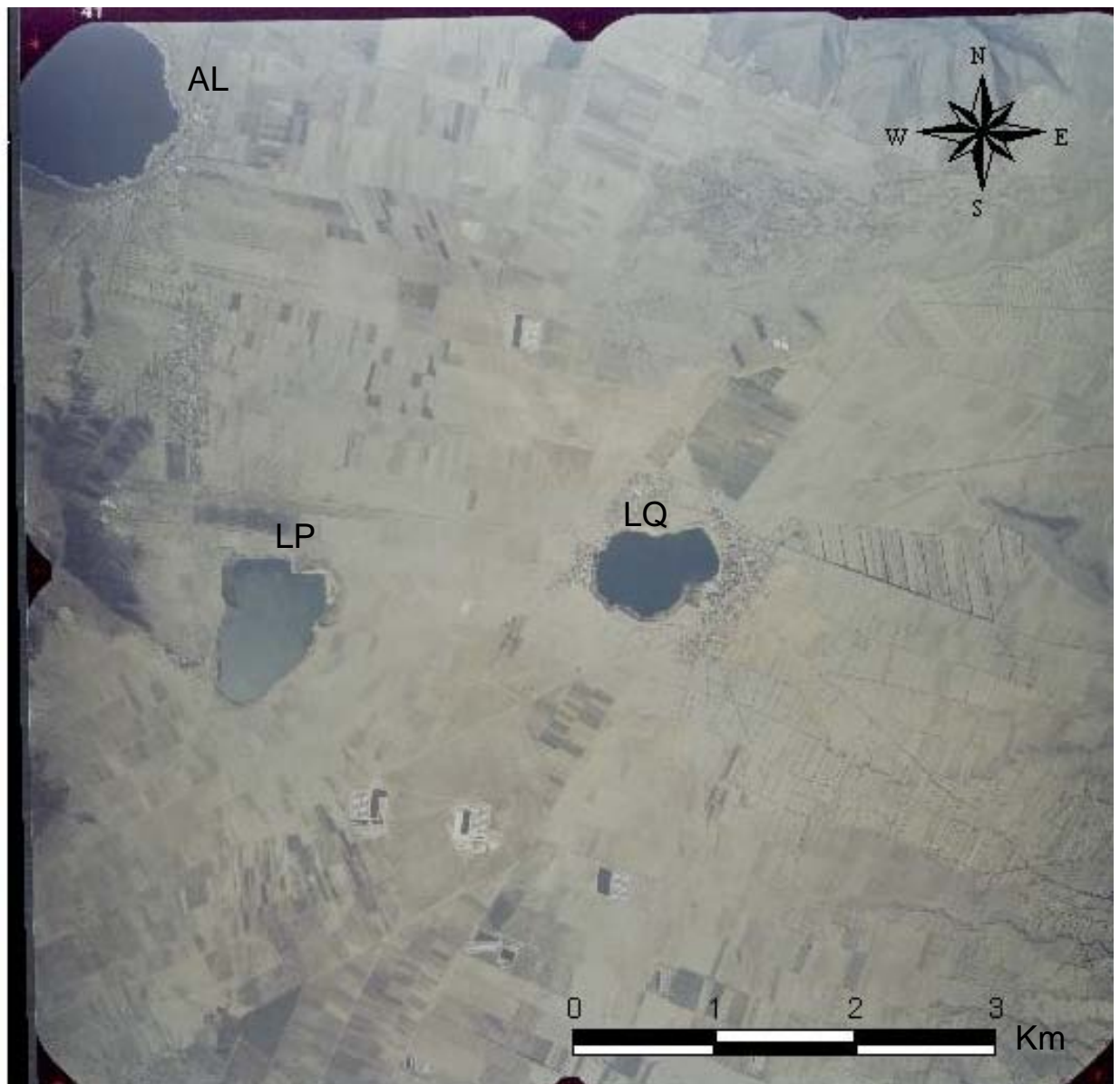
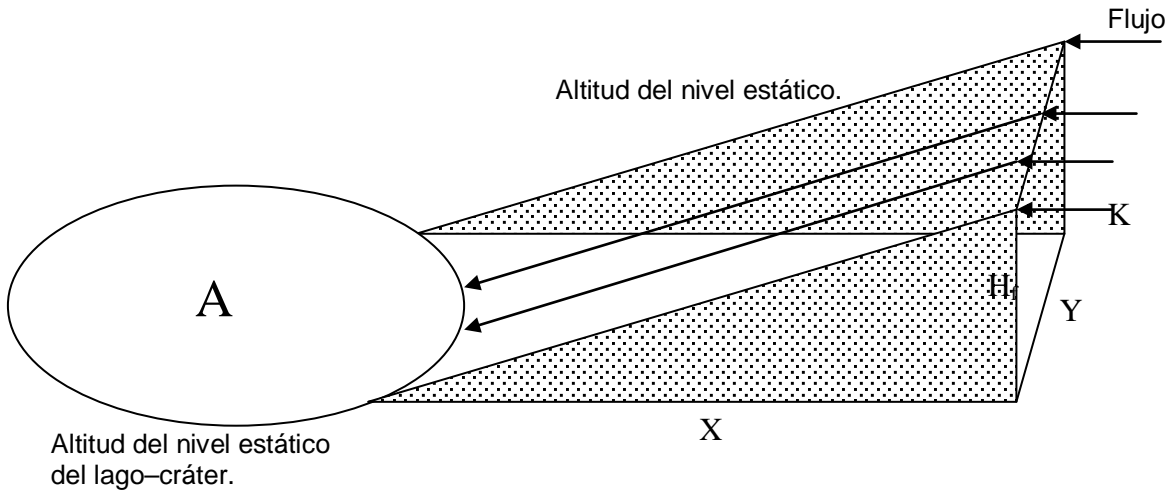


FOTO AEREA 4. INEGI SINFA, 22-FEBRERO-2006 ZONA E14-B LINEA 360.
Lagos-cráter: AL; Alchichica, LP; La preciosa, LQ; Quechulac.

Apéndice VI.

Cálculo de flujo y de Interfase Salina.

Representación de la descarga de Flujo Subterráneo hacia el lago-cráter Alchichica, por arriba de su nivel estático.



Donde:

K = conductividad hidráulica (m/s).

Y = distancia entre las líneas que forman el canal de flujo (m).

H_f = altura del espesor saturado por arriba del nivel del Lago (m).

X = distancia del espejo del lago, al pozo de referencia.

La ley de Darcy se expresa como:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

o,

En términos de Transmisividad,

$$Q = KbB \frac{dh}{dl} \quad (2)$$

Donde:

b = espesor saturado.

B = ancho del espesor saturado (distancia entre las líneas de flujo, que forman el canal de flujo.

$$\frac{dh}{dl} = \text{gradiente}$$

Para calcular el valor del gradiente, correspondiente para cada canal de flujo, Q_1 y Q_2 , se usó la elevación del nivel estático de los siguientes pozos (Fig., 1.2), y del lago:

$$P_{14} = 2326.8 \text{ msnm.}$$

$$P_{23} = 2324.0 \text{ msnm.}$$

$$\text{Lago} = 2318,34 \text{ msnm.}$$

Así como también, la distancia $L = X$ correspondiente a cada pozo, con respecto al espejo del lago y las distancias Y de la equipotencial (ancho del canal de flujo, Fig., 5.8.2.1), correspondiente a cada canal.

$$X_{14} = 1500 \text{ m.}$$

$$X_{23} = 500 \text{ m.}$$

$$Y_{14} = 1222,22 \text{ m}$$

$$Y_{23} = 583,4 \text{ m.}$$

Tomando la EC.(2), haciendo $B = Y$ y sustituyendo $b = h_f$, y $l = X$, tenemos que:

$$Q = -K(h_f)(Y)\left(\frac{dh_f}{dX}\right). \quad (3)$$

Donde

$$K = 0.00022 \text{ m/s}$$

$$h_f = 8.46 \text{ m. espesor saturado tomado para pozo 14.}$$

$$h_f = 5.66 \text{ m espesor saturado tomado para el pozo 23.}$$

: Sustituyendo en la Ec.(3) se obtiene que:

$$Q_1 = (-0.00022 \text{ m/s})(8.46 \text{ m})(1222.22 \text{ m})\left(\frac{-8.46}{1500}\right)\left(31536000 \frac{\text{s}}{\text{año}}\right) = 404,602.11 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$Q_2 = (-0.00022 \text{ m/s})(5.66 \text{ m})(583.4 \text{ m})\left(\frac{-5.66}{500}\right)\left(31536000 \frac{\text{s}}{\text{año}}\right) = 259,333.47 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

$$Q_T = 663,935.58 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}.$$

Distancia a la línea de interfase salina.

Para calcular la distancia a la interfase salina, se usan los siguientes modelos, aplicados a acuíferos costeros en los que se admiten los siguientes postulados (Llamas y Custodio, 1983), para un acuífero libre:

- Acuífero homogéneo que sede agua al lago, con un caudal q_0 por unidad de longitud al lago
- No hay zona de mezcla (puede admitirse ya que la zona de transición tiene un espesor comparado relativamente pequeño generalmente con el espesor del acuífero).
- Flujo horizontal
- Es válida la ley de Ghyben – Herzberg
- Se cumple la ley de Darcy

$$q_0 = \left(\frac{K}{2X} \right) \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} \right) h_f^2 \quad (4)$$

De donde,

q_0 = descarga por unidad de longitud (m^2/s).

h_f = elevación de la carga hidráulica sobre el nivel medio del mar (msnm).

X = longitud horizontal, medida desde el punto de la carga hidráulica, a la línea de frontera del espejo de agua del lago (m).

K = conductividad hidráulica (m/s).

ρ_s = densidad del agua en el lago de Alchichica 1.008 kg/Lit., (9 de Nov., 2008).

ρ_f = densidad del agua en el acuífero 0.997 kg/Lit., que descarga al lago (9 de Nov., 2008).

Sustituyendo los valores correspondientes para cada pozo (14, 23) en la Ec.(4) y realizando las operaciones correspondientes, se tienen los siguientes resultados:

$$\text{Pozo 14. } q_{014} = 0.00048 \frac{m^2}{s}$$

$$\text{Pozo 23. } q_{023} = 0.00065 \frac{m^2}{s}.$$

Sustituyendo el resultado obtenido de q_0 en la siguiente ecuación (ecuación de la interfase).

$$z = \left(\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \right) \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{2Xq_0}{K} \right) \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \right) \right]} \quad (5)$$

Así como los valores correspondientes para cada pozo

$$z_{14} = \left(\frac{0.997}{1.008 - 0.997} \right) \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{2(1500)(0.00048)}{(0.00022)} \right) \cdot \left(\frac{1.008 - 0.997}{1.008} \right) \right]}$$

$$z_{23} = \left(\frac{0.997}{1.008 - 0.997} \right) \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{2(500)(0.00065)}{(0.00022)} \right) \cdot \left(\frac{1.008 - 0.997}{1.008} \right) \right]}$$

Se obtiene la profundidad z por debajo del nivel del lago Alchichica.

De donde:

$$z_{14} = -766.78m \text{ por debajo del nivel del Lago.}$$

$$z_{23} = -513.00m \text{ por debajo del nivel del Lago.}$$

Suponiendo que se tratara de un acuífero cautivo. Usando los valores calculados con la Ec.(4), así como los datos correspondientes para cada pozo; en la ecuación de interfase salina (Glover,1964), aplicado en el lago. En el cual las condiciones supuestas para su elaboración son las siguientes (Custodio y Llamas, 1983):

- No hay zona de mezcla
- El acuífero es cautivo y su techo coincide con el nivel del lago
- El agua dulce sale al lago por una zona de anchura X_0
- El lago no sufre oscilaciones y el agua salada es estática
- El espesor del acuífero es lo suficientemente grande para que la cuña de agua salada no toque el muro de éste.

La ecuación de la interfase es:

$$Z^2 = \frac{2q_0 x \rho_f}{K(\rho_s - \rho_f)} + \left[\frac{q_0 \rho_f}{K(\rho_s - \rho_f)} \right]^2 \quad (6)$$

Siendo:

x = distancia al contorno del lago

Z = profundidad de la interfase bajo el nivel del lago

q_0 = caudal de agua dulce por unidad de longitud de contorno del lago

K = conductividad hidráulica.

Se obtiene que:

$$z_{14}^2 = \frac{2(0.00048)(1500)(0.997)}{(0.00022)(1.008 - 0.997)} + \left[\frac{(0.00048)(0.997)}{(0.00022)(1.008 - 0.997)} \right]^2$$

$$z_{14} = -796.06m \text{ por debajo del nivel del Lago,}$$

$$z_{23}^2 = \frac{2(0.00065)(500)(0.997)}{(0.00022)(1.008 - 0.997)} + \left[\frac{(0.00065)(0.997)}{(0.00022)(1.008 - 0.997)} \right]^2$$

$$z_{23} = -580.41m \text{ por debajo del nivel del lago.}$$

La anchura de la franja de salida al lago es:

$$X_0 = \frac{q_0 \rho_f}{2K(\rho_s - \rho_f)} \quad (6)$$

Y de ser posible que se diera el caso de que existiera la franja su valor es de:

$$X_{014} = \frac{(0.00048)(0.997)}{2(0.00022)(1.008 - 0.997)} = 99.07m$$

$$X_{023} = \frac{(0.00065)(0.997)}{2(0.00022)(1.008 - 0.997)} = 133.04m .$$

Apéndice VII.

Toma de muestras en el lago-cráter Alchichica.



Fotografía 1. Toma de la muestra del agua del manantial (Coordenadas: 2146520 UTM, 668018 UTM, Altitud 2332.2 msnm), que aporta flujo al lago-cráter Alchichica. 9 de Noviembre del 2008.



Fotografía 2. Lago-cráter Alchichica: Toma de la muestras de agua (9 de Noviembre del 2008).



Fotografía 2. Material usado en la toma de muestras, para determinar las densidades del agua (Manantial, Lago-cráter), 9 de Noviembre del 2008.

Tabla 1. Distribución geográfica de las muestras tomadas alrededor del lago-cráter.

Muestras Lago	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud	Dens. Pro
	Y(UTM)	X(UTM)	msnm	kg/Lit
1	2146544	668009	2330	1,008
2	2146515	669407	2330	1,008
3	2146604	667373	2330	1,008
4	2146856	667028	2330	1,008
5	2147380	666860	2330	1,008
6	2147804	666828	2330	1,008
7	2148009	667045	2330	1,008
8	2148088	667419	2330	1,008
9	2147670	668433	2330	1,008
10	2147123	668571	2330	1,008

Apéndice VIII.

Gráfica y Tabla de áreas estimadas, período (1965–2010).

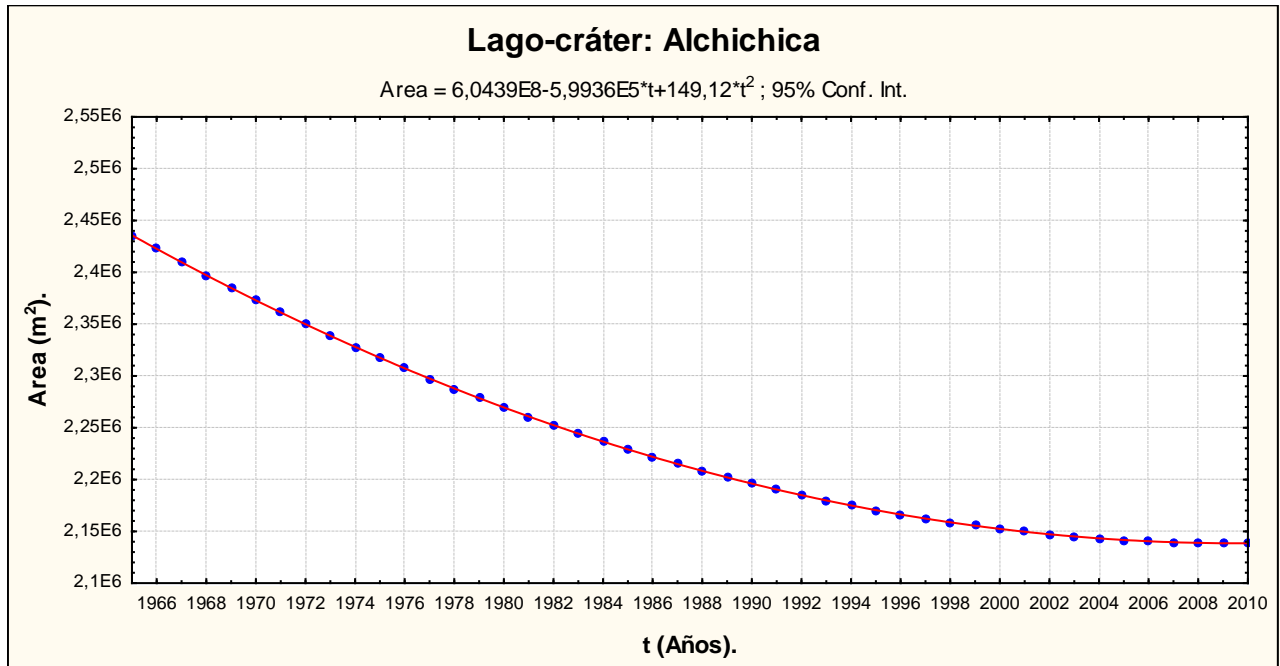


Figura 1. Variación del espejo de agua a través del tiempo.

Tabla 1. Áreas estimadas del lago-cráter Alchichica.

Año	Área Lago-cráter Alchichica.
	m ²
1965	2435472.00
1966	2422302.72
1967	2409431.68
1968	2396858.88
1969	2384584.32
1970	2372608.00
1971	2360929.92
1972	2349550.08
1973	2338468.48
1974	2327685.12
1975	2317200.00
1976	2307013.12
1977	2297124.48
1978	2287534.08
1979	2278241.92
1980	2269248.00
1981	2260552.32
1982	2252154.88
1983	2244055.68
1984	2236254.72
1985	2228752.00
1986	2221547.52
1987	2214641.28
1988	2208033.28
1989	2201723.52
1990	2195712.00
1991	2189998.72
1992	2184583.68
1993	2179466.88
1994	2174648.32
1995	2170128.00
1996	2165905.92
1997	2161982.08
1998	2158356.48
1999	2155029.12
2000	2152000.00
2001	2149269.12
2002	2146836.48
2003	2144702.08
2004	2142865.92
2005	2141328.00
2006	2140088.32
2007	2139146.88
2008	2138503.68
2009	2138158.72
2010	2138112.00