CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS EN CIENCIAS DE LA TIERRA.

Análisis espectral de las variaciones de nivel piezométrico de la red de monitoreo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto.

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Mario Alberto Fuentes Arreazola

Ensenada, Baja California, México, Noviembre, 2011.

TESIS DEFENDIDA POR

Mario Alberto Fuentes Arreazola

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Rogelio Vázquez González
Director del Comité

Dra. Ewa Glowacka
Miembro del Comité

M.C. Francisco Suárez Vidal
Miembro del Comité

Dr. Jorge Torres Rodríguez
Miembro del Comité

Dr. Antonio González Fernández
Coordinador del programa de posgrado en Ciencias de la Tierra.

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

30 de Noviembre de 2011.

RESUMEN de la tesis de **Mario Alberto Fuentes Arreazola,** presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **Maestro en Ciencias**, en **Ciencias de la Tierra** con orientación en **Geofísica Aplicada**. Ensenada, Baja California. Noviembre, 2011.

ANÁLISIS ESPECTRAL DE LAS VARIACIONES DE NIVEL PIEZOMÉTRICO DE LA RED DE MONITOREO DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE CERRO PRIETO.

Resumen aprobado por:

Dr. Rogelio Vázquez González.
Director de Tesis

La zona geotérmica del Valle de Mexicali se localiza en la cuenca de Salton, donde el escalonamiento en dirección noreste de las fallas Cucapá, Cerro Prieto e Imperial, originan una sub-cuenca de aproximadamente 5 km de espesor, rellena de sedimentos marinos y continentales del terciario – cuaternario. Es posible diferenciar dos horizontes principales: Sedimentos Clásticos Consolidados donde se ubica el yacimiento geotérmico actual y Sedimentos Clásticos No Consolidados conteniendo el acuífero superficial.

Dentro de los muchos aspectos a investigar en esta zona, uno de los más importantes es la interacción entre ambas unidades geohidrólogicas, lo que motivó la implementación e instrumentación de un conjunto de pozos de monitoreo del acuífero superficial, en las inmediaciones del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, además de diversos instrumentos para la observación de fenómenos de deformación superficial. Los instrumentos en los pozos de monitoreo son sensores de presión y temperatura que se instalan por debajo del nivel del agua en el pozo. Son programables para tomar mediciones con un intervalo de tiempo fijo. Las mediciones de presión están relacionadas con el nivel de agua en el pozo y con otros factores externos al comportamiento del acuífero, como son: variaciones de presión atmosférica, marea terrestre y particularmente respuesta a eventos sísmicos y de deformación de terreno. Para estudiar los aspectos geohidrológicos del sistema, es necesario diseñar metodologías que permitan separar las diferentes contribuciones. En este trabajo se presentan los resultados del análisis espectral de la base de datos, producto del registro continúo de variaciones de nivel del agua en el periodo 2003 – 2008.

Dentro de las variables analizadas debido a su posible contribución a las variaciones de nivel de agua están: presión barométrica, temperatura del agua, temperatura superficial, precipitación, marea terrestre teórica y actividad sísmica, para el periodo de estudio y en las inmediaciones del campo geotérmico.

Para identificar las componentes determinísticas y estocásticas de las series de tiempo, se aplicarón técnicas de análisis de autocorrelación y espectral: La primera ilustra la variación en el dominio temporal, permitiendo identificar periodicidad o comportamiento aleatorio en los registros de variación de nivel de agua; la segunda se implementa en el dominio de la frecuencia, donde mediante análisis de Fourier es posible distinguir las componentes principales en el espectro resultante.

Con la implementación de la metodología propuesta, se observó que los fenómenos naturales y antropogénicos, coinciden en periodos de las componentes principales de las variaciones de nivel de agua, por lo cual no resulta inmediato, cuantificar la aportación de cada uno de estos fenómenos, pero se plantean las bases para estudios posteriores donde con mayor cantidad de información se pueda aproximar la aportación de cada proceso, así como también poder determinar propiedades hidráulicas del acuífero.

Palabras Clave: Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Acuífero superficial, Niveles de agua, Análisis de series de tiempo en dominios temporal y frecuencial.

ABSTRACT of the thesis presented by **Mario Alberto Fuentes Arreazola** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in EARTH SCIENCES with option in APPLIED GEOPHYSICS; Ensenada, Baja California, México, November 2011.

SPECTRAL ANALYSIS OF CHANGES IN GROUNDWATER LEVEL IN THE MONITORING NETWORK OF THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD.

The geothermal area of the Mexicali Valley is located in the Salton Basin, where the faults arrangements in right step Cucapá, Cerro Prieto and Imperial allows the development to a sub-basin of about 5 km thick, filled with marine and continental sediments of the Tertiary – Quaternary. It is possible to differentiate two main horizons: Consolidated clastic sediments where it is located the current geothermal reservoir and the unconsolidated clastic sediments where it is the shallow aquifer containing.

Among the many aspects of research in this area, one of the most important is the interaction between the two geohydrological units, what motivated the deployment and implementation of a set of monitoring wells from the shallow aquifer near the Cerro Prieto Geothermal Field; as well as various instruments to observe surface deformation phenomena. The instruments in the monitoring wells are pressure and temperature sensors that are installed below the water level in the well. They are programmed to take measurements with a fixed time interval. Pressure measurements are related to the level of water in the well and other factors external to the behavior of the aquifer, such as: variations of atmospheric pressure, earth tides and particularly response to seismic events and ground deformation. To study aspects of the system geohydrological is necessary to develop methodologies to separate the different contributions. So in this thesis presents the results of spectral analysis of the database product of continuous record of water level variations in the period 2003 – 2008.

Among the variables analyzed because of their possible contribution to water level variations are: barometric pressure, water temperature, surface temperature, precipitation, theoretical Earth tide and seismic activity for the period of study and in the vicinity of the geothermal field.

To identify the deterministic and stochastic components of time series, autocorrelation and spectral analysis techniques were applied: The first illustrates the variation in the time domain, allowing identifies periodicity or random behavior in the records of water level variation; the second is implemented in the frequency domain where by means of Fourier analysis can distinguish the main components in the resulting spectrum.

With the implementation of the proposed methodology, was observed that natural phenomena and anthropogenic periods coincide in the principal components of changes in water level, therefore not immediately quantify the contribution of each of these phenomena, but poses the basis for further studies where with as much information as we can approximate the contribution of each process, as well as to determine aquifer hydraulic properties.

Keywords: Cerro Prieto Geothermal Field, shallow aquifer, water levels, time series analysis in time and frequency domains.

Dedicatorias

A mis padres, María Teresa Arreazola Chávez y José Félix Fuentes López por todo su apoyo, motivación, educación y amor.

A mis hermanos Gabriel, Ricardo y Marco.

A toda la familia que ha estado al pendiente de nosotros en todo momento y nos han ayudado incondicionalmente.

Agradecimientos.

Al Dr. Rogelio Vázquez González por su apoyo, confianza, motivación, dedicación, paciencia y enseñanza a lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis.

A los miembros de mi comité: Dra. Ewa Glowacka, M. C. Francisco Suárez Vidal, Dr. Jorge Torres Rodríguez por sus importantes y objetivos comentarios.

A los investigadores: Todd C. Rasmussen (The University of Georgia) y Jonathan Leaver (UNITEC Institute of Technology New Zealand). Por sus aportaciones.

A los investigadores M.C. José Douglas Frez Cárdenas y M.C. Juan Manuel Espinosa Cerdeña por sus aportaciones y orientación.

Al personal administrativo de la División de Ciencias de la Tierra por su apoyo en especial a Martha Elva Barrera López, Guadalupe Zepeda Tapia, María Bárbara Uribe Martínez y Enid Araceli Moran Valdés.

Al personal técnico del laboratorio de geohidrología Alejandro Díaz Fernández, Gertie Olympia Caudillo Ruíz y Yamilé Olazarán Gutiérrez por su apoyo y amistad.

A mis compañeros y amigos que he hecho durante mi estancia y que han sido apoyo, ayuda, motivación y critica.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la oportunidad de superarme realizando esta Maestría con el apoyo económico otorgado 234622.

CONTENIDO

	Página
Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas.....	ix
Capitulo I. Introducción.....	**1**
I.1 Localización del área de estudio.....	**1**
I.2. Antecedentes.....	2
I.3. Objetivos.....	6
Capitulo II. Metodología.....	**8**
II.1. Marco Geológico.....	9
II.2. Aspectos hidrogeológicos del acuífero superficial.....	12
II.3. Relieve y Geomorfología.....	13
II.4. Deformación del Terreno.....	16
II.5. Aspectos Geohidrológicos.....	17
II.5.1. Hidrología Superficial.....	17
II.5.1.1. Ríos.....	17
II.5.1.2. Canales Agrícolas y Drenes.....	18
II.5.2. Pozos.....	19
II.5.2.1. Extracción y Evolución del Acuífero.....	19
II.5.3. Propiedades del Acuífero.....	20
II.5.4. Recarga.....	21
II.4.1. Recarga Subterránea.....	21
II.5.4.2. Infiltración Superficial.....	22
II.5.4.3. Infiltración Vertical.....	22
II.5.5. Descarga.....	23
II.5.5.1. Extracción de Pozos.....	23
II.5.5.2. Descarga Subterránea.....	23
II.5.5.3. Evapotranspiración Potencial.....	23
II.6. Aspectos Geotérmicos.....	24
II.6.1. Yacimiento Geotérmico.....	24
II.6.2. Laguna de Evaporación.....	24
II.7. Análisis de Actividad Sísmica.....	25
II.8. Red Piezométrica.....	26
II.8.1. Perforación de Piezómetros.....	26
II.8.2. Diseño y Terminación de Piezómetros.....	26

CONTENIDO (continuación)

Página

Capitulo II. Metodología……
II.9. Niveles Piezométricos…… 27
II.10. Presión Barométrica…… 30
II.11. Temperatura…….. 30
II.12. Precipitación…….. 31
II.13. Marea Gravitacional Teórica……... 31
Capitulo III. Metodologías de Análisis…… 32
III.1. Efectos Barométricos en Pozos……... 32
III.1.1. Acuíferos Confinados…… 34
III.1.2. Acuíferos Libres…… 35
III.1.3. Efectos de Pozo…… 35
III.1.4. Técnicas para Remover Efectos Barométricos…… 36
III.1.4.1. Acuíferos Confinados…… 37
III.1.4.2. Acuíferos Libres…….. 37
III.2. Análisis en los Dominios Temporal y Frecuencial…… 38
III.3. Procedimiento de Análisis…… 43
Capitulo IV. Resultados…….. 45
IV.1. Análisis de catálogos de actividad sísmica…… 45
IV.1.1. Catálogo de USGS-Caltech……..... 45
IV.1.2. Catálogo de RESNOM…… 45
IV.1.3. Comparación de catálogos USGS y RESNOM…… 47
IV.2. Evento sísmico principal……... 49
IV.2.1. Análisis para el pozo C-3…… 51
IV.2.1.1. Nivel Piezométrico……..... 51
IV.2.1.2. Presión Barométrica…….. 51
IV.2.1.2.1. Respuesta Barométrica…… 55
IV.2.1.3. Temperatura del agua dentro del pozo C-3….. 57
IV.2.1.4. Temperatura superficial……..... 57
IV.2.1.5. Precipitación……..... 59
IV.2.1.6. Marea Gravitacional Teórica…… 59
IV.2.1.7. Actividad Sísmica…….. 63
IV.2.1.8. Resumen de Parámetros Estadísticos…….... 63
IV.2.1.9. Filtrado de Nivel Piezométrico……..... 66
IV.2.2. Análisis para el pozo PZ-3…….. 68
IV.2.2.1. Nivel Piezométrico…… 68
IV.2.2.2. Presión Barométrica…….. 68
IV.2.2.2.1. Respuesta Barométrica……..... 68
IV.2.2.3. Temperatura del agua dentro del pozo PZ-3… 71
IV.2.2.4. Resumen de Parámetros Estadísticos…….. 72
IV.2.2.5. Filtrado de Nivel Piezométrico……..... 73

CONTENIDO (continuación)

Página

Capitulo IV. Resultados…….....
IV.2.3. Análisis para el pozo PZ-5…….. 74
IV.2.3.1. Nivel Piezométrico……. 74
IV.2.3.2. Presión Barométrica…….. 75
IV.2.3.2.1. Respuesta Barométrica……..... 75
IV.2.3.3. Temperatura del agua dentro del pozo PZ-5… 77
IV.2.3.4. Resumen de Parámetros Estadísticos…..... 78
IV.2.3.5. Filtrado de Nivel Piezométrico……..... 80
IV.2.4. Análisis para el pozo G-1-17……... 81
IV.2.4.1. Nivel Piezométrico……. 81
IV.2.4.2. Presión Barométrica…….. 83
IV.2.4.2.1. Respuesta Barométrica……..... 83
IV.2.4.3. Temperatura del agua dentro de pozo G117… 85
IV.2.4.4. Resumen de Parámetros Estadísticos…….. 85
IV.2.4.5. Filtrado de Nivel Piezométrico……..... 86
IV.3. Mínima Actividad Sísmica……..... 89
IV.3.1. Análisis para el pozo C-3……..... 90
IV.3.1.1. Nivel Piezométrico……. 90
IV.3.1.2. Presión Barométrica…….. 90
IV3.1.2.1. Respuesta Barométrica……. 92
IV.3.1.3. Temperatura del agua dentro del pozo C-3….. 94
IV.3.1.4. Temperatura Superficial……. 95
IV.3.1.5. Marea Gravitacional Teórica……..... 97
IV.3.1.6. Actividad Sísmica…….. 97
IV.3.1.7. Resumen de Parámetros Estadísticos…… 98
IV.3.1.8. Filtrado de Nivel Piezométrico……. 100
IV.4. Enjambré de Actividad Sísmica……... 102
IV.4.1. Análisis para el pozo C-3……. 103
IV.4.1.1. Nivel Piezométrico……. 103
IV.4.1.2. Presión Barométrica…….. 103
IV.4.1.2.1. Respuesta Barométrica……. 105
IV.4.1.3. Temperatura del agua dentro del pozo C-3….. 106
IV.4.1.4. Temperatura Superficial……. 106
IV.4.1.5. Marea Gravitacional Teórica……. 108
IV.4.1.6. Actividad Sísmica…….. 109
IV.4.1.7. Resumen de Parámetros Estadísticos…….. 111
IV.4.1.8. Filtrado de Nivel Piezométrico……. 113
Capitulo V. Discusión……. 114
Capitulo VI. Conclusiones……. 119
Literatura Citada……... 120

LISTA DE FIGURAS

Figura **Página**

1	Mapa de localización del Valle de Mexicali y ubicación del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP)…….	7
2	Mapa de rasgos estructurales presentes en el CGCP.....	9
3	Forma y dimensiones de la cuenca Cerro Prieto…….	10
4	Sección geológica general A-A´…….....	12
5	Definición de ambientes de depositación presentes en el Valle de Mexicali…….	14
6	Unidades fisiográficas……..	15
7	Ubicación de los pozos de monitoreo con registros de nivel piezométrico……..	28
8	Instalación de instrumentos Levelogger y Barologger……	31
9	Modelos de respuesta a cambios de presión barométrica (Rasmussen, 1997)……..	33
10	Sismicidad 2003-2008. Catálogo USGS-Caltech……	46
11	Sismicidad 2003-2008. Catálogo RESNOM……	46
12	Momento sísmico acumulado por día para el periodo 2003-2008. Del catálogo de USGS-Caltech…….	48
13	Ubicación del sismo 5.4 del 24 de Mayo de 2006 (estrella roja), sus réplicas según catálogo USGS-Caltech y piezómetros donde se tiene registro del evento (círculos magenta), barómetro en pozo PZ-1 (triangulo azul) y estación gravimétrica (rombo naranja)…….....	50
14	Registro de Nivel Piezométrico, pozo C-3, PZ-3, PZ-5 y G-1-17. 27 de Abril a 19 de Julio 2006……..	51
15	a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Compensado y d) Periodograma, pozo C-3. Abril – Julio 2006…….	52
16	a) Registro de Presión Barométrica, b) Autocorrelograma y c) Periodograma, Barologger instalado en el pozo PZ-1, Abril – Julio 2006…….	54
17	a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (C-3 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado…….	56
18	a) Temperatura del Agua, b) Autocorrelograma, pozo C-3, Abril – Julio 2006……..	57
19	a) Registro de Temperatura Superficial, b) Autocorrelograma, c) Periodograma de la estación meteorológica No. 2033. Abril – Julio 2006……..	58
20	Registro de Precipitación Diario estación meteorológica No. 2033. Abril-Julio 2006…….....	59

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura **Página**

21 Calculo de la Marea Gravitacional Teórica, para la estación No. 10 (Chase, 1978), con el software Tides (Ahern, 1993). Abril-Julio 2006…….. 60
22 Periodograma de Marea Gravitacional Teórica, estación No. 10 y delimitación de bandas de interés…….. 61
23 Distribución Temporal, de la actividad sísmica con magnitudes locales reportada en el catálogo USGS-Caltech. Abril-Julio 2006…….. 63
24 Histogramas de distribución para las series analizadas. C-3, Abril-Julio 2006…….. 64
25 Correlación Cruzada para las series analizadas. Abril-Julio 2006……. 65
26 a) Nivel Piezométrico Compensado C-3, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas)…….. 67
27 a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma para pozo PZ-3. Abril-Julio 2006……. 69
28 a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (PZ-3 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado……. 70
29 Temperatura del Agua, pozo PZ-3.Abril-Julio 2006……. 71
30 Histogramas de distribución para las series analizadas. PZ-3, Abril-Julio 2006…….. 72
31 Correlación Cruzada para las series analizadas. Abril-Julio 2006……. 73
32 a) Nivel Piezométrico Compensado PZ-3, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas)…….. 74
33 a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma, para pozo PZ-5. Abril-Julio 2006……. 76
34 a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (PZ-5 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado……. 77
35 Temperatura del Agua, pozo PZ-5. Abril-Julio 2006……. 78
36 Histogramas de distribución para las series analizadas. PZ-3, Abril-Julio 2006…….. 79

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura **Página**

37 Correlación Cruzada para las series analizadas. Abril-Julio 2006……. 80
38 a) Nivel Piezométrico Compensado PZ-5, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas)…….. 81
39 a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma, para pozo G-1-17. Abril-Julio 2006……. 82
40 a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (G-1-17 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado……. 84
41 Temperatura del Agua, pozo G-1-17. Abril-Julio 2006…… 85
42 Histogramas de distribución para las series analizadas. G-1-17, Abril-Julio 2006……. 86
43 Correlación Cruzada para las series analizadas. Abril-Julio 2006……..... 87
44 a) Nivel Piezométrico Compensado G-1-17, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas)…... 87
45 Correlación Cruzada Niveles Piezométricos con respuesta al sismo 24 de Mayo……..... 88
46 Actividad catálogo USGS-Caltech, piezómetro C-3 con registro (círculo magenta), barómetro en pozo PZ-1 (triangulo azul) y estación gravimétrica (rombo naranja)…… 89
47 a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma, para pozo C-3. Mayo-Agosto 2007……. 91
48 a) Registro de Presión Barométrica, b) Autocorrelograma y c) Periodograma, Barologger instalado en el pozo PZ-1..... 92
49 a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (C-3 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado……. 94
50 a) Temperatura del Agua, b) Autocorrelograma, pozo C-3. Mayo-Agosto 2007……. 95
51 a) Registro de Temperatura Superficial, b) Autocorrelograma, c) Periodograma de la estación meteorológica No. 2033. Mayo-Agosto 2007……. 96
52 Calculo de la Marea Gravitacional Teórica, para la estación No. 10 (Chase, 1978), con el software Tides (Ahern, 1993). Mayo-Agosto 2007……. 97

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura **Página**

53 Distribución Temporal, de la actividad sísmica con magnitudes locales reportada en el catálogo USGS-Caltech. Mayo-Agosto 2007……..... 98
54 Histogramas de distribución para las series analizadas. C-3. Mayo-Agosto 2007…… 99
55 Correlación Cruzada de las series de tiempo intervalo de mínima actividad……..... 100
56 a) Nivel Piezométrico Compensado C-3, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas)…….. 101
57 Actividad catálogo USGS-Caltech, piezómetro C-3 con registro (círculo magenta), barómetro en pozo PZ-1 (triangulo azul) y estación gravimétrica (rombo naranja)…… 102
58 a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma, para pozo C-3. Febrero 2008…… 104
59 a) Registro de Presión Barométrica, b) Autocorrelograma y c) Periodograma, Barologger instalado en el pozo PZ-1…… 105
60 a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (C-3 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado……..... 107
61 a) Temperatura del Agua, b) Autocorrelograma, pozo C-3. Febrero 2008…….. 108
62 a) Registro de Temperatura Superficial, b) Autocorrelograma, c) Periodograma de la estación meteorológica No. 2033. Febrero 2008…… 109
63 Calculo de la Marea Gravitacional Teórica, para la estación No. 10 (Chase, 1978), con el software Tides (Ahern, 1993). Febrero de 2008…… 110
64 Distribución Temporal, de la actividad sísmica con magnitudes locales reportada en el catálogo USGS-Caltech. Febrero 2008…….. 110
65 Histogramas de distribución para las series analizadas. C-3. Febrero 2008…… 112
66 Correlación Cruzada de las series de tiempo, intervalo de actividad en enjambre……..... 112
67 a) Nivel Piezométrico Compensado C-3, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas)…….. 113

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Propiedades hidráulicas en los ambientes de depositación	21
II	Ubicación de pozos, coordenadas de ubicación y profundidad de terminación.	27
III	Información disponible por pozo y año.	29
IV	Principales Armónicos que componen a la Marea Gravitacional Teórica.	62
V	Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo C-3, 2006. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).	64
VI	Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo PZ-3, 2006. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).	72
VII	Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo PZ-5, 2006. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).	79
VIII	Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo G-1-17, 2006. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).	85
IX	Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo C-3, 2007. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).	99
X	Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo C-3, 2008. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).	111
XI	Evento sísmico 24 de mayo 2006, pozos C-3, PZ-3, PZ-5 y G-1-17.	115
XII	Mínima actividad sísmica y enjambre sísmico, pozo C-3.	117

Capítulo I.

Introducción

Los registros de nivel piezométrico, son utilizados comúnmente para determinar el gradiente hidráulico y por ende la dirección de flujo subterráneo.

La respuesta del nivel del agua medido en pozos de monitoreo a eventos sísmicos, ha sido abordado por un importante número de investigadores y en diferentes regiones del mundo; siendo los más cercanos a la zona de interés, el análisis de variaciones de nivel observadas en pozos en las cercanías de Parkfield, California; asociadas con desplazamientos de falla y a eventos sísmicos locales y distantes (Roeloffs et al., 1989 y Roeloffs 1998).

La descomposición del nivel observado en cinco componentes: presión atmosférica, respuesta a precipitación y marea, ruido de la observación y nivel de agua residual; es realizado en el pozo Haibara, Japón (Matsumoto et al., 2003).

El análisis del residual después de remover los efectos barométricos, estacionales y tendencias, buscando identificar comportamiento anormal fue analizado en Taiwan (Hwa-Sheng G. et al., 2007).

Otra línea de investigación, es la determinación de las propiedades hidráulicas de acuíferos con base en el análisis de las variaciones de nivel; las fluctuaciones en la respuesta a mareas terrestres y cambios de presión atmosférica, asumiendo un comportamiento sinusoidal han sido analizadas para estimar la transmisividad (T) (Mehnert E. et al., 1999).

Procesos que ejercen presión y cargas mecánicas a un acuífero, como mareas terrestres, mareas oceánicas y cambios de presión atmosférica, son fenómenos que han sido usados para estimar las propiedades hidráulicas; un estudio con el propósito de revisar las técnicas utilizadas bajo ciertas condiciones y validarlas, lo realizo USGS (Merrit, 2004).

Trabajos que se han enfocado en el análisis de las series observadas fueron revisados; la identificación de componentes determinísticas y estocásticas, mediante técnicas de análisis de autocorrelación y espectral, fue implementada en Matanzas, Cuba (Molerio León et al., 2002).

En su trabajo de tesis de doctorado (Leaver, 2006), presenta el análisis mediciones realizadas en géiseres y pozos en la zona geotérmica de Te Aroha, Rotorua y Orakeikorako Nueva Zelanda, dirigido a la identificación de las frecuencias de las variaciones características de un período de 25 horas o menos. Las medidas incluyen recopilación de datos con instrumentos de alta precisión y alta velocidad de muestreo de 5 minutos a 1 hora en períodos de más de 1,400 horas, en condiciones de explotación y no explotación del sistema.

En el trabajo anterior, utilizando análisis de Fourier se identifican claramente las variaciones periódicas inducidas por presión barométrica, gravedad, influencia térmica, actividad antropogénica y del subsuelo (Leaver, 2007).

Se plantea un análisis e interpretación de registros de variación de nivel piezométrico en los algunos pozos de la Red de Monitoreo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto (RMCGCP). Dicho análisis se llevará a cabo en los dominios temporal y frecuencial, con la finalidad de identificar algunos de los efectos naturales y antropogénicos que generan estas variaciones de nivel. Para identificar componentes determinísticas y estocásticas de la base de datos, se aplicarán técnicas de análisis autocorrelatorio y espectral.

I.1 Localización del área de estudio.

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) se localiza dentro de una cuenca tipo *pull-apart*, limitada por el sistemas de fallas de Cerro Prieto e Imperial, que a su vez forman parte del sistema de fallas de San Andrés – Golfo de California, geográficamente se ubica en la región geotérmica del Valle de Mexicali, y tectónicamente forma parte de la cuenca de Salton, y que es

considerada como una de las regiones con mayor cantidad de recursos geotérmicos en el mundo.

El Valle de Mexicali se ubica en la porción noreste del estado de Baja California. Colindando al norte con el Valle Imperial en el sur del estado de California, Estados Unidos; al este tiene como límite el Río Colorado y Desierto de Sonora; al sur se presenta la confluencia del Río Colorado y Río Hardy desembocando en el Golfo de California; mientras que al oeste limita con las Sierra Cucapá y El Mayor. (Figura 1).

I.2 Antecedentes.

El municipio de Mexicali cuenta con 936,826 habitantes que se desempeñan principalmente en las siguientes actividades económicas: agricultura, generación de energía eléctrica, industria, ganadería, pesca, comercio y el turismo.

Dentro del Valle se cuentan con 165,863 hectáreas de cultivo: de las cuales 163,491 has (98 %) es de riego y 2,372 has (2 %) de temporal; representando el 43 % de la superficie de cultivo en el estado de Baja California 378,513 has. (Anuario Estadístico de Baja California INEGI, 2010).

Para esta actividad el Valle cuenta con 1,850 Mm^3/año provenientes de la cuenca del Río Colorado, según el Tratado Internacional de Límites y Aguas de 1944, con los Estados Unidos; y una extracción subterránea del acuífero sobre explotado del Valle de Mexicali de 719 Mm^3/año (Secretaria de Fomento Agropecuario, Gobierno de Baja California, 2010).

El CGCP, con una capacidad instalada de 720 MW, ocupa el segundo lugar a nivel mundial en el rubro de generación de electricidad, la operación de esta planta constituye un recurso importante para la región ya que genera el 70 % de la energía eléctrica que se consume en el estado.

El CGCP empezó a explotarse comercialmente en 1973, a partir de esas fechas se ha extraído vapor geotérmico, que se distribuye a las diferentes centrales generadoras, con una demanda actual de 5,800 t/h, proveniente de 353

pozos. Lo cual representa un acumulado aproximado de 2,900 millones de toneladas de mezcla en un área de explotación de 18 km^2 (Aguilar Dumas, 2010).

Uno de los primeros trabajos geohidrólogicos del Valle de Mexicali fue realizado en 1967 por Ariel Construcciones, S. A. Este estudio se enfocó en la descripción de la historia y del inventario de pozos agrícolas e industriales, perforados en el Valle y se analizó la distribución y aprovechamiento de los recursos hídricos superficiales presentes en el Distrito de Riego 014 Río Colorado. Para el año de 1968, la misma compañía retoma y continua con el trabajo realizado un año antes, perforando ahora 25 pozos de observación y 15 de bombeo (designados como pozos de la serie G), llevando a cabo actividades que contemplaban registros eléctricos y aforos a caudal constante. La información obtenida constituye hasta el momento la más completa y de mejor cobertura en el Valle de Mexicali y la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado.

En 1972, la Secretaria de Recursos Hidráulicos, detecto en su estudio geohidrólogico inicios de la salinización del Valle; en 1975, se documentó en la colección del Archivo Histórico Diplomático Mexicano.

Desde 1986, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha realizado varios estudios geohidrológicos examinando la zona del CGCP. El objetivo de estos estudios ha sido conocer la relación geohidrológica que existe entre las actividades realizadas en el CGCP para la generación de energía eléctrica y el comportamiento del acuífero superior, es decir, la relación del acuífero profundo y el acuífero superficial. Algunos de estos trabajos realizados en el CGCP son:

En 1986, CFE lleva a cabo un estudio en el que se describen las características geológicas y geohidrológicas de la zona oeste del CGCP y su relación con el resto del Valle de Mexicali. Tomando como base el monitoreo de pozos (serie BCP #), se obtuvo un plano de potencial piezométrico y las direcciones predominantes de flujo subterráneo (CFE, 1986).

CFE en (1987) realizó un estudio en el que se analizaron las opciones técnicas disponibles para el desecho del residuo de la extracción de mezcla (salmuera), realizándose un experimento de infiltración de dicho residuo en una

laguna experimental y monitoreando desde los pozos (serie S) con lo que se determinó la permeabilidad al oeste del Campo.

En este mismo año (1987), la Universidad Michoacana fue contratada por CFE, para realizar un estudio sobre la región propuesta de inyección; concluyendo que la reincorporación de salmuera en la zona de los abanicos aluviales provocaría un patrón de dispersión demasiado irregular en los niveles someros. Se señaló considerar que la alta densidad de la salmuera podría generar una profundización de ésta hacia la base del acuífero (Garnica y Godínez, 1987).

En 1989 la UABC, realizó actividades contratadas por CFE, para modelar el flujo subterráneo, concluyendo que el flujo regional del acuífero en el CGCP muestra una predominante dirección NE-SW, de tal forma que el flujo entra al campo por la zona NE y sale en su frontera sur (Ramírez Hernández et al., 1989).

En 1994, la CFE y la UABC realizaron un estudio donde se estableció de manera detallada un programa de monitoreo geohidrológico a corto y mediano plazo dentro del CGCP y sus alrededores. Teniendo como objetivos, definir la dinámica local del nivel piezométrico, la creación de un modelo conceptual de la zona y evaluar los frentes salinos presentes (Ramírez Hernández et al., 1994).

Ramírez Hernández (1997), hizo un estudio que relacionó las propiedades hidráulicas del acuífero somero con el yacimiento geotérmico definió las direcciones preferenciales del flujo subterráneo somero, en las inmediaciones de la laguna de evaporación debido a la infiltración de fluido de desecho y su influencia en el flujo regional. Otro de los objetivos de este trabajo fue el definir los rasgos litológicos, estructurales y propiedades hidráulicas del acuífero que definen la dinámica del mismo.

En 1998, el Centro de Investigación Científico y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) es contratado por CFE, donde Vázquez González (1998) integró validó y analizó una base de datos con información geohidrológica de los pozos geotérmicos, industriales, agrícolas y de observación, para encontrar la relación presente entre el acuífero somero y el yacimiento geotérmico. Otro de los

objetivos de este trabajo fue el definir la dirección de flujo en el acuífero somero en la zona y su relación con todo el acuífero del Valle y las posibles fuentes de recarga. Se logró identificar en el subsuelo del Valle de Mexicali, la presencia de tres ambientes de depositación: un ambiente fluvial al oriente, un ambiente lagunar al centro y un ambiente de abanicos aluviales al oeste. Se concluyó que el flujo subterráneo que entra al área de estudio tiene una dirección dominante NE-SW con un gradiente hidráulico de 0.4 m/km. Finalmente dedujo que la recarga principal que alimenta al acuífero en el área, es la infiltración de los excedentes del riego y las perdidas en los canales de conducción originando infiltración.

A finales del año 1998, la CFE finalizó la perforación dentro del CGCP de 9 piezómetros a 150 m de profundidad y uno más con profundidad de 500 m. Estos pozos, junto con los identificados por Vázquez (1998), forman la (RMCGCP).

Las inmediaciones del CGCP son una zona de interés para el estudio de la deformación del terreno asociada a tectonismo, sismicidad, y subsidencia natural como la inferida a actividad antropogénica ha sido investigada en múltiples trabajos (Glowacka et al., 2005, Sarychikhina et al., 2009 y Glowacka et al., 2010).

Díaz Cabrera en 2001, realizó un balance hídrico mediante una simulación numérica del acuífero superior del Valle de Mexicali; estimó: una entrada (recarga) de 1,127 Mm^3/año una salida (descarga) de 1,139.8 Mm^3/año, y una variación de almacenamiento más su componente de error de – 12.8 Mm^3/año.

I.3 Objetivos.

Analizar la base de datos producto del registro continuo de las variaciones de nivel piezométrico observado en algunos pozos de la Red de Monitoreo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto en el periodo 2003 - 2008, con la finalidad de identificar los procesos naturales y antropogénicos responsables de estas variaciones. Desarrollar una metodología de análisis en el dominio de la frecuencia utilizando la transformada de Fourier y mediante información

complementaria identificar en las series de tiempo las posibles aportaciones debidas a:

- Actividad sísmica asociada a las fallas geológicas en la zona.
- Fluctuaciones periódicas en presión barométrica y temperatura.
- Marea gravitacional terrestre.
- Recarga superficial.
- Explotación del acuífero somero.
- Afectación directa e indirecta de la explotación del yacimiento geotérmico.
- Otras posibles causas relacionadas con la actividad antropogénica.

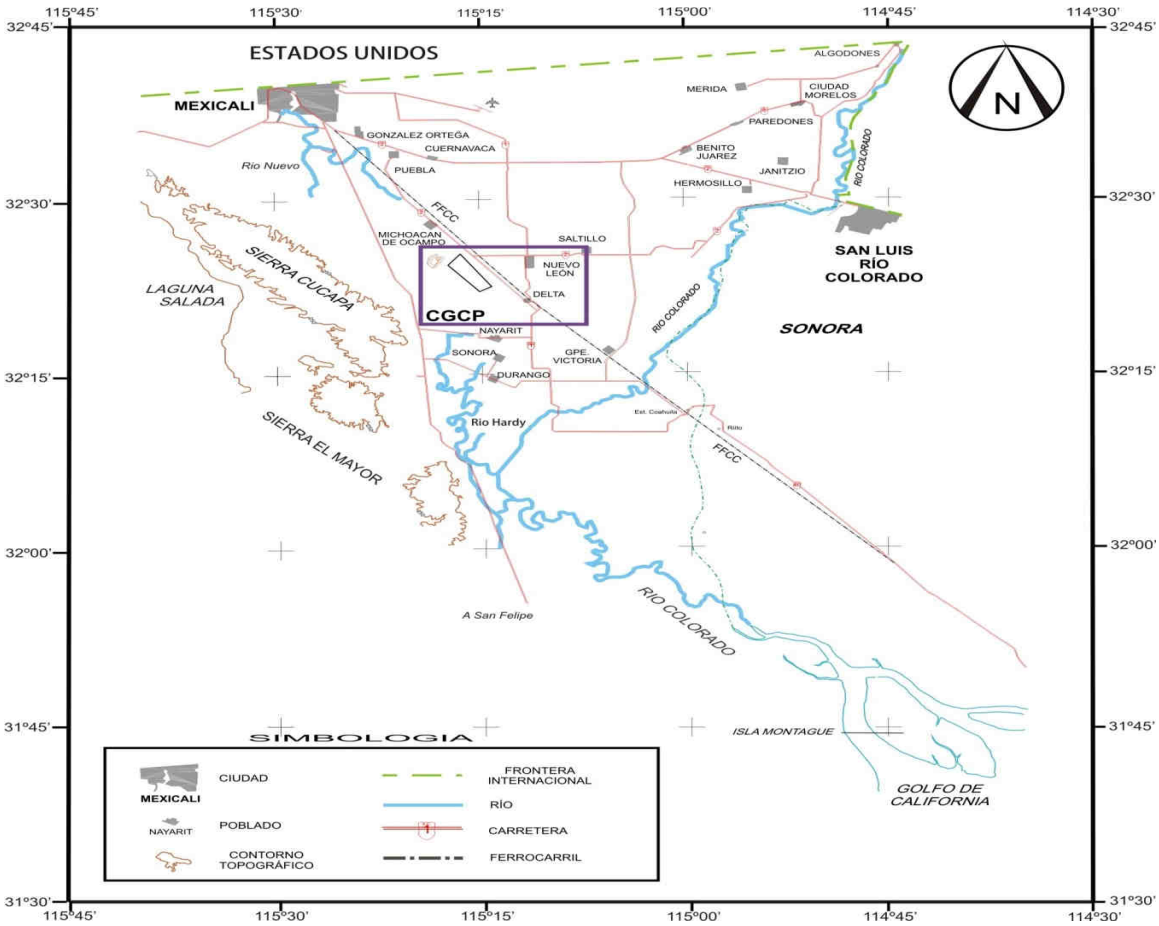

Figura 1. Mapa de localización del Valle de Mexicali y ubicación del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, CGCP.

Capítulo II.

Metodología

La metodología empleada para alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo de tesis, consistió básicamente en dos etapas:

1. Revisión, recopilación y validación de la información. Se consultó información geológica y geohidrológica, para describir los sistemas geohidrológicos superficiales y profundos y entender los fenómenos que determinan la interacción entre el acuífero superficial y el yacimiento geotérmico. Se obtuvieron, revisaron y analizaron dos catálogos de actividad sísmica dentro de la zona de interés para el período de estudio contemplado. Registros de nivel piezométrico, presión barométrica y temperatura producto de la instrumentación de los pozos así como temperatura superficial, son considerados, para identificar su aportación a las variaciones de nivel observado. El calculó de la marea gravitacional terrestre teórica fue obtenida identificando sus componentes y estimando su contribución a las fluctuaciones de nivel de agua. Datos de estaciones meteorológicas y resultados de trabajos previos son usados para estimar la recarga superficial y su aporte. Los datos históricos, evolución y explotación del acuífero del Valle se analizaron para cuantificar su participación en el fenómeno observado en la Red de Monitoreo. Información proveniente de CFE en materia de la explotación del yacimiento geotérmico, se consideró; y se estimó su contribución una vez que se comprendió la interacción entre ambas unidades geohidrólogicas. Finalmente la contribución a las variaciones de nivel, debidas a actividades humanas, principalmente agrícolas, son consideras. La integración conjunta de la información anterior, conforman la base de datos a analizada.

2. Procesamiento y análisis de la base datos. De la aplicación de técnicas de análisis autocorrelatorio y espectral, se identificaron las componentes determinísticas y estocásticas presentes en la base de datos.

II.1. Marco Geológico.

La zona geotérmica del Valle de Mexicali, se encuentra localizada dentro de la planicie deltaica del Río Colorado; dicha planicie a su vez, forma parte de la cuenca de Salton.

A escala regional, el área corresponde a una depresión de origen tectónico; el escalonamiento en dirección Noreste de las fallas Cucapá, Cerro Prieto y Michoacán, junto con la Falla Imperial al oriente, dan forma a una cuenca del tipo *pull–apart*, con una profundidad aproximada de 5,200 m, rellena de sedimentos continentales y marinos del Terciario-Cuaternario (Figura 2) (Aguilar Dumas, 2008*)*

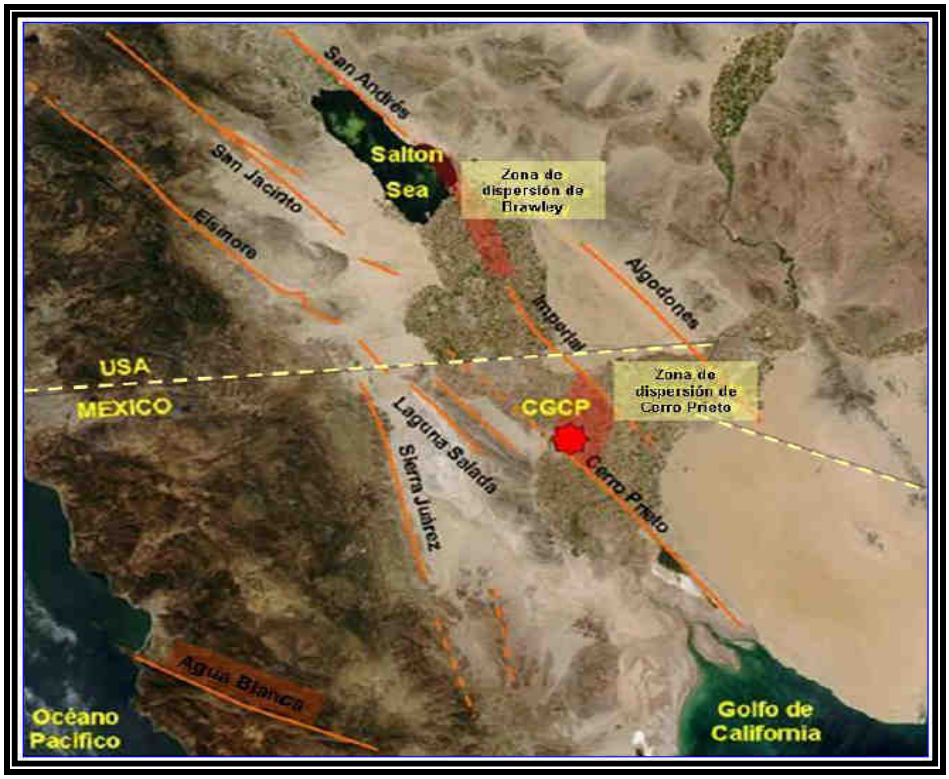

Figura 2. Mapa de rasgos estructurales presentes en el CGCP. (*Aguilar Dumas, 2008*).

La cuenca de Salton tiene como origen la definición de un nuevo límite entre las placas del Pacífico y la de Norteamérica, y la incorporación de la península de Baja California a la placa del Pacífico, entre los 12 y 6 m.a. (Lee et al., 1996).

La distribución de los sedimentos que han rellenado la cuenca, en el caso del Valle de Mexicali y el Valle Imperial, ha sido afectada ampliamente por el movimiento en dirección NW de la península de Baja California, a lo largo del sistema de fallas transcurrentes de San Andrés, desde hace aproximadamente 4 m.a. Se tiene una estimación de desplazamiento de ~ 36 mm/año a lo largo de San Andrés, donde Falla Imperial y Falla Cerro Prieto han propiciado el desplazamiento en dirección NNW de la península del orden de 300 km, con respecto al continente (Humphrey, 1991).

La cuenca de Cerro Prieto tiene la forma y dimensiones mostradas (Figura 3) además se mencionan las fallas dentro de la cuenca.

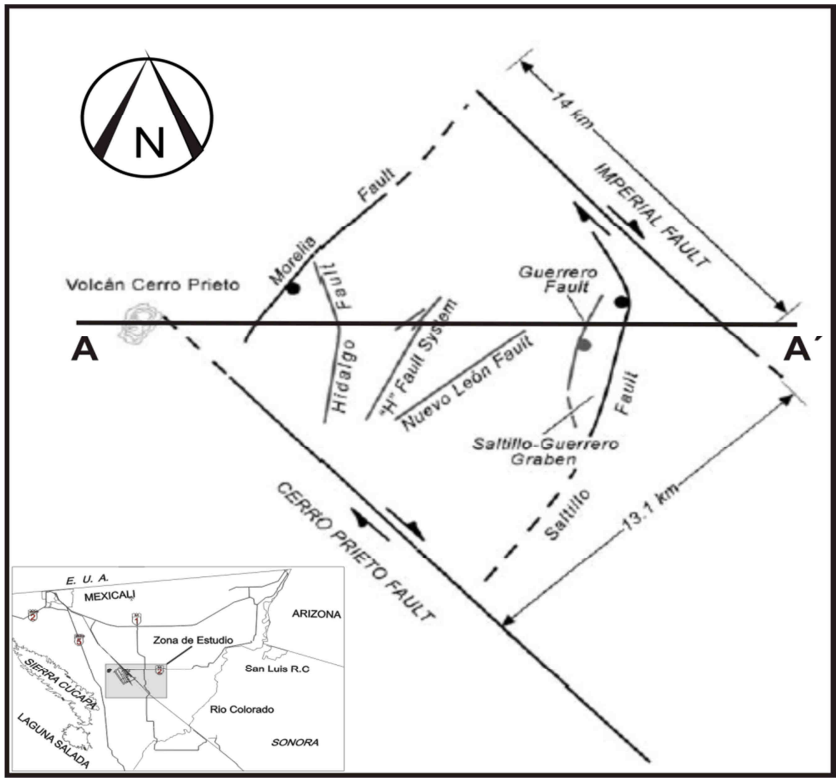

Figura 3. Forma y dimensiones de la cuenca Cerro Prieto (Modificado de Suárez et al, 2008).

La estructura anterior, sobreyace a un basamento definido por (Pérez, 1996) donde integra trabajos de gravimetría y magnetometría, diferenciando tres tipos de basamento, del más antiguo al más reciente: Terreno Norteamérica (TNA) formado por rocas metamórficas del Paleozoico-Mesozoico; siguiendo el Terreno de Baja California (TBC) representado por rocas graníticas del Cretácico, finalmente un Intrusivo Máfico (IM) de edad probable del Terciario Superior-Plioceno. Entre las fallas Cerro Prieto e Imperial, se infiere la presencia del intrusivo debido a la interpretación de una anomalía magnética observada en esta zona y se le relaciona con la probable fuente de calor que alimenta al yacimiento geotérmico actual (Figura 4).

Lira Herrera (2005), identificó que dentro de los materiales depositados, el primero de ellos conocido como Lutita Gris, descansa directamente sobre el basamento; la unidad está compuesta de lutitas y lutitas limolíticas, con intercalaciones de areniscas, que en conjunto dan un espesor medio de 3,000 m.

Dentro de la secuencia sedimentaria aparecen los horizontes de areniscas permeables, compuestos por fragmentos de cuarzo y escaso feldespato, bien clasificados, y con espesores que van desde los centímetros hasta 300 m y porosidad promedio del 22%, es en estas areniscas donde se alojan los fluidos explotados en el CGCP.

La unidad Lutita Café, descansa en gran parte sobre la Lutita Gris; presentando intercalaciones de areniscas y arenas de color crema muy permeables, cementadas principalmente por carbonatos; el espesor de esta unidad varía de unos cuantos metros hasta los 500 m.

La unidad de Lodolitas, se encuentra sobreyaciendo a la de Lutita Café y Lutita Gris, presenta una distribución muy errática y se le observa principalmente en la porción centro oriental del CGCP.

Finalmente se tiene la presencia de los Sedimentos Clásticos No Consolidados, sobreyaciendo a las unidades anteriores, estos sedimentos están formados principalmente por arcillas, limos, arenas y escasas gravas, con espesores que van desde los 400 hasta los 2,500 m. (Figura 4).

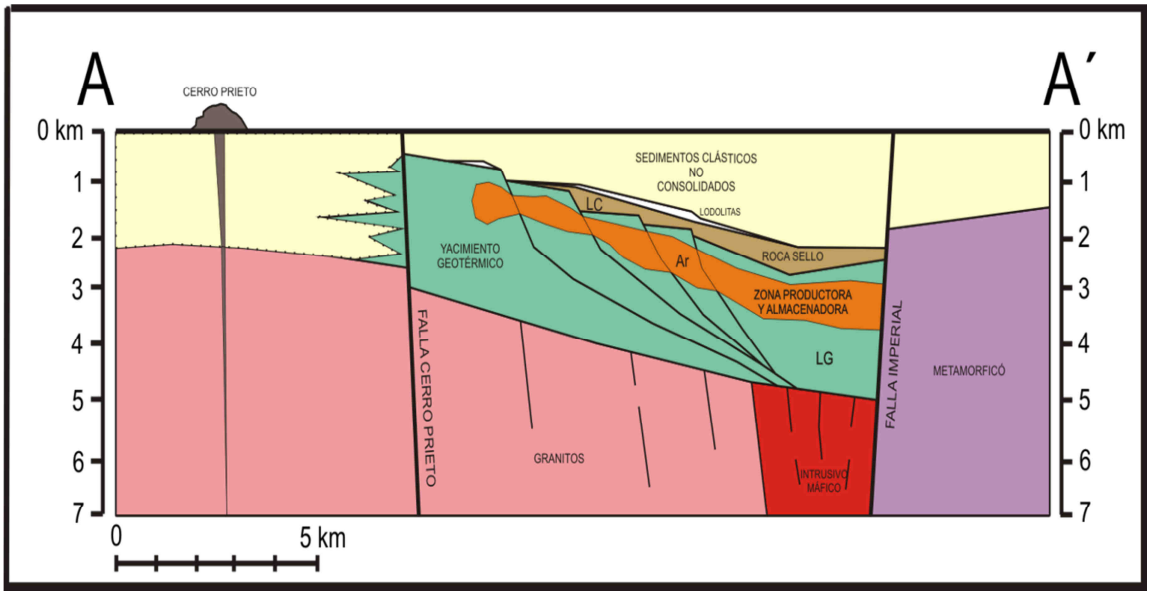

Figura 4. Sección geológica general A-A´ (Para ubicación ver Fig. 3).

II.2. Aspectos hidrogeológicos del acuífero superficial.

El acuífero superficial del Valle de Mexicali, de uso predominante agrícola, está situado en la unidad litológica de sedimentos clásticos no consolidados, anteriormente descrita; presente desde la superficie del terreno y con una distribución espacial acorde con el desarrollo del Delta del Río Colorado, pudiéndose clasificar esta litología en dos grupos:

- Detrítico Grueso: Arenas, arenas limosas y gravas, indicando sub-ambientes deltaicos más energéticos presentes en el noreste del Valle.
- Detrítico Fino: Arenas finas, limos y arcillas, que sugieren sub-ambientes de menor energía, observados en la planicie de inundación.

La región occidental del valle, presenta básicamente relleno, con origen en los abanicos aluviales, descendientes de la Sierra Cucapá e intercalados con depósitos deltaicos mencionados en el párrafo anterior; siendo al oeste de la Laguna de Evaporación del CGCP, el contacto entre abanicos y delta.

Con lo anterior se logra interpretar tres paleo-ambientes de depositación presentes en la zona de estudio: (Figura 5) (Vázquez González, 1999).

- Ambiente de Planicie Deltaica: Dominado por procesos fluviales.
- Ambiente Lagunar: Definido en el Campo Geotérmico.
- Ambiente de Abanicos Aluviales: Conos de deyección descendientes de la Sierra Cucapá.

Desde el punto de vista hidrológico y complementado por la geología descrita en este apartado, es posible sintetizar que el acuífero superficial en el área del CGCP, corresponde con un acuífero de tipo libre no homogéneo, de espesor variable, ubicado en una secuencia de sedimentos mayormente de origen deltaico, con intercalaciones de materiales de distinta permeabilidad, lo que genera situaciones locales de confinamiento, pero que en conjunto y para propósitos de este trabajo, se comporta como una misma unidad geohidrológica (Vázquez et al., 1998).

II.3. Relieve y Geomorfología.

En el área de interés, el relieve topográfico es prácticamente plano, siendo el límite noroeste la parte más elevada, con promedio de 20 msnm, y disminuyendo hacia el este donde se presentan elevaciones del orden de los 12 msnm.

Interrumpiendo abruptamente esta configuración topográfica destaca la presencia del volcán de Cerro Prieto, en la porción occidental del área de estudio; cuya estructura consta de dos centros eruptivos superpuestos y es el origen de los afloramientos de rocas volcánicas andesíticas y riodaciticas en superficie.

Respecto a la geomorfología general de la zona del Valle de Mexicali (Ariel, 1967; CNA, 1992; Ramírez, 1997) coinciden en distinguir cuatro unidades fisiográficas presentes: planicies, mesetas, terrazas y montañas (Figura 6).

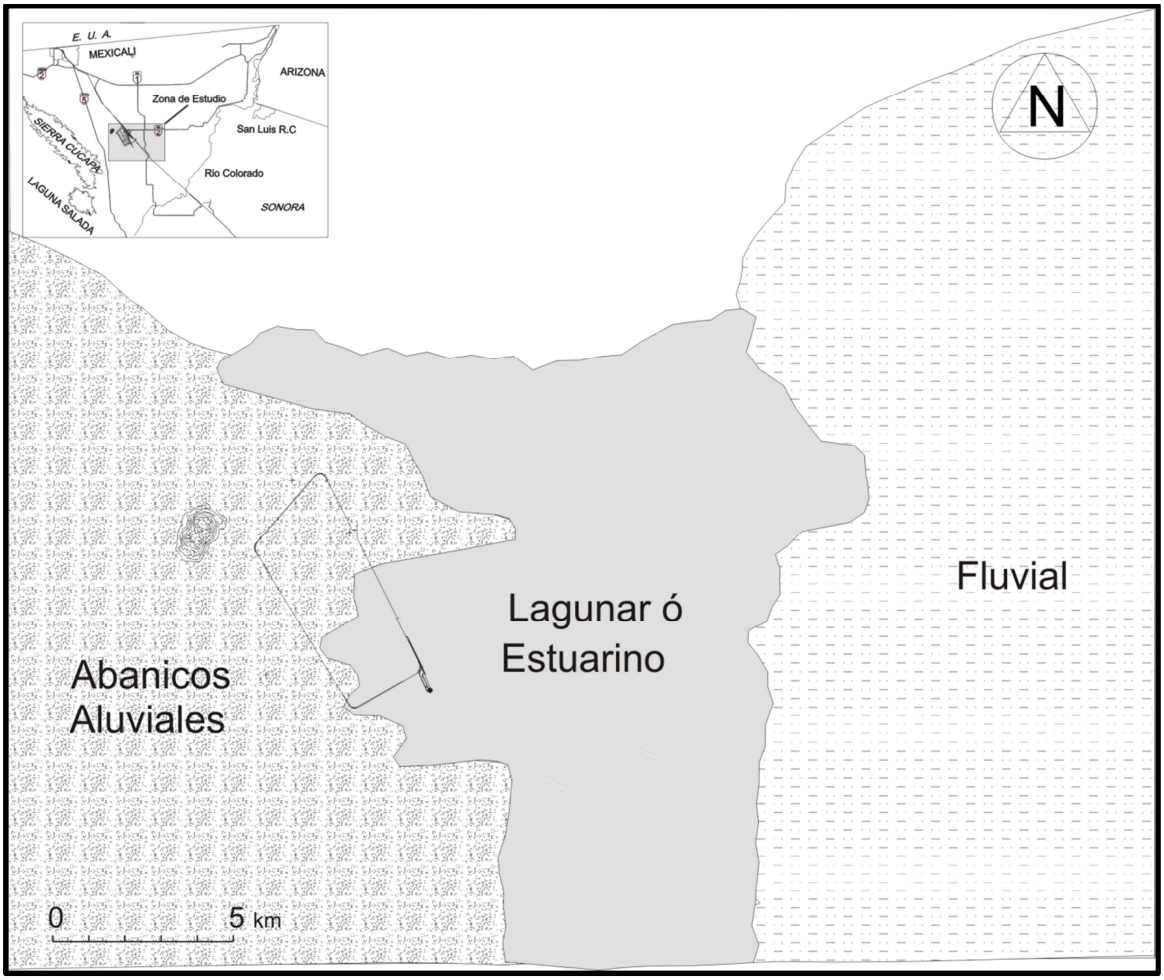

Figura 5. Definición de ambientes de depositación presentes en el Valle de Mexicali (Modificado de Vázquez, 1998).

La zona de interés, se ubica en la planicie de inundación del delta del Río Colorado. Las mesetas se presentan en forma de escalones en el contacto con la planicie, la mayor de estas es la Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado. En cuanto a las terrazas aluviales, estas están presentes al pie de la Sierra Cucapá, mientras que las montañas son la ya mencionada Sierra Cucapá y Sierra El Mayor.

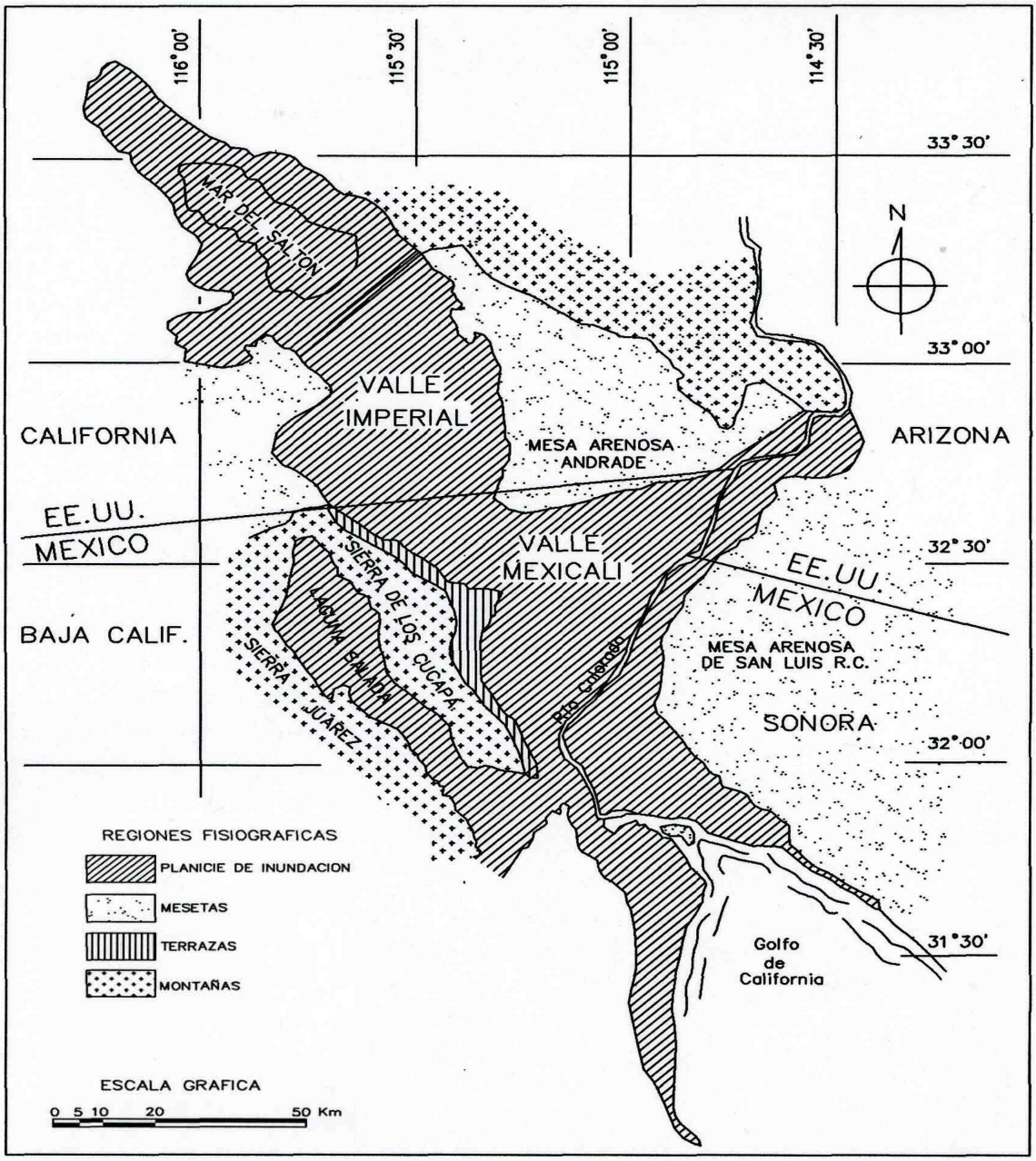

Figura 6. Unidades fisiográficas (Tomada de Ramírez, 1997).

II.4. Deformación del Terreno.

Las deformaciones de terreno son problemas de gran importancia principalmente en zonas de rápido crecimiento urbano siendo la expresión superficial de varios procesos físicos tanto subterráneos como superficiales. Incluyendo actividad sísmica, erupciones volcánicas, construcción de infraestructura y subsidencia del terreno. La ocurrencia de dichos procesos puede tener como origen fenómenos naturales o antropogénicos, o combinación de ambos. El monitoreo, análisis e interpretación de las deformaciones del terreno requieren estudios multidisciplinarios que, permiten un mejor entendimiento de sus factores causantes y mecanismos (Sarychikhina, 2010).

El valle de Mexicali, es un ejemplo de región inestable, donde las deformaciones del terreno se han puesto cada vez más evidentes en zonas urbanas y rurales; debido a varios mecanismos, incluyendo la tectónica activa, actividad volcánica y antropogénica, propician cambios rápidos en la topografía.

Las deformaciones de terreno en el Valle de Mexicali han sido monitoreadas por una serie de nivelaciones de precisión y GPS, conducidos principalmente por la CFE, y actualmente se monitorean con una red de instrumentos geotécnicos (inclinómetros, extensómetros y piezómetros) de medición semi-continua instalada y mantenida por CICESE.

Estas técnicas terrestres y directas proporcionan la información precisa de las velocidades de desplazamiento de una serie de puntos discretos en una superficie que se está deformando. Sin embargo, la colección de datos usando esta técnica es costosa y consumidora de tiempo. Por otra parte, requiere una gran cantidad de observaciones, que no siempre son posibles o de buena calidad.

En el Valle de Mexicali, hasta los años 90 las deformaciones observadas se atribuían solamente al tectonismo natural. Sin embargo, tras casi 40 años de explotación del yacimiento geotérmico, estudios geodésicos, monitoreo geotécnico y estudios geotectónicos han permitido determinar la componente tectónica y antropogénica de la subsidencia (Glowacka, 2005 y Sarychikhina, 2010).

II.5. Aspectos Geohidrológicos.

El acuífero somero en la zona del CGCP forma parte del acuífero regional del Valle de Mexicali. El agua del Valle de Mexicali se aprovecha principalmente para riego y generación de energía eléctrica; el 80 % del Valle corresponde a tierras de cultivo, el 20 % restante: áreas pobladas, suelos no aptos para cultivo y el CGCP.

Los estudios geohidrólogicos en el Valle se enfocan por separado al acuífero superficial y al movimiento de fluidos dentro del yacimiento geotérmico.

Los estudios del acuífero superior se apoyan en pozos terminados en la zona de Sedimentos Clásticos No Consolidados y con profundidades menores a 800 m; mientras que para el yacimiento geotérmico los estudios se han basado en pozos terminados a más de 1,100 m y en la zona de Sedimentos Clásticos Consolidados.

II.5.1. Hidrología Superficial.

II.5.1.1. Ríos.

Al Valle de Mexicali lo corta el Río Colorado, y dos afluentes el Río Nuevo y el Río Hardy, (Figura 1).

El Río Colorado tiene una longitud total de 2,730 km, de los que 29 km son un tramo limítrofe entre México y Estados Unidos frente a Baja California y Arizona. Los últimos 185 km corren por el territorio mexicano. Todo el escurrimiento del Río Colorado se origina principalmente por los deshielos en la parte montañosa de la Meseta del Colorado y desemboca en el Golfo de California, observándose de manera general en la dirección norte a sur una pendiente de 0.3 % (Colección del Archivo Histórico Diplomático Mexicano, 1975).

El Río Colorado tiene un volumen total de escurrimiento anual estimado en 18,000 Mm^3, de los cuales México tiene asignado recibir 1,850 Mm^3 anuales de acuerdo al Tratado Internacional de Aguas celebrado entre México y Estados Unidos en 1944 (Colección del Archivo Histórico Diplomático Mexicano, 1975).

El Río Nuevo tiene su inicio a 3.2 km al SE de la ciudad de Mexicali, pasando por la zona urbana y cruza el límite fronterizo entre México y Estados Unidos al oeste de Caléxico, con dirección norte hacia el Mar de Salton. El caudal está compuesto por aguas de drenaje agrícola del Distrito de Riego del Valle de Mexicali, descargas de aguas negras y desagües de la ciudad de Mexicali.

El Río Hardy presenta un desarrollo de meandros que contrasta con el estrecho valle fluvial del cauce principal de Río Colorado. Actualmente drena el extremo sur-occidental del acuífero superficial del Valle, la antigua zona de la Laguna de los Volcanes y las escorrentías ocasionales en los abanicos aluviales de la Sierra El Mayor.

II.5.1.2. Canales Agrícolas y Drenes.

La red de canales de conducción de agua para riego del distrito 014, cuenta con aproximadamente 3,442 km de longitud, comprendiendo la red primaria y la red secundaria, ambas revestidas con concreto tipo hidráulico. La red se construyó con la finalidad de distribuir el agua proveniente del Río Colorado, una vez que esta llega a la Presa Morelos para posteriormente derivarla por los canales que cuya traza cruza el Valle de Mexicali de norte a sur y de este a oeste.

La red de drenaje a cielo abierto del Distrito de Riego 014 cuenta con aproximadamente una longitud de 1,425 km, que incluye las redes principales y secundarias. Este sistema de drenaje se diseñó con el objeto de desalojar el agua excedente del riego, evitando con ello la concentración de sales en las primeras capas del suelo y que representan el mayor interés agrícola. La circulación de esta red inicia donde termina la antigua zona de pozos al NE del Valle y avanza en dirección SW, hasta la parte central del Valle donde la topografía del terreno genera un parteaguas, dividiendo la red en dos direcciones: una dirigiéndose hacia el sur, con rumbo al Río Colorado para descargar en el Golfo de California; y la otra dirige su descarga hacia el Río Nuevo fluyendo en dirección norte, hacia la cuenca de Salton.

II.5.2. Pozos.

La perforación de pozos en el Valle de Mexicali se inició desde 1956, no existiendo un control sobre su ubicación y su gasto. La única condición existente en esa época era, que la construcción de los pozos guardara una separación mínima de 1 km entre ellos. Ubicados preferentemente a lo largo del cauce del Río Colorado. Ariel Construcciones en 1967, concluyó que, de seguir con la perforación de nuevos pozos a lo largo del afluente y teniendo tan cerca la presencia del Golfo de California, serían las condiciones idóneas, para propiciar la intrusión salina en el acuífero, por lo que propuso una franja fronteriza de explotación desde la ciudad de Mexicali hasta el extremo oriente de la Mesa de San Luis; debido a tal situación observada, en 1968 se continúa el primer estudio geohidrólogico, con la perforación por parte de la Secretaria de Recursos Hidráulicos 51 pozos de estudio (18 de bombeo y 33 de observación, conocidos como los pozos de la serie G) y los pozos del plan Lesser servirían como pozos de observación abarcando casi en su totalidad todo el Valle (Ariel, 1968). Para el año de 1972 se contaba con 127 pozos de observación distribuidos en el Valle de Mexicali (SARH, 1972).

II.5.2.1. Extracción y Evolución del acuífero del Valle de Mexicali.

Se tienen registros de que la extracción de agua por bombeo inició en 1902 para regar 15 has, aumentando en 1926 a 138 has (López, 1991). Fue hasta 1950 cuando la explotación de agua por bombeo sufrió un incremento considerable aunado a que el agua aportada por los Estados Unidos fue insuficiente 1,677 Mm^3/año para el Valle, y así regar las poco más de 100,000 has.

Posteriormente, en 1966 el área regada aumento a 70,000 has con una infraestructura de alrededor de 617 pozos que extraían cerca de 1,160 Mm^3/año; durante esos años se observa un abatimiento estimado de – 4.04 m, resultando en un abatimiento medio anual del orden de 37 cm/año. Este decaimiento en el nivel estático, corresponde a una extracción media anual de 1,100 Mm^3.

II.5.3. Propiedades del Acuífero.

El acuífero somero está emplazado en la unidad litológica correspondiente a los depósitos deltáicos cuaternarios no consolidados. Esta unidad presenta una distribución espacial acorde en términos generales, al desarrollo progresivo del delta del Río Colorado. Se presenta el contacto abanicos – delta situado aproximadamente en el borde oeste de la laguna de evaporación en la zona del CGCP. La Sierra Cucapá y El Mayor representan el límite oeste de los sedimentos no consolidados, por ende, del acuífero somero, funcionando como fronteras del flujo de agua subterránea (Vázquez González, 1999).

El espesor de los sedimentos deltáicos no consolidados, donde se encuentra ubicado el acuífero, se incrementa en dirección noreste, partiendo al oeste del CGCP con un espesor entre 350 a 400 m, formando en dirección NNW – SSE, la parte más somera de la base del acuífero; mientras que la profundidad del horizonte impermeable se incrementa hasta valores superiores a los 2,000 m, en el borde oriental de la zona geotérmica y hacia el NW entre el CGCP y la Sierra Cucapá espesores similares (Venegas y Arellano, 1992).

Lo anterior ha permitido identificar tres ambientes de depositación presentes en el área: a) facies de planicie deltáica en la parte oriental constituida de arenas y gravas; b) facies de ambiente lagunar o estuario hacia la porción central, presentando predominantemente arcillas y limos con algunos cuerpos lenticulares de arena; c) facies distales o abanicos aluviales desde el limite oeste de la zona de lodos hasta la Sierra Cucapá, compuestos por arenas gruesas, gravas y cantos rodados, (Figura 5) (Vázquez González, 1999).

La información disponible sobre las propiedades hidráulicas de los materiales en el acuífero, es muy limitada, por lo cual se hace mención de los intervalos de variación propuestos por (Vázquez González, 1999) en los parámetros de conductividad hidráulica y del coeficiente de almacenamiento en los sedimentos presentes en los tres ambientes de depositación, Tabla I.

Tabla I. Propiedades hidráulicas en los ambientes de depositación.

Ambiente / Parámetro	Facies de Planicie Deltáica	Facies de Ambiente Lagunar o Estuario	Facies Distales o Abanicos Aluviales
Conductividad hidráulica (m/seg)	10^{-3} a 10^{-4}	10^{-6} a 10^{-7}	10^{-2} a 10^{-3}
Coeficiente de almacenamiento	0.1 a 0.2	10^{-4} a 10^{-2}	0.2 a 0.3

El flujo subterráneo que entra en la zona de interés, tiene una dirección principal de NE a SW con un gradiente hidráulico promedio de 0.4 m/km, calculado según la superficie piezométrica para 1995 (Vázquez González, 1998).

II.5.4. Recarga.

La fuente de recarga principal del acuífero del Valle de Mexicali, era antiguamente el Río Colorado, el cual ha disminuido su caudal debido a la construcción de varias obras de control aguas arriba en los Estados Unidos. Las fuentes de recarga modernas son por un lado la infiltración que se produce en los canales de conducción así como también la aportación por el riego parcelario; sin dejar a un lado los caudales extraordinarios del Río Colorado.

II.5.4.1. Recarga Subterránea.

De los pocos trabajos geohidrólogicos realizados exhaustivamente en el Valle, Ariel Construcciones (1968), utilizando los datos de las transmisividades obtenidas por pruebas de bombeo y aplicando la Ley de Darcy estimó un flujo subterráneo en la frontera México – Estados Unidos de 200 Mm^3/año, distribuidos de la forma siguiente: 80 Mm^3/año a través de la frontera norte de Baja California, 70 Mm^3/año por la frontera que comparten Arizona y Baja California; mientras que los 50 Mm^3/año restantes, provienen de la Mesa Arenosa de San Luis.

II.5.4.2. Infiltración por Aguas Superficiales.

Desde 1992, existe la entrada al acuífero de aguas residuales provenientes de la ciudad de San Luis Río Colorado, siendo estas descargadas libremente al cauce del Río Colorado a razón de 250 lps equivalentes a 7.88 Mm^3/año (Paredes Arellano, 1992).

II.5.4.3. Infiltración Vertical.

La recarga vertical en el acuífero somero obtenida en 1968 fue de 500 Mm^3/año por la perdida en la red de canales, de la infiltración de agua de riego y flujo ascendente desde acuíferos más profundos. Estos cálculos se hicieron tomando la cuantificación de hectáreas regadas por un pozo determinado, los tipos de cultivos de dicha superficie, así como las técnicas de riego utilizadas (Ariel, 1968).

Durante el ciclo 1989 – 1990 se evaluó la infiltración vertical a través de la estimación de pérdidas totales que se originan en los canales de conducción. Dicha pérdida total fue aproximada al 24 % del volumen total que se condujo en ese periodo, siendo una la cifra aproximada de 2,950 Mm^3/año. Se consideró que de ese porcentaje, solo el 15 % alcanza el acuífero y por lo tanto puede ser considerado como infiltración directa siendo alrededor de 442 Mm^3/año. Además, se estimó que la infiltración vertical por riego, podría ascender a 457 Mm^3/año, este valor se obtuvo, considerando que el volumen total entregado a los usuarios ascendió a 2,242 Mm^3, de los cuales el 66 % es aprovechado por la planta (eficiencia parcelaria) y el resto se pierde; donde de esta perdida, se observó que, tan solo el 60 % se percola y el 40 % restantes se evapora. Esta aproximación del volumen infiltrado cuenta con varias restricciones (tipo de cultivo, método de riego, clima, etc.); sin embargo, no se cuenta con mejores estimaciones para llevar a cabo un balance hidrológico (Escamilla, 1991).

II.5.5. Descarga.

Se considera descarga al volumen de agua que sale del sistema hidrológico del Valle de Mexicali. Este fenómeno se puede generar mediante flujos subterráneos, por descargas a cauces superficiales, por extracción en pozos o bien por evapotranspiración.

II.5.5.1. Extracción en Pozos.

Ariel (1968) estimo el volumen descargado debido a la extracción en pozos en aproximadamente 1,100 Mm^3/año. El promedio de las descargas reportadas por CNA para el periodo de 1957 a 1994 fue de 926 Mm^3/año. No obstante esta cifra incluye el volumen extraído del yacimiento geotérmico de más de 1,000 m de profundidad, el cual se comporta como un acuífero confinado. No contabilizando este volumen se tiene un promedio durante el mismo periodo de 893 Mm^3/año.

En la actualidad se estima una extracción en el Valle de 719 Mm3/año, que al compararse con la recarga del acuífero calculada de 700 Mm^3/año se puede observar una clara sobreexplotación del sistema (Secretaria de Fomento Agropecuario, Gobierno de Baja California, 2010).

II.5.5.2. Descarga Subterránea.

Ariel (1968) estimo que en el Valle de Mexicali, alrededor de 500 Mm^3/año del total extraído en los pozos provienen tanto de la recarga subterránea como del almacenamiento. A su vez, estima que 25 Mm^3/año regresan a Estados Unidos hacia el Mar de Salton como descarga del acuífero en la porción NNE del valle.

II.5.5.3. Evapotranspiración Potencial.

La evapotranspiración potencial del Valle de Mexicali, calculada por el método de Penman, a partir de datos de 12 estaciones meteorológicas, se estimó en 3,023 mm/año (Hernández Blanket, 2001).

II.6. Aspectos Geotérmicos.

II.6.1. Yacimiento Geotérmico.

En 1959 debido al aumento en la demanda de energía eléctrica, se inició en el Valle de Mexicali la exploración en la zona conocida como Laguna de los Volcanes, a causa de su importante manifestación geotérmica superficial y con el objetivo de evaluar así su potencial para producir energía eléctrica a partir de la extracción de vapor geotérmico.

El yacimiento está contenido en la unidad de sedimentos clásticos consolidados, específicamente en la unidad de intercalación de lutitas y areniscas, como se hizo mención; la secuencia sedimentaria ha sido alterada hidrotermalmente, dando origen a la formación de clorita e illitia y la adición de cementante calcita, ocasionando entre otros efectos el auto sellamiento y endurecimiento de sedimentos (Lyons y Van de Kamp 1980, Elders et al. 1984).

Aunado a lo anterior, la actividad tectónica en la zona originada, en el sistema de fallas principales Imperial y Cerro Prieto NW-SE y las fallas secundarias perpendiculares al anterior sistema, fallas H, L, S (Halfman et al. 1984), ha ocasionado el desplazamiento vertical por secciones de los estratos. El resultado de estos desplazamientos y la alteración hidrotermal, es una estructura compleja en el yacimiento, presentando horizontes productores de vapor a diferentes profundidades, que más tarde con base a varios estudios y la información de columnas litológicas, fueron definidos como reservorios Alfa, Beta y Gamma (Domínguez y Sánchez, 1981).

II.6.2. Laguna de Evaporación.

La generación de energía eléctrica en el CGCP se inició en 1973 con una capacidad instalada de 75 MW, actualmente se cuanta con infraestructura capaz de producir 720 MW.

Conforme se incrementó la generación de energía eléctrica aumento la extracción de fluido geotérmico (mezcla agua-vapor), donde el periodo más importante corresponde al periodo 1986-1987 cuando comienzan operaciones las plantas CP-II y CP-III. Los volúmenes de salmuera de deshecho han sido depositados en una laguna superficial, con el propósito de que el agua se evaporará y sus sales fueran aprovechadas industrialmente. La laguna de evaporación está emplazada parcialmente sobre lo que antiguamente comprendía la zona de manantiales hidrotermales, alcanzando una extensión actual de aproximadamente 18.45 km^2.

En 1989 CFE inicio un importante e intenso programa de inyección de la salmuera de deshecho directamente al reservorio a través de pozos no productores, principalmente al estrato más somero Alfa. De tal forma que en 1993 se reportan caudales inyectados de aproximadamente el 45 % de la salmuera total (Gutiérrez y Ribó, 1994). Este programa permitió a CFE dejar atrás la práctica de desalojar la salmuera excedente, principalmente en invierno, hacia el Río Hardy.

II.7. Análisis de Actividad Sísmica.

Se espera que la deformación impuesta por un sismo produzca un cambio en el nivel de agua subterránea. En un simple modelo lineal, los niveles de agua subterránea suben o bajan dependiendo de si el acuífero conectado se contrae o se dilata debido a la redistribución de vacíos por la deformación inducida.

Los monitoreos de actividad sísmica en áreas geotérmicas en explotación pueden mostrar la existencia de sismicidad inducida asociada a las operaciones de aprovechamiento del yacimiento. Ésta debida a la extracción del fluido, a la reinyección o a ambas. De manera general se obtiene información relacionada con el comportamiento dinámico del reservorio y puede eventualmente poner en evidencia cambios significativos en el patrón local de sismicidad.

Con el objetivo de contar con información de la actividad sísmica en la zona y analizar su posible correlación con las variaciones en el nivel del agua en los

pozos que serán analizadas en este trabajo, se consideraron inicialmente dos catálogos para la zona de interés en el Valle de Mexicali: el de RESNOM (Red Sismológica del Noroeste de México) editado por CICESE y el de USGS-Caltech (US Geological Survey and California Institute of Technology) para el periodo de 2003-2008 y considerando todas las magnitudes entre 0 y 7 Ml.

II.8. Red Piezométrica.

En el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, se realizaron trabajos de perforación por parte de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC), a petición de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, que solicitó la realización de un pozo de 500 m de profundidad, así como el diseño y terminación de 10 piezómetros, mas con una profundidad promedio de 150 m. (CFE, 1998).

II.8.1. Perforación de Piezómetros.

Para esta actividad, se contempló la utilización de una maquina Porta-Drill empleándose barrenas tricónicas, debido a que se pensaba se cortarían sedimentos compactados del tipo conglomerados, arenisca, limolitas y lutitas, que son secuencias típicas de ambientes de depósito tipo deltaico. Sin embargo, debido a la poca consolidación del terreno, la técnica utilizada para la perforación fue mediante barrenas tipo navajas (CFE, 1998).

II.8.2. Diseño y Terminación de Piezómetros.

La terminación y diseño de los pozos fueron modificados dos veces del diseño original, lo anterior debido a la complejidad de estabilidad que presenta el área en el subsuelo, ya que la columna litológica encontrada consiste en una alternancia de sedimento de origen deltaico y que consta de secuencias de arena de grano medio, fino y muy fino, y arcillas que por estar saturadas, no permiten sostener las paredes de los pozos debido a su expansión (CFE, 1998).

De los piezómetros perforados por CFE, han sido 7 en los que, se tiene o tuvieron instalados medidores de registro continuo de nivel (Levelogger), (PZ-1, PZ-3, PZ-4, PZ-5, PZ-6, PZ-7 Y PZ-9) y que complementados por los pozos (C-3, II-5B y G-1-17) pertenecientes a otros trabajos, integran el conjunto de pozos analizados en este trabajo; a continuación, se enlista la relación completa de los pozos mencionados, con sus coordenadas de localización y profundidad, Tabla II.

Tabla II. Ubicación de pozos, coordenadas de ubicación y profundidad de terminación.

CLAVE	COORDENAS GEOGRAFICAS (WGS 84)		PROFUNDIDAD (m)
	LONGITUD	LATIITUD	
C-3	-115.313	32.430	201.00
II-5B	-115.221	32.418	25.00
PZ-1	-115.235	32.405	507.30
PZ-3	-115.215	32.435	159.00
PZ-4	-115.230	32.355	159.60
PZ-5	-115.233	32.335	147.40
PZ-6	-115.169	32.434	165.75
PZ-7	-115.173	32.409	171.50
PZ-9	-115.251	32.428	159.55
G-1-17	-115.125	32.407	200.00

En base a la tabla anterior, se muestra la ubicación de los pozos considerados para este trabajo, dentro del área del CGCP (Figura 7).

II.9. Niveles Piezométricos.

En los pozos anteriormente mencionados, se instalaron medidores de registro continuo (Levelogger) de la marca Solinst, serie Junior y que algunos fueron remplazados por instrumentos de la serie Gold; teniendo como principal diferencia la memoria disponible, teniendo una capacidad de 32, 000 y 40, 000 lecturas respectivamente, en periodos programables desde 0.5 s hasta 99 h.

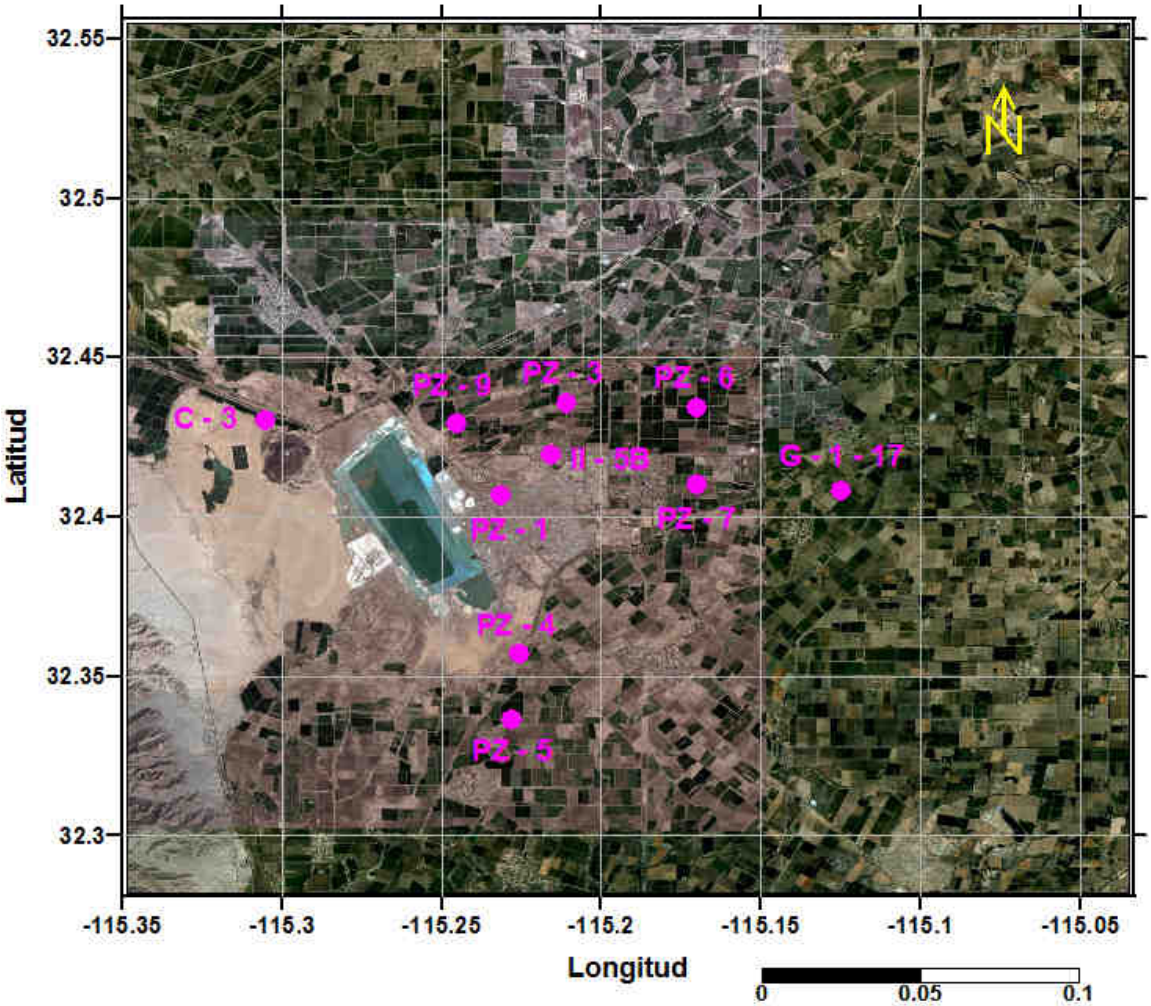

Figura 7. Ubicación de los pozos de monitoreo con registros de nivel piezométrico.

Cuando el instrumento es colocado por encima de la superficie piezométrica (nivel estático), mide la presión barométrica, convirtiendo el valor a una columna de agua equivalente, por encima del instrumento y aplicando un factor de 950 cm para determinar el cero de referencia. Cuando el Levelogger es sumergido, mide una combinación de presión barométrica y presión hidrostática, y de igual manera, convierte la medición a la presión ejercida por una columna de agua equivalente (Solinst, 2011).

Al registro obtenido, debe de aplicarsé una compensación por presión barométrica, para obtener solamente el valor del nivel piezométrico observado. El mejor método para realizar esta compensación, es tener instalado un medidor de presión barométrica, en este caso Barologger, por encima del nivel piezométrico o en superficie, para obtener mediciones de presión barométrica, programado en el mismo periodo de muestreo que el Levelogger (Solinst, 2011).

El periodo de muestreo programado en el instrumento, es mayormente de 5 min, con lo que se obtiene alrededor de 105 000 lecturas en un año completo de monitoreo. También hay presentes, intervalos con registro a cada 2 y 3 minutos, los cuales fueron utilizados para actividades específicas.

A continuación en la Tabla III se muestran los pozos y los años, con los que se cuenta registro, en la base de datos.

Tabla III. Información disponible por pozo y año.

POZO	2003	2004	2005	2006	2007	2008
C-3	----	OK	OK	OK	OK	OK
II-5B	OK	OK	OK	----	----	----
PZ-1	OK	OK	OK	OK	OK	OK
PZ-3	OK	OK	OK	OK	OK	OK
PZ-4	OK	OK	OK	OK	OK	OK
PZ-5	OK	OK	OK	OK	OK	OK
PZ-6	OK	OK	----	----	OK	----
PZ-7	----	----	----	OK	OK	----
PZ-9	----	----	----	----	OK	----
G-1-17	OK	OK	OK	OK	OK	OK

En este momento es pertinente mencionar que los registros, con los que se cuenta en los años enlistados, no corresponden a mediciones a lo largo de todo el año completo, dado que debido a actos de vandalismo, falla general del instrumento, y otras causas, encontramos periodos importantes con falta de información en nuestra base de datos.

II.10. Presión Barométrica.

Durante el intervalo de tiempo considerado para este trabajo se instalaron 2 barómetros en la zona de estudio, para realizar una correcta compensación por presión barométrica. Se eligieron un par de instrumentos Barologger (Solinst, modelo 3001), el Barologger es un Levelogger con un rango de medición de 150 cm, adecuado para monitorear las fluctuaciones de presión atmosférica, con una precisión de 0.1 cm y resolución de 0.3 cm. Con la premisa de que el valor medido se convierte a la presión ejercida por una columna de agua equivalente. Un Barologger puede ser usado para compensar todos los Leveloggers en un radio de 20 km en la horizontal y 300 m en cambio de elevación. La instalación de ambos instrumentos Levelogger y Barologger, es el que se ilustra (Figura 8).

II.11. Temperatura.

El monitoreo de la temperatura tanto subterránea como superficial, es de suma importancia en situaciones donde esta fluctúa significativamente; dado que la temperatura afecta el nivel del fluido, debido a que de ésta depende su viscosidad y conductividad hidráulica; o monitorear algunos contaminantes que reaccionan a ciertas temperaturas *(*Solinst, 2011).

El Levelogger tiene la capacidad de medir la temperatura de fluido, para esto está previsto de una resistencia de platino que mide la temperatura, si bien el rango térmico de operación del instrumento va de -20 a 80 ℃, compensaciones fuera del rango de -10 a 40 ℃ pierden precisión.

En cuanto a la temperatura superficial, se consultó la base de datos climáticos del Noroeste de México del Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC-BC), estación meteorológica No. 2033 Mexicali, B.C. (32.650 latitud, -115.450 longitud), para el periodo de estudio, (2003 – 2008). Dicha estación del tipo automática, tiene registro de variables climáticas a cada 10 minutos, lo que representa una gran bondad, puesto que nuestra periodo de medición es de 5 min, con lo que mediante una interpolación lineal fue posible

igualar el periodo de muestreo, reduciendo la incertidumbre presente al utilizar datos con mayor periodo de muestreo.

Figura 8. Instalación de instrumentos Levelogger y Barologger.

II.12. Precipitación.

Se recurrió a los registros de la estación meteorológica No. 2033 del (PEACC-BC), realizándose un proceso de interpolación lineal con un código en Matlab (Mathworks, 2008), para ajustar el periodo de muestreo.

II.13. Marea Gravitacional Teórica.

La marea terrestre junto con las variaciones de presión barométricas, bajo ciertas condiciones (ausencia de actividad sísmica), son las principales causas de fluctuaciones en nivel piezométrico dentro de los pozos. Motivo por el cual, es de suma importancia calcular la marea gravitacional.

Capítulo III.

Metodologías de Análisis.

III.1. Efectos Barométricos en Pozos.

Las fluctuaciones debidas a cambios de presión barométrica, se pueden representar como un esfuerzo plano aplicado directamente en toda la superficie del terreno y en la superficie libre del agua en pozos abiertos. La manera en que el sistema pozo – acuífero responde a esta variación de esfuerzos es variable y directamente relacionada con el grado de confinamiento del acuífero y las características de almacenamiento hidráulico en el pozo.

Se identifican tres modelos conceptuales que describen la respuesta en las mediciones de nivel del agua dentro del pozo asociados con los cambios de presión barométrica. Estos incluyen una respuesta instantánea en acuíferos confinados, un retraso en la respuesta en acuíferos libres (asociado con el retraso de la transmisión de la presión de la presión a través de la zona no saturada) y una última respuesta también atrasada asociada con las características del pozo (Well-Bore Storage, Well-Skin Effects).

Un método para distinguir la respuesta operativa de cada uno de los modelos mediante gráficos de diagnóstico, fue propuesto por (Rasmussen and Crowford, 1997) y que siguen el patrón mostrado (Figura 9).

Cada modelo de respuesta tiene un patrón de forma característico que puede ser utilizado para distinguir el tipo de acuífero.

Como es de esperarse, se pueden presentar respuestas que combinen efectos de almacenamiento propios del pozo y cada una de las condiciones de confinamiento de los acuíferos.

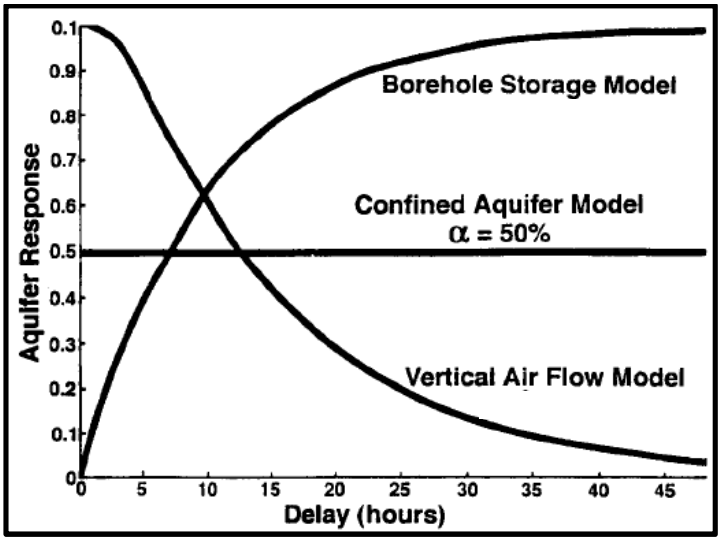

Figura 9. Modelos de respuesta a cambios de presión barométrica (Rasmussen, 1997).

La deconvolución de regresión es una técnica útil para estimar como un parámetro en un sistema, responde a un estímulo y la respuesta no es instantánea y la magnitud de la reacción varia en el tiempo. El método también tiene la bondad de remover más ruido de los datos que usando una eficiencia barométrica constante, debido a que incorpora la transición natural de la eficiencia barométrica en el pozo. Un sistema de ecuaciones lineales como el siguiente, se establece para estimar la función de respuesta barométrica.

$$\Delta W(t) = \alpha(0)\Delta B(t) + \alpha(1)\Delta B(t-1) + \alpha(2)\Delta B(t-2) + \cdots + \alpha(m)\Delta B(t-m) \qquad (1)$$

$$\Delta W(t) = \sum_{i=0}^{m} \alpha(i)\Delta B(t-i) \qquad (2)$$

Dónde *ΔW(t)* y *ΔB(t)*: son los cambios en el nivel del agua y la presión barométrica al tiempo *t*, respectivamente. *ΔB(t-1)*: es el i-esimo cambio de presión barométrica antes de t. *α(i)*: es la función de respuesta al tiempo de retraso i.

Para una respuesta instantánea, solo el primer término *α(0)* es usado, y el resto de los términos son cero. Aunque en general, las funciones de respuesta barométrica tienen más de un tiempo de retraso, debido a condiciones de almacenamiento en el pozo o condiciones del acuífero. La función de respuesta es encontrada usando mínimos cuadrados ordinarios, una vez que los valores de *α(i)* son definidos, la función de respuesta barométrica *A(j)* es calculada mediante la suma de impulsos de respuesta:

$$A(j) = \sum_{j-1}^{i} a(i) \tag{3}$$

La relación entre eficiencia barométrica y cada modelo de respuesta, se presenta a continuación.

III.1.1. Acuíferos Confinados.

Para acuíferos confinados, la transmisión de los efectos de presión atmosférica es instantánea. Siendo función del grado de confinamiento, matriz de rigidez del medio y peso específico del agua.

Jacob (1940) fue el primero en definir el cambio asociado a la respuesta barométrica en el nivel del agua dentro de un pozo abierto que monitoreaba un acuífero confinado, nombrando a esta relación como eficiencia barométrica.

$$BE = -\gamma_{fc}\left(\frac{\Delta h_W}{\Delta P_A}\right) \tag{4}$$

Dónde γ_W: peso específico del agua, Δh_W: cambio en el nivel del agua, y ΔP_A: cambio en la presión atmosférica. El signo menos se refiere a la relación inversa entre el nivel del agua y el cambio de presión barométrica.

Cuando se presentan valores altos de eficiencia barométrica, son el reflejo de una alta resistencia y rigidez de los materiales que conforman el acuífero, mientras que bajas eficiencias barométricas indican formaciones altamente comprensibles.

III.1.2. Acuíferos Libres.

La respuesta en los pozos terminados en acuíferos libres, presentan un mecanismo de respuesta diferente al descrito para acuíferos confinados.

Como se observa en la (Figura 9), el patrón de respuesta para un acuífero libre, muestra un decremento en el nivel del agua para un cambio de presión, conforme incrementa el tiempo de retraso de la respuesta. Este patrón característico es causado por un desbalance en la presión atmosférica dentro del sistema pozo – acuífero.

En un acuífero libre, los cambios de presión atmosférica son transmitidos instantáneamente en la superficie libre del agua dentro del pozo, pero se presenta un retraso en tiempo en la respuesta en el nivel freático del acuífero, debido al movimiento de la presión atmosférica a través de la zona vadosa y trasmitir el cambio de presión barométrica.

La razón de movimiento del aire dentro de la zona no saturada, es función directa de la difusividad neumática vertical (Weeks, 1979), que a su vez, es función de la permeabilidad vertical de la zona no saturada, el contenido de humedad y la compresibilidad del gas contenido.

Para zonas vadosas con baja difusividad neumática $^{y}/_{o}$ espesores importantes, los pozos en acuíferos libres mostrarán mayores fluctuaciones en el nivel del agua (altos valores de eficiencia barométrica) a causa de variaciones en la presión barométrica; este tipo de comportamiento, es similar al que se observa en acuíferos confinados, sin embargo, cuando se analizan los gráficos de diagnóstico como el de la (Figura 9), se observan distintos patrones de respuesta.

III.1.3. Efectos de Pozo.

La discusión anterior sobre la respuesta a cambios de presión barométrica en pozos terminados en acuíferos confinados y libres, asumió que no ocurre un retraso en la transmisión de los cambios de presión atmosférica del pozo al acuífero, cuando en realidad, la transmisión de los cambios de presión

barométrica entre el pozo y acuífero presenta un retraso debido al tiempo requerido para desplazar un volumen finito de agua entre el pozo y el acuífero, y este tiempo depende de las propiedades del acuífero (transmisividad, coeficiente de almacenamiento) y condiciones como (well-bore storage y well-skin effects).

Debido a la característica de desbalance de presión existente entre el pozo y el acuífero en el instante de un cambio barométrico, se ha señalado que esos desbalances momentáneos de presión, pueden ser considerados como pasos individuales de cambios de presión, los cuales son aplicados en el pozo. Estos pasos pueden ser tratados como slug – test individuales, que se pueden superponer para obtener la respuesta combinada a la presión transmitida al acuífero.

III.1.4. Técnicas para Remover Efectos Barométricos.

Las mediciones de nivel piezométrico en pozos de monitoreo comúnmente son utilizadas para definir la dirección y velocidad del flujo subterráneo. También pueden ser usadas en pruebas de pozos y analizar las propiedades hidráulicas del acuífero. Medición de niveles de agua obtenidas de pozos abiertos a la atmosfera, pueden verse afectadas significativamente por las variaciones transitorias de la presión, pudiendo causar errores en los cálculos de la carga hidráulica y presentar efectos adversos en el análisis de resultados de las pruebas de pozo.

La remoción de efectos barométricos es dependiente del modelo de respuesta exhibido por el sistema pozo – acuífero, por lo que diferentes métodos son recomendados para acuíferos confinados y libres, y para aquellos que presentan un comportamiento combinado de respuesta.

El remover efectos barométricos en mediciones de nivel en pozos ha sido examinado en varios trabajos. Donde debido a las características frecuenciales de las variaciones de presión barométrica (diurnas, semi-diurnas, aperiódicas, y de largo plazo), muchas de estas técnicas se han enfocado en métodos en el dominio de la frecuencia (Chien et al., 1986, Rojstaczer 1988, Quilty and Roeloffs 1991). Sin embargo, como observo Furbish (1991), la aplicación de métodos de remoción

en el dominio de la frecuencia no es directamente analítica. Por esta razón, a continuación se mencionan métodos más analíticos y para cada condición presente en los acuíferos.

III.1.4.1. Acuíferos Confinados.

Debido a la transmisión instantánea de los efectos de la presión atmosférica dentro de acuíferos confinados, las técnicas de remoción de las fluctuaciones de presión barométrica, son relativamente simples, por ejemplo el Método de Clark (1967). Donde se determina el valor de la eficiencia barométrica con base en la pendiente de la línea de mejor ajuste entre las variaciones de nivel y los cambios de presión, obtenida por regresión lineal.

III.1.4.2. Acuíferos Libres.

Debido a que las variaciones de nivel medidas, en pozos en acuíferos libres presentan una respuesta a fluctuaciones de presión barométrica variable en el tiempo, el procedimiento para remover este efecto, no es tan directo como el implementado en pozos de monitoreo de acuíferos confinados.

El método seleccionado dependerá del tipo de modelo de respuesta exhibido (acuífero libre o respuesta compuesta). Siendo tres métodos los que se muestran:

1. Pozo Cerrado: En un sistema de pozo cerrado, se proporciona una manera directa de eliminar los efectos de almacenamiento en el pozo causados directamente por variaciones de presión atmosférica. Como se discutió anteriormente los efectos de almacenamiento en los pozos, complican el procedimiento de remoción, eliminando esta componente de la respuesta compuesta, se facilita la aplicación de una deconvolución de regresión múltiple o por el modelo de zona vadosa.

   En estos sistemas de pozos cerrados, mediciones de presión absoluta con instrumentos como el Levelogger, proporciona valores de carga hidráulica total dentro del acuífero, y representa la elevación del nivel estático y la componente de presión atmosférica que es transmitida a través de la zona

no saturada a la superficie del nivel freático. Para una condición cuasi-estacionaria, la elevación del espejo del agua dentro del acuífero libre, el sistema pozo cerrado, varía solamente como resultado del retraso en tiempo de la respuesta a cambios de presión atmosférica ocurridos en la superficie. Como se mencionó las características de magnitud y tiempo de retraso, son función de la difusividad neumática dentro de la zona vadosa.

2. Regresión Múltiple: Técnicas de deconvolución de regresión múltiple pueden ser utilizadas para remover efectos barométricos, en modelos de respuesta combinados y de condiciones de acuíferos simples.

   El residual o carga corregida puede ser calculada una vez que se conoce la función de respuesta y se calcula con el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} W_m \\ W_{m+1} \\ W_{m+2} \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta B_1 & \Delta B_2 & \Delta B_3 & \dots & \Delta B_m \\ \Delta B_2 & \Delta B_3 & \Delta B_4 & \dots & \Delta B_{m+1} \\ \Delta B_3 & \Delta B_4 & \Delta B_5 & \dots & \Delta B_{m+2} \\ \vdots & \vdots & & & \\ \Delta B_{n-m+1} & \Delta B_{n-m+2} & \Delta B_{n-m+3} & & \Delta B_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} \tag{5}$$

   Dónde *Wi*: Corrección para cada observación al tiempo *t* de *m* a *n*, *m* es el máximo tiempo de retraso considerado y *n* es el número de observaciones en la serie de tiempo.

3. Zona Vadosa: El modelo en zona vadosa (WBAR program of Weeks 1979) analiza la respuesta en pozos abiertos y cerrados para remover los efectos barométricos, donde se presentan condiciones de well-bore storage y skin-effects.

III.2. Análisis en los Dominios Temporal y Frecuencial.

El análisis espectral no puede realizarse sin conocer la autocorrelación de las series, toda vez que la densidad espectral no es más que la transformada de Fourier de la función de autocorrelación, pero el inverso no siempre es cierto.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el análisis autocorrelatorio y espectral brindan una interesante información acerca del comportamiento del sistema acuífero. La interpretación de esta información revela el papel modulador del sistema sobre la señal de entrada; es decir, la respuesta modificada por el sistema y expresada en las variaciones de carga piezométrica y en caudales, ante los estímulos provocados principalmente por la lluvia o la explotación. El tipo de modulación que se evidencia del análisis, dependerá de las características funcionales del sistema, esto es, la estructura del campo de propiedades físicas y estado inicial del mismo.

Una serie estacionaria puede ser caracterizada por su función de autocorrelación *ρ(k)* definida por:

$$\rho(k) = \frac{cov[x(t), x(t+k)]}{var\ x(t)} \tag{6}$$

La autocorrelación de la población *ρ(k)* puede ser estimada por el coeficiente de autocorrelación serial *r(k)* mediante la siguiente expresión:

$$r(k) = \frac{\sum\big(x(t)\cdot x(t+k)\big) - \frac{1}{n-k}\sum x(t)\cdot x(t+k)}{\left[\sum x^2(t) - \frac{1}{n-k}\left(\sum x(t)\right)^2\right]^{1/2}\left[\sum x^2(t+k) - \frac{1}{n-k}\left(\sum x(t+k)\right)^2\right]^{1/2}} \tag{7}$$

Dónde todas las sumatorias se llevan desde *t=1* hasta *t=N - k*.

El análisis de las series estacionarias se complica por el hecho de que las observaciones no son independientes. Ello implica que *ρ(k)≠0* cuando *k≥0.* Para *k=0*, entonces *ρ(0)=r(0)=1*. Cuando se incrementa el *lag k*, el número de pares de los elementos que se usan para calcular *r(k)* disminuye.

Si la autocorrelación de la población *ρ(k)=0* para todos los lags diferentes de cero, el proceso es completamente aleatorio puro. Todas las observaciones, en este caso, son independientes.

Anderson (1942) propone una prueba de significancia para el coeficiente de correlación serial donde los límites de confianza son estimados por:

$$r(k)_{upper} = \frac{1}{n-1}\left(-1 + z_{1-\alpha/2}\sqrt{n-2}\right) \tag{8}$$
$$r(k)_{lower} = \frac{1}{n-1}\left(-1 - z_{1-\alpha/2}\sqrt{n-2}\right)$$

Si el coeficiente *r(k)* cálculado, cae fuera de estos límites de confianza, la hipótesis de que $\rho(0)=0$ (H_o: ρ(k)=0 contra H_a: ρ(k)≠0) es rechazada.

El conjunto de coeficientes de autocorrelación $\rho(1), \rho(2),\ldots,\rho(n-k)$. Graficados como ordenadas respecto a los lags *k*, constituyen el llamado autocorrelograma. Teniendo como propiedad la simetría, siendo el valor para *k* igual que para *–k*.

La función de autocorrelación *ρ(k)* indica la memoria de un proceso estocástico. Cuando *ρ(k)* llega a cero, se dice que el proceso no tiene memoria de los ocurrido un tiempo atrás. En la práctica *ρ(k)* cruza por cero después de un largo tiempo en la mayoría de los procesos aleatorios. Si *ρ(k)* para largos tiempos exhibe un patrón que no cruza por cero, podría indicar una componente determinística pudiendo ser periódica.

Si la serie de tiempo es no estacionaria, *ρ(k)* no será cero para todos los $k\neq 0$ por el elemento determinístico, incluso si la serie de tiempo es puramente aleatoria (Matalas, 1967).

De una manera parecida es posible analizar un par de series de tiempo mediante la obtención de la función de correlación cruzada.

La correlación cruzada es similar en naturaleza a la convolución de dos funciones. Mientras que la convolución implica invertir una de las señales, desplazarla y multiplicarla por la otra, la correlación cruzada solo implica desplazar y multiplicar una señal respecto a la otra.

Es útil iniciar el planteamiento matemático de esta función, mediante la definición de la función de varianza cruzada (ccvf), dada por:

$$c_{xy}(k) = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N-k}(x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad [k = 1,2,\cdots,(N-1)] \tag{9}$$

$$c_{xy}(k) = \frac{1}{N}\sum_{t=1-k}^{N}(x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \quad [k = -1,-2,\cdots,-(N-1)]$$

Dónde N: es la longitud de las series, k: es el lag (retraso).

La función de correlación cruzada de la muestra (ccf) es la (ccvf) escalada por las varianzas de las dos series:

$$cr_{xy}(k) = \frac{c_{xy}(k)}{\sqrt{c_{xx}(0)c_{yy}(0)}} = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x\sigma_y} \tag{10}$$

En general, la función de correlación cruzada permite estudiar la interacción entre dos procesos con posible diferente escala de medición o variación diferente.

Como se hizo mención la función de autocorrelación es simétrica, lo que contrasta con la función de correlación cruzada que es asimétrica.

Para medir el índice de relación lineal que pudiera existir entre dos de las variables analizadas, se utiliza el Coeficiente de Correlación de Pearson, el cual está dado por la siguiente expresión:

$$\rho_{X,Y} = \frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X\sigma_Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X\sigma_Y} \tag{11}$$

Donde σ_{XY}: covarianza de (X, Y), σ_X: desviación estándar de (X), σ_Y: desviación estándar de (Y). El valor del índice de correlación varia en el intervalo [-1, 1], interpretándose como sigue:

- Si ρ = -1, correlación negativa perfecta. Dependencia total entre ambas variables, relación inversa: cuando una de ellas aumenta la otra disminuye en proporción constante.
- Si -1 < ρ < 0, existe correlación negativa.

- Si ρ = 0, No existe relación lineal.
- Si 0 < ρ < 1, existe correlación positiva.
- Si ρ = 1, correlación positiva perfecta. Dependencia total entre las dos variables, relación directa: cuando una de ellas aumenta la otra también lo hace una proporción constante.

El objetivo del análisis espectral es la descomposición de la serie temporal original en funciones periódicas de diferentes frecuencias, a fin de identificar aquellas que parezcan más fuertes o importantes.

La transformada de Fourier es una técnica aplicada en el dominio del tiempo, para descomponer una señal periódica en una suma lineal de funciones base (senos o cosenos) de diferentes frecuencias y amplitudes.

La transformada continua de Fourier está dada por la expresión:

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega 2t}\, dt \tag{12}$$

Dónde:

$$e^{-\omega t} = \cos(\omega t) - i\, sen(\omega t) \tag{13}$$

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{T} \tag{14}$$

La principal desventaja del análisis de Fourier es que las funciones base son continuas, por lo que si la señal en estudio presenta regiones planas en los bordes, entonces las funciones base deben ser forzadas a cero en estas regiones, requiriéndose un número infinito de funciones para cancelar los bordes, y se enmascara información debido a que se distorsiona el espectro de frecuencias.

Dentro de las características de las series registradas por los instrumentos, se presentan ciertas singularidades que en primera instancia llaman la atención:

- Intervalos importantes con ausencia de datos (Gaps), debidos a robo del instrumento o falla general del mismo.
- Saltos en la tendencia observada (Steps) algunos relacionados con actividad sísmica y otros probablemente por cambios o movimientos en la instalación y posición de los medidores.

Aunado a lo anterior, y debido a la naturaleza de las series de tiempo analizadas en este trabajo, se encontró conveniente realizar un análisis por segmentos de interés en las series de tiempo registradas por los instrumentos instalados en la RMCGCP.

III.3. Procedimiento de Análisis.

Los pasos que se siguieron en este análisis, se resumen de una manera muy general a continuación:

1. Análisis de los catálogos de actividad sísmica.
2. Obtención de parámetros estadísticos y análisis de autocorrelación del registro de nivel piezométrico.
3. Obtención de parámetros estadísticos y análisis de autocorrelación del registro de presión barométrica. Determinación de las principales componentes de la presión barométrica mediante Fourier. Cálculo de la respuesta barométrica. Compensación por efectos barométricos.
4. Implementación de análisis de Fourier en el registro de nivel corregido para determinar las componentes dominantes.
5. Obtención de parámetros estadísticos y análisis de autocorrelación del registro de temperatura del agua dentro del pozo.
6. Obtención de parámetros estadísticos y análisis de autocorrelación del registro de temperatura superficial, medida en la estación meteorológica No. 2033, Mexicali. Determinación de las componentes dominantes de la serie mediante análisis de Fourier.

7. Análisis cualitativo y cuantitativo del registro de precipitación medido en la estación meteorológica No. 2033, Mexicali.
8. Cálculo de la marea gravitacional teórica en la estación No. 10 al centro del CGCP y obtención de las componentes dominantes en la señal mediante análisis de Fourier.
9. Análisis temporal de la actividad sísmica ocurrida en el intervalo de estudio en las inmediaciones del CGCP.
10. Resumen y comparación de las estadísticas básicas de cada serie, comparativo de las componentes dominantes, comparativo de los histogramas de distribución de cada serie,
11. Análisis de correlación cruzada para la combinación de series analizadas en cada sección.
12. Filtraje y reconstrucción del registro de nivel piezométrico, filtrando componentes de las bandas de muy baja y alta frecuencia.

Capítulo IV.

Resultados.

IV.1. Análisis de catálogos de actividad sísmica.

IV.1.1. Catálogo de USGS-Caltech.

Las estaciones de la red sismológica de USGS-Caltech más cercanas al CGCP están ubicadas cerca de la frontera México-Estados Unidos, en promedio a más de 35 km al norte, lo cual induce un sesgo en la localización de hipocentros al sur de la frontera, estimada entre 5 y 10 km en la horizontal (Fabriol, 1997).

Se presenta un mapa de localización con 1,764 epicentros detectados por USGS-Caltech entre enero de 2003 y diciembre de 2008, en el área delimitada por los vértices con coordenadas 32.556°N, -115.350°W y 32.281°N, -115.035°W (latitud y longitud, respectivamente). Considerando solo los eventos de calidad A (1), B (11) y C (1,752), es decir de localización muy buena a regular (Figura 10).

IV.1.2. Catálogo de RESNOM.

La red sismológica de RESNOM instalada y operada por el Departamento de Sismología del CICESE cuenta con 14 estaciones en el norte de Baja California. La estación permanente más cercana al área es CPX en funcionamiento desde 1980 y localizada en el volcán de Cerro Prieto. Debido a la cercanía de la red de RESNOM, se estimó un error en los epicentros de menos de 4 km (Fabriol, 1997).

De igual manera se presenta el mapa de localización de 896 epicentros localizados por RESNOM (Figura 11). La razón de 1 a 1.96 respecto al número grabado por USGS-Caltech debido principalmente al umbral de detección.

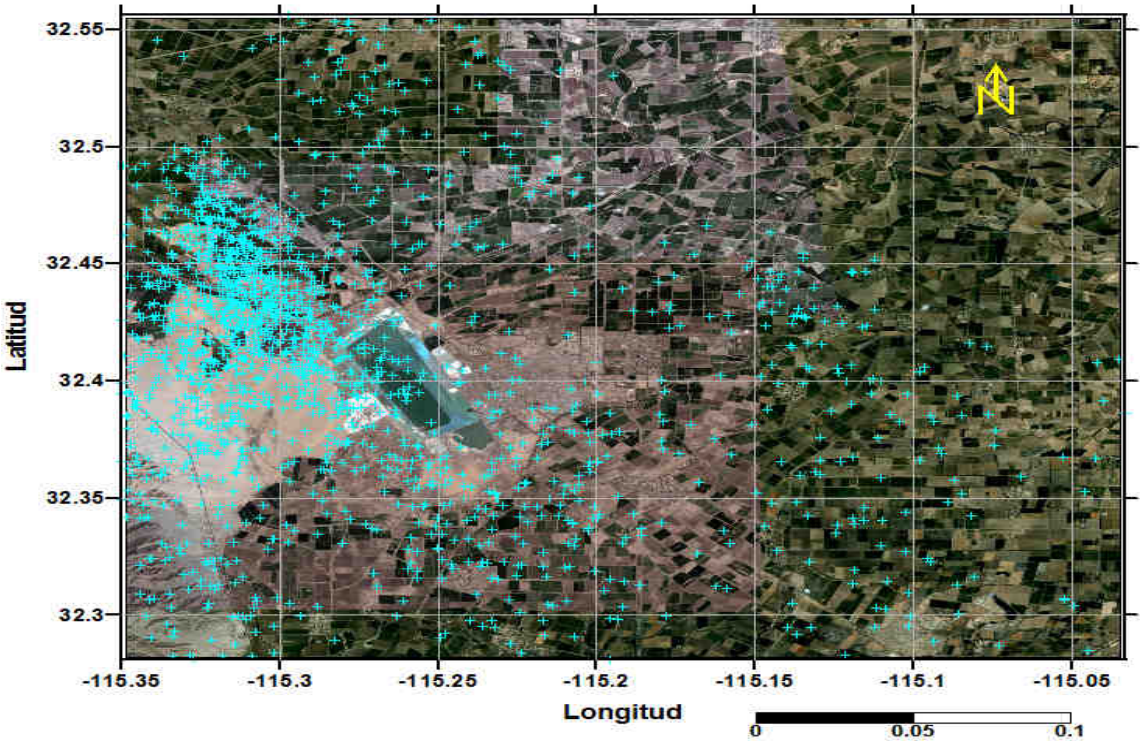

Figura 10. Sismicidad 2003-2008. Catálogo USGS-Caltech.

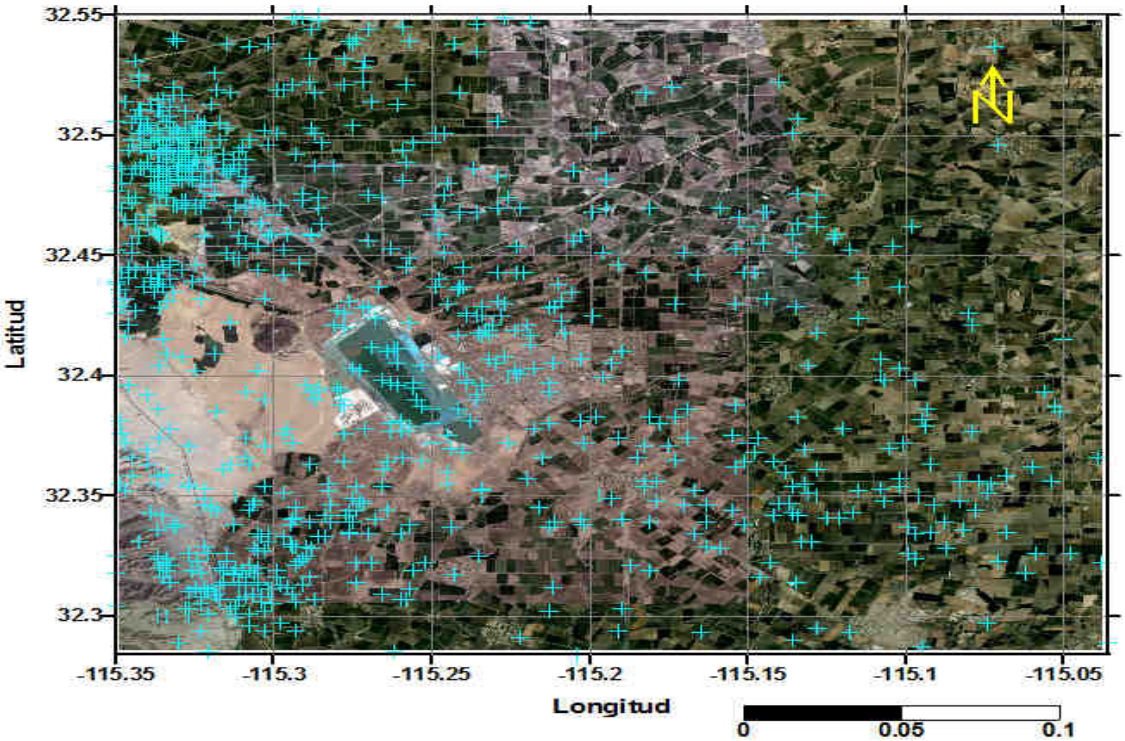

Figura 11. Sismicidad 2003-2008. Catálogo RESNOM.

IV.1.3. Comparación de Catálogos USGS-Caltech y RESNOM.

Fabriol (1997) concluye que no es posible estimar con gran precisión cual es la sismicidad que ocurre realmente en el área geotérmica utilizando únicamente catálogos, de igual manera sugiere prudencia al hacer correlaciones espaciales entre actividades de reinyección de salmuera en el campo y eventos sísmicos supuestamente localizados en los catálogos.

Como parte del trabajo de tesis se plantea examinar una relación temporal entre la actividad sísmica y las variaciones de nivel de agua registradas, se contempla solo el catálogo de USGS-Caltech por ser el más completo, con el objetivo de buscar correlaciones entre las variaciones de nivel de agua y la sismicidad que ocurre dentro o cerca del CGCP.

Para un análisis más a detalle se calcula la suma por día del momento sísmico de los sismos del catálogo USGS-Caltech y se acumula en función del tiempo, buscando identificar variaciones importantes para ser comparadas con los registros de nivel piezométrico. Se utiliza el momento sísmico porque corresponde a una medida física de la dislocación que genera el sismo, asimilando ésta a un doble par de fuerzas. El momento M_0 se define por:

$$M_0 = \mu SD \tag{15}$$

Donde μ: rigidez del medio, S: área de ruptura y D: dislocación promedio (longitud de ruptura). Debido a la dificultad que representa obtener una estimación de la dislocación, se usa una formula empírica a partir de la magnitud local proporcionada por el catálogo (Kanamori, 1977).

$$\log(M_0) = 1.5M_L + 16.1 \tag{16}$$

Por ser una cantidad física, se puede sumar y obtener así una aproximación de la cantidad total de momento sísmico de los sismos ocurridos en un día, o acumulada en un año, para un área definida. En la (Figura 12), se muestra la

acumulación de momento sísmico por cada día en el periodo 2003-2008 en las cercanías del CGCP.

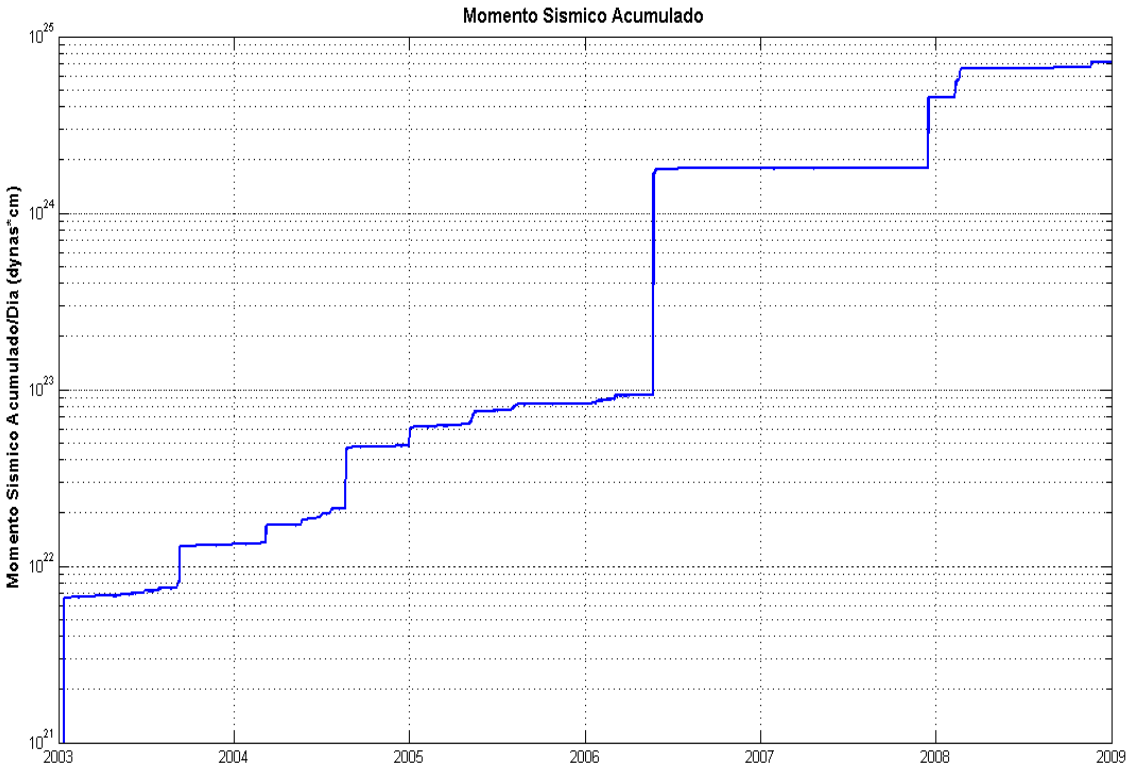

Figura 12. Momento sísmico acumulado por día para el periodo 2003-2008. Del catálogo de USGS-Caltech.

De la figura observamos inicialmente el gran salto del comportamiento del momento sísmico, debido a que no se considera información previa a 2003. Un primer incremento importante se asocia al evento 3.7 Ml (11 de Septiembre 2003), después un 3.6 Ml (9 de Marzo 2004) este mismo año 4.2 Ml (22 de Agosto 2004); entre el 9 y 18 de Mayo de 2005 aproximadamente 190 eventos de Ml < 2.0. Para el siguiente año se tiene el evento más importante en el periodo contemplado un sismo de 5.4 Ml (24 de Mayo 2006), actividad entre el día 8 y 28 de Diciembre de 2007 hasta con magnitudes de 3 Ml son las responsables del incremento

observado en este periodo; finalmente, entre el 9 y 25 de Febrero de 2008 cerca de 777 eventos originan la variación que se aprecia.

Como se ha venido haciendo mención, se consideró conveniente realizar un análisis a detalle de segmentos de los registros que resultan interesantes, proponiéndose evaluar tres escenarios distintos, los cuales fueron elegidos en gran medida con base en lo mostrado en la Figura 11, dichos escenarios son los siguientes:

- Evento sísmico principal.
- Mínima actividad sísmica.
- Enjambre de actividad sísmica.

IV.2. Evento sísmico principal.

El evento que se considera como principal en el periodo de análisis, es el sismo del 24 de Mayo de 2006 (04:20 UTC) con magnitud 5.4 Mw e hipocentro localizado en 115.26° W, 32.41°N y una profundidad de 3.6 ± 1 km (Mungía et al., 2009).

La longitud de ruptura debida al sismo fue de cerca de 5 km mostrando un fallamiento predominantemente normal. El desplazamiento vertical máximo fue hasta de 30 cm y el movimiento lateral cercano a los 4 cm (Lira, 2006; Suárez Vidal et al., 2007).

El sismo fue registrado por las redes sísmicas locales (RESNOM) y regionales (USGS-Caltech), así como por el registro continuo de instrumentos geotécnicos y piezómetros.

En la (Figura 13), se muestran los pozos instrumentados donde se tiene registrado el evento mencionado (C-3, PZ-3, PZ-5 Y G-1-17), así como su ubicación y las réplicas subsecuentes, obtenidas del catálogo de USGS-Caltech.

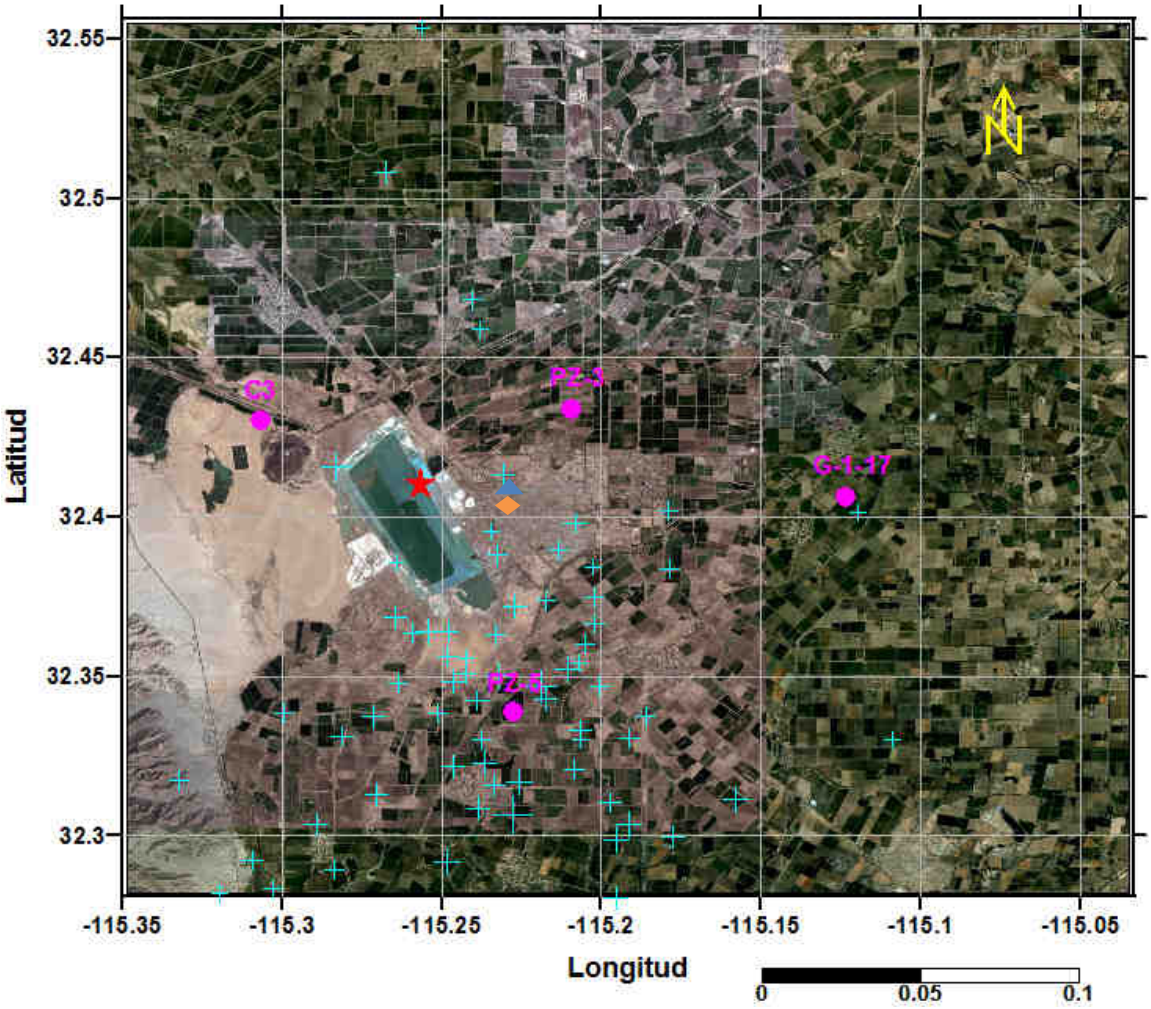

Figura 13. Ubicación del sismo 5.4 del 24 de Mayo de 2006 (estrella roja), sus réplicas según catálogo USGS-Caltech y piezómetros donde se tiene registro del evento (círculos magenta), barómetro en pozo PZ-1 (triangulo azul) y estación gravimétrica (rombo naranja).

El intervalo de tiempo que se contempla para este análisis inicia el día 27 de Abril (04:00 pm PST) y termina el 19 de Julio (11:55 pm PST) de 2006; abarcando 83.3 días con registro a cada 5 min lo que resulta en un muestreo discreto de 24,000 puntos. Como se hizo mención son los instrumentos instalados en los pozos C-3, PZ-3, PZ-5 y G-1-17 los que en su registro muestran el comportamiento que se observa (Figura 14).

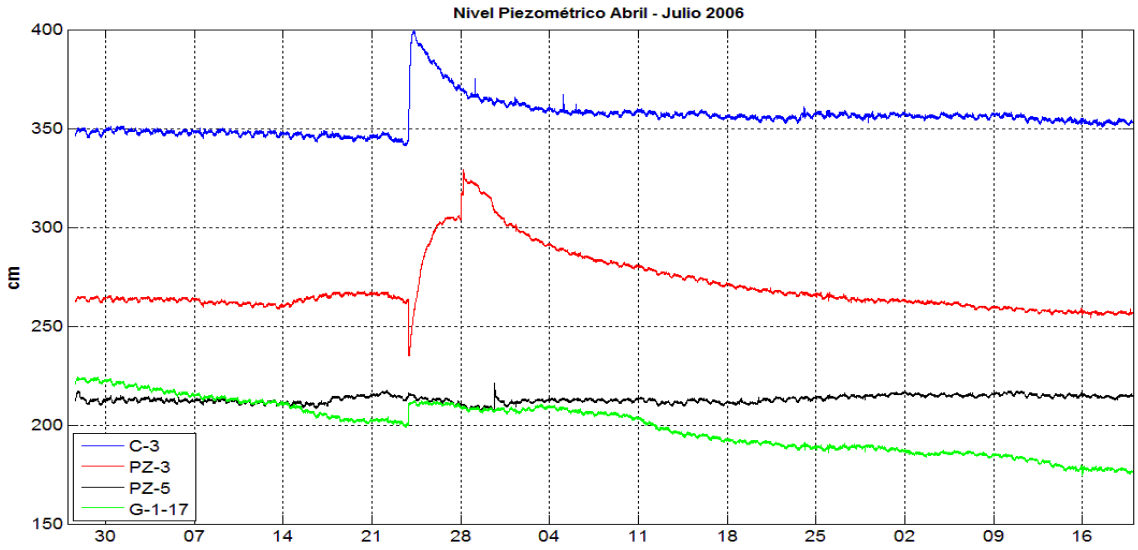

Figura 14. Registro de Nivel Piezométrico, pozo C-3, PZ-3, PZ-5 y G-1-17.

IV.2.1. Análisis para el pozo C-3.

IV.2.1.1. Nivel Piezométrico.

El registro de nivel del Levelogger serie Junior del pozo C-3 (5.4 km NW del epicentro), en el intervalo 27 de abril a 19 de Julio de 2006 con una frecuencia de muestreo de 5 min (24,000 datos), se muestra en la (Figura 15-a).

Del registro podemos obtener los parámetros estadísticos básicos Tabla V.

En la (Figura 15-b) se muestra el autocorrelograma de la serie, donde se puede apreciar un efecto de memoria de 11 días (3,162 / 288 (1 día)) = 10.98 días.

IV.2.1.2. Presión Barométrica.

En la (Figura 16-a) se muestra el registro de un Barologger serie Junior instalado en el pozo PZ-1, ubicado a 7.8 km al SE del pozo C-3 (Figura 13).

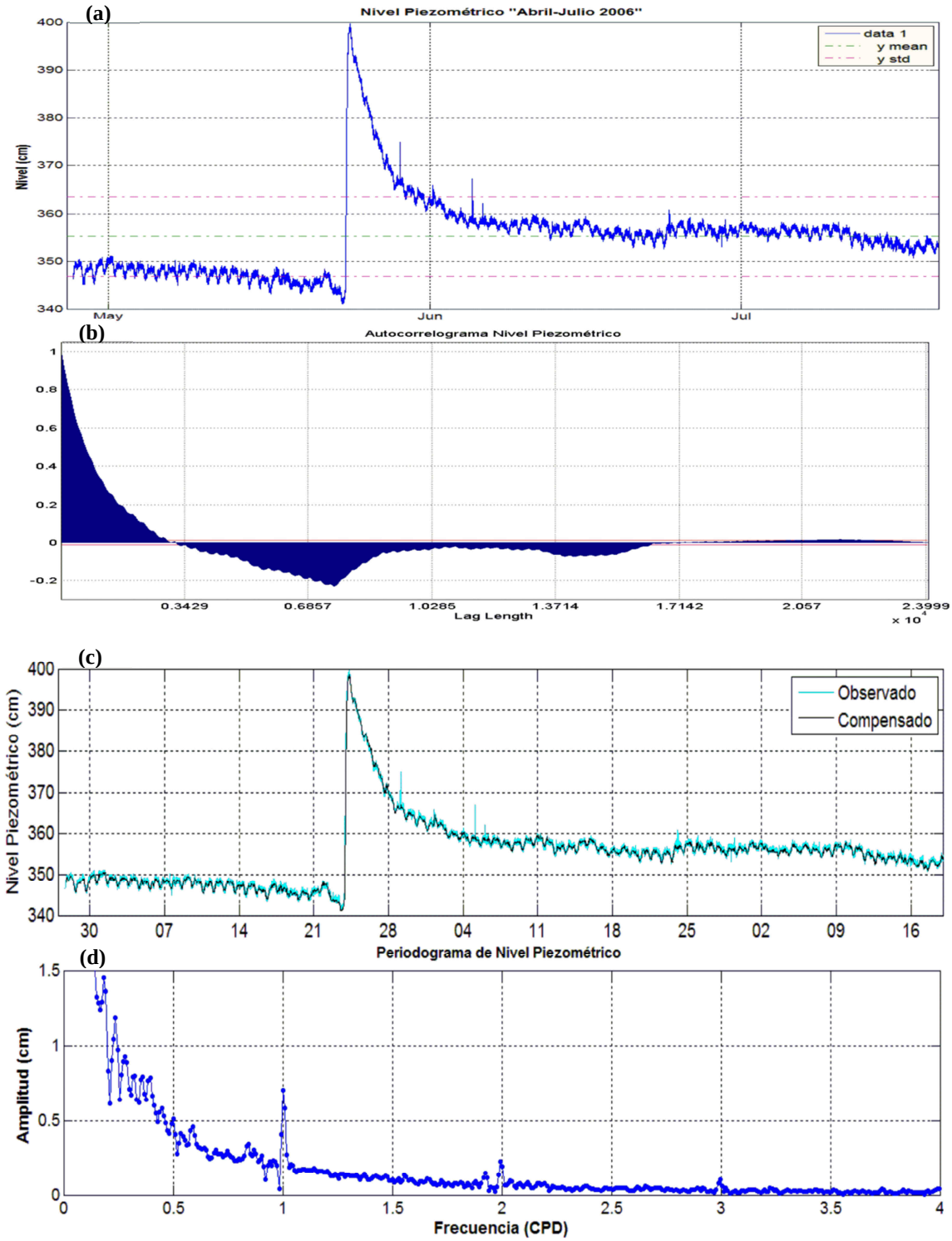

Figura 15. a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Compensado y d) Periodograma, pozo C-3. Abril – Julio 2006.

La serie cubre el mismo intervalo de tiempo que la de nivel piezométrico y con la misma frecuencia de muestreo.

Se muestra el autocorrelograma de la serie (Figura 16-b), donde se puede apreciar un efecto de memoria de 10.5 horas.

De igual manera se presentan los parámetros estadísticos básicos del registro de presión barométrica, Tabla V.

Se aplicó análisis de Fourier al registro de presión barométrica, el periodograma (Figura 16-c) muestra que las componentes armónicas son dominantemente diurnas y semidiurnas, con frecuencias de uno y dos ciclos por día y una ligera aportación de una señal con frecuencia de tres ciclos por día.

La banda de frecuencias de 0 a 0.5 cpd es causada por fluctuaciones de presión atmosférica aperiódicas, con duraciones de días o semanas.

Una descripción de las causas exactas de las variaciones periódicas de presión atmosférica esta fuera del alcance de este trabajo, pero probablemente están relacionadas con el calentamiento y enfriamiento, expansión y contracción, ascenso y descenso de masas de aire cerca de la superficie. Ritzi (1991) descarto la posibilidad que los efectos solares y lunares en la atmosfera expliquen la variación diurna. Chapman and Lindzen (1970) explicaron el fenómeno de la marea barométrica en términos del calentamiento cíclico del vapor de agua en la atmosfera presentando máximos a las 10 am y 10 pm, mientras que los mínimos ocurren a las 4 am y 4 pm.

La programación de los instrumentos fue para que realizaran un muestreo discreto a cada 5 minutos, con lo que debido a las características del análisis en el dominio de la frecuencia, podemos solo recrear fenómenos que ocurran a cada 10 minutos, sin embargo, los periodógramas que se muestran, están truncados a pocos ciclos por día, ya que de una inspección visual detallada, no se logran apreciar componentes de amplitud considerable más a allá de los 6 ciclos por día. Por lo anterior es pertinente definir bandas de frecuencias de interés, que son las siguientes:

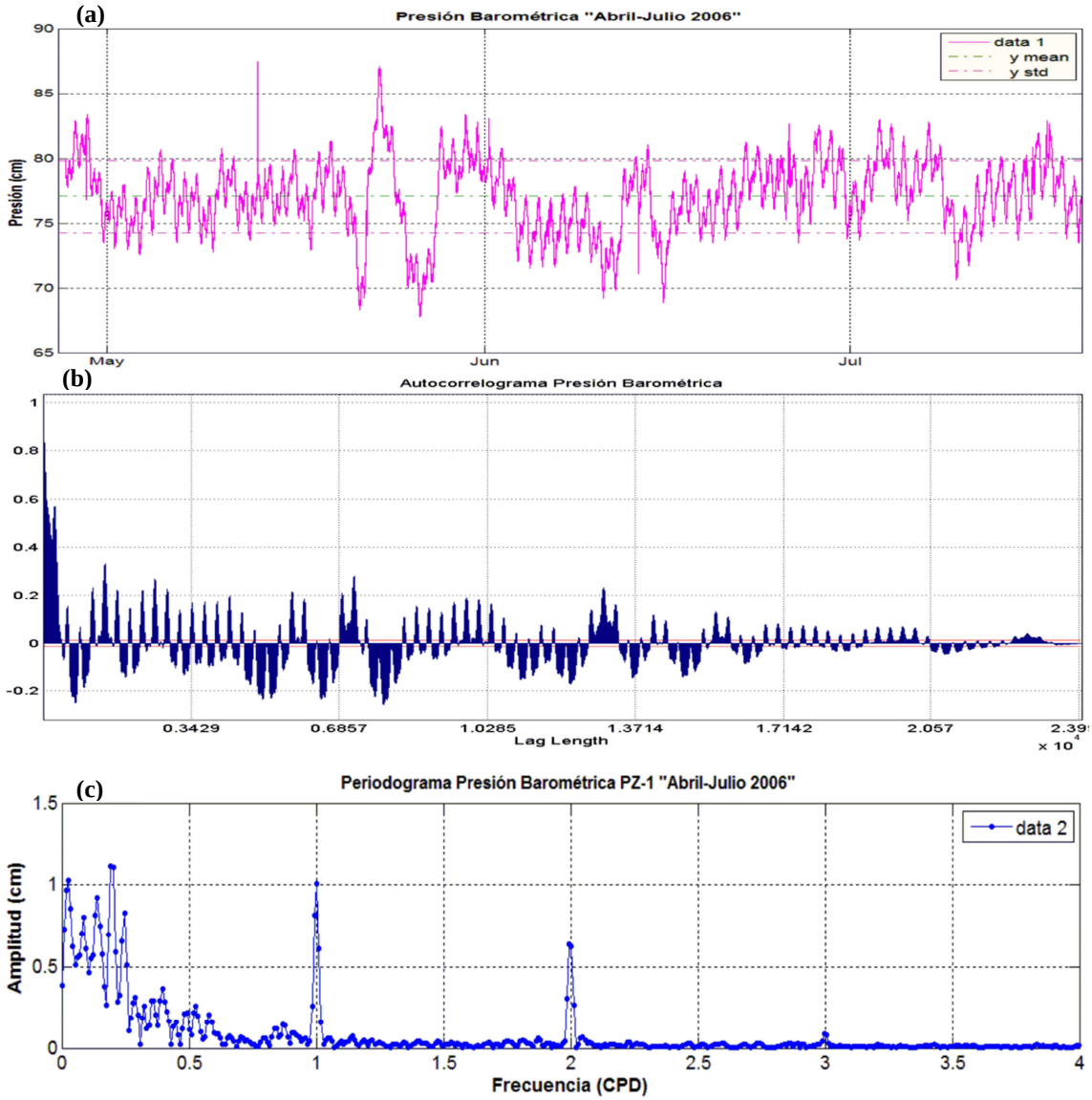

Figura 16. a) Registro de Presión Barométrica, b) Autocorrelograma y c) Periodograma, Barologger instalado en el pozo PZ-1, Abril – Julio 2006.

- Baja Frecuencia (0 < f < 0.5 cpd): Componentes aperiódicos, con duraciones de días, semanas, meses. Y variaciones de largos períodos (estacionales y anuales).
- Banda Central (0.5 < f < 6 cpd): Componentes principales y dominantes (diurnas, semidiurnas, etc.).

- Alta Frecuencia (6 < f < 144 cpd): Componentes con amplitudes en el umbral del ruido.

En secciones posteriores, se hará énfasis a estas bandas de frecuencias definidas en los intervalos mostrados.

IV.2.1.2.1. Respuesta Barométrica.

Como se definió en capítulos anteriores, el acuífero superficial en las inmediaciones del CGCP, corresponde a una formación del tipo libre. Lo cual se corrobora al implementar el método descrito en el (apartado III.1) basado en gráficos de diagnóstico como el que se muestra en la (Figura 17-a).

De la figura, podemos observar el comportamiento esperado de la respuesta barométrica para un acuífero del tipo libre, con una eficiencia barométrica inicial de aproximadamente el 95 % disminuyendo a cerca del 85 % tras 15 minutos.

Una vez que se conoce el modelo de respuesta se procede a realizar la remoción de los efectos barométricos, mediante el método descrito (apartado III.1.4.2.) el resultado de la corrección es mostrado en la (Figura 17-c).

En la (Figura 17-b) se muestran sobre puestos ambos registros, tanto de presión barométrica como de nivel observados; mientras que en la (Figura 17-c) se muestra, el nivel observado contra el nivel corregido, donde se logra eliminar con la técnica empleada algo de variabilidad y una gran cantidad de ruido presente en la señal original.

A este registro corregido por efectos barométricos, se le aplica análisis de Fourier, para identificar las componentes principales de la señal. El periodograma correspondiente se muestra en la (Figura 15-d).

En este periodograma nuevamente identificamos que las componentes dominantes son las diurnas y semidiurnas, de igual manera observamos una aportación de una componente con frecuencia de tres ciclos por día, y la presencia de la banda de baja frecuencia ubicada al inicio entre 0 y 0.5 ciclos por día.

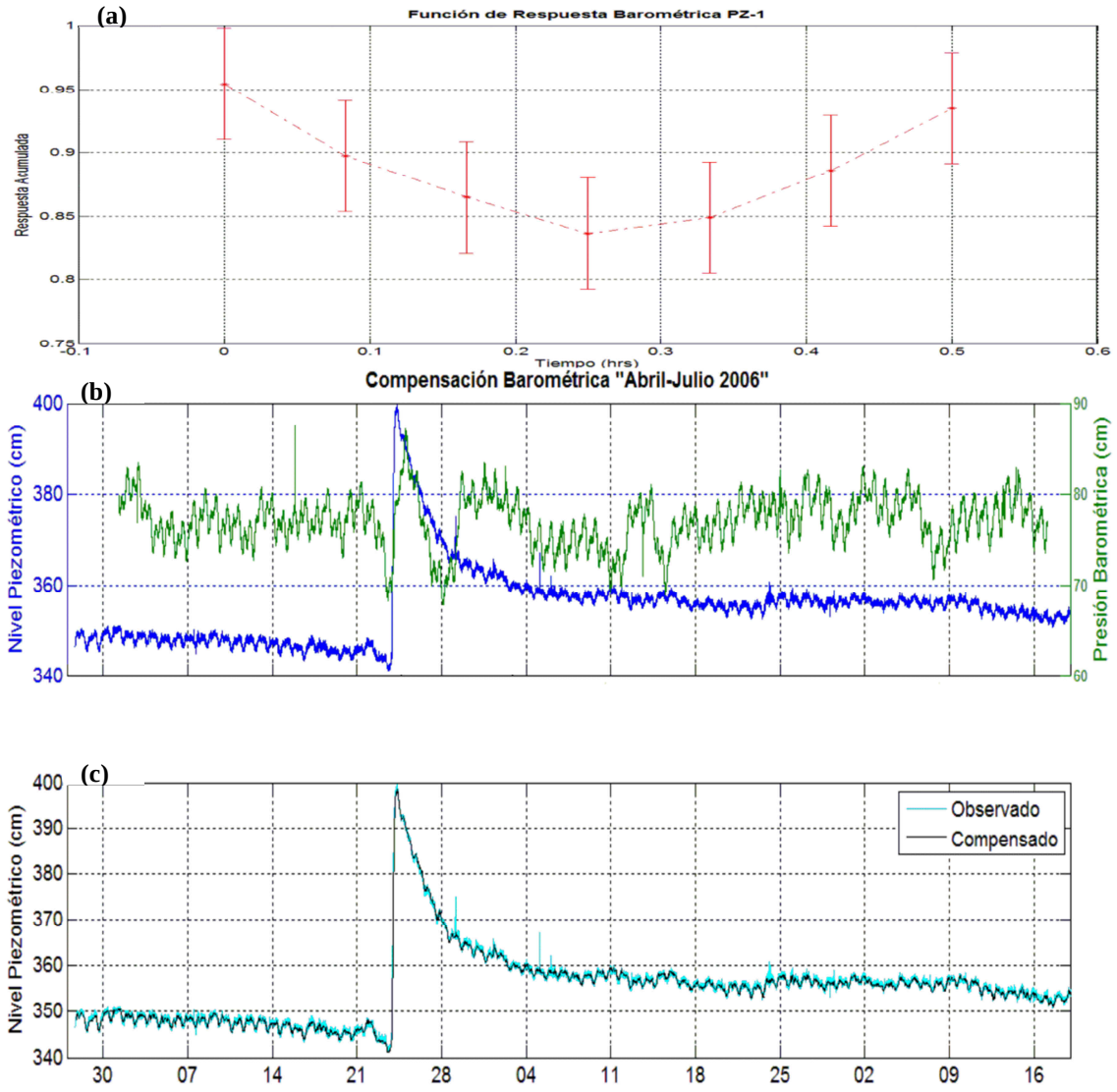

Figura 17. a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (C-3 PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado.

Cabe hacer mención que el periodograma de la (Figura 15-d) esta truncado en el eje de las ordenadas, la máxima amplitud tiene un valor de aproximadamente 4.5 cm y corresponde a una componente ubicada en la banda de baja frecuencia.

IV.2.1.3. Temperatura del agua dentro del pozo C-3.

Como se mencionó el instrumento Levelogger tiene la capacidad de medir y registrar la temperatura del fluido que lo rodea, (Figura 18-a). Y el respectivo autocorrelograma se aprecia en la (Figura 18-b), donde se determina una memoria del sistema de 13.65 días. Y los parámetros estadísticos se enlistan en Tabla V.

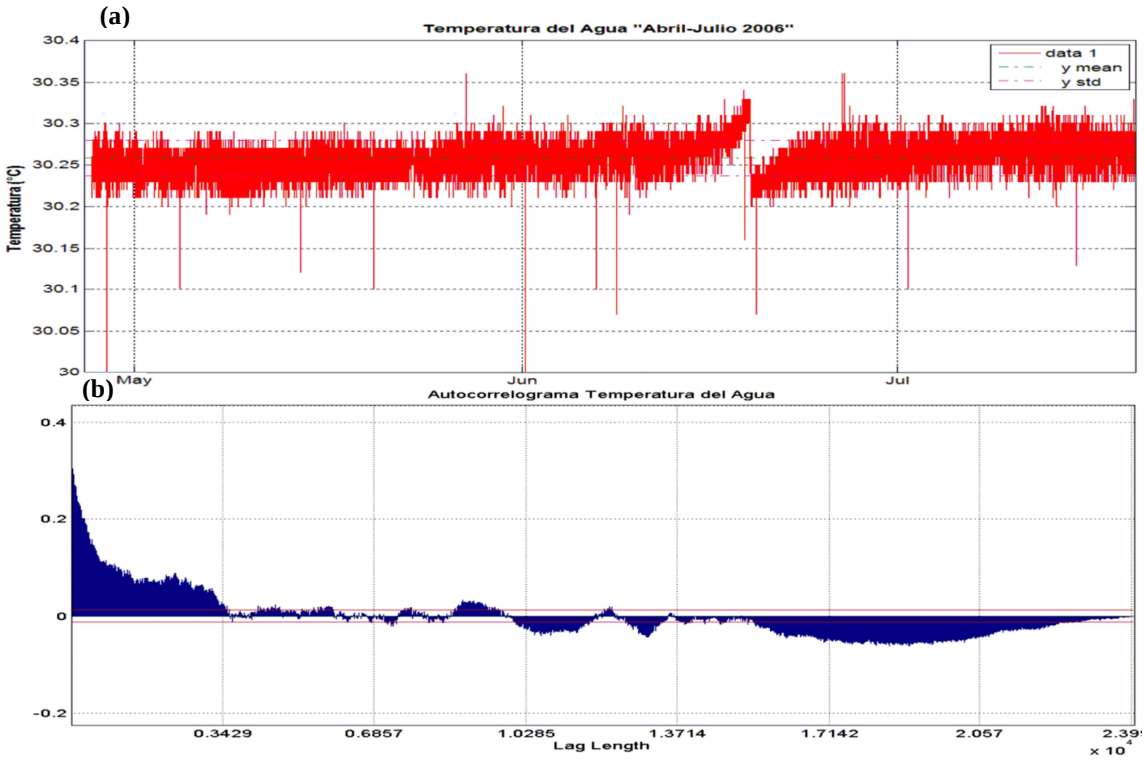

Figura 18. a) Temperatura del Agua, b) Autocorrelograma, pozo C-3, Abril – Julio 2006.

IV.2.1.4. Temperatura Superficial.

Se tomó el registro de temperatura ajustado a cada 5 min de la estación meteorológica automática No. 2033 (PEACC-BC). (Figura 19-a). De esta serie de tiempo, si bien la longitud de la observación no permite identificar las tendencias estacionales, si es posible reconocer un incremento en los valores de temperatura

hacia el inicio de los meses de verano. Y con parámetros estadísticos que se observan en la Tabla V. El autocorrelograma de esta serie se puede observar en la (Figura 19-b) donde la memoria del sistema es de 1 día. Así como también es clara la ciclicidad del fenómeno. Después de aplicar Análisis de Fourier, en la (Figura 19-c), se observa que la componente principal y dominante es la diurna (24 h) con una amplitud aproximadamente 10 veces mayor que la componente semidiurna y que la componente a cada ocho horas.

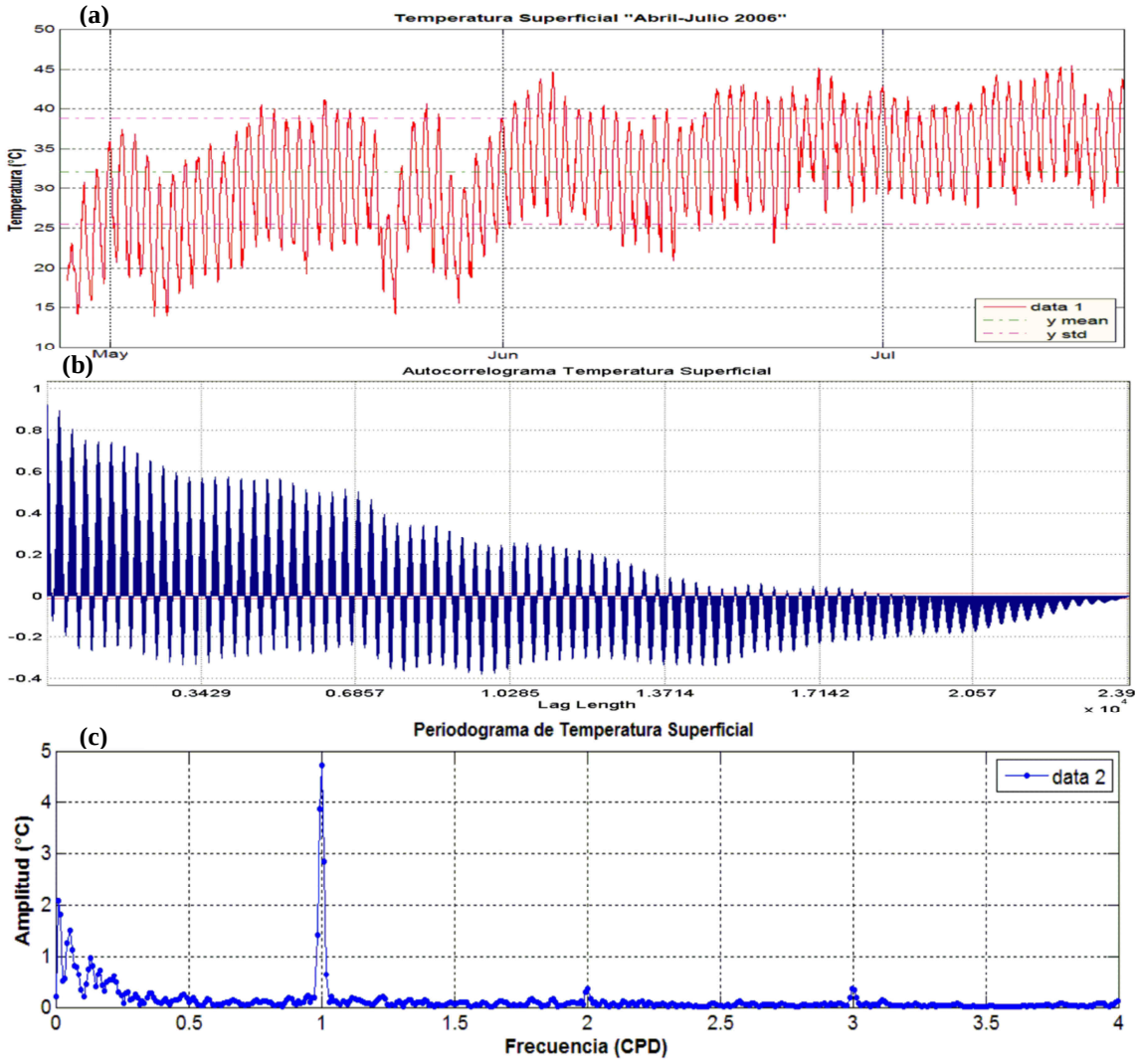

Figura 19. a) Registro de Temperatura Superficial, b) Autocorrelograma, c) Periodograma de la estación meteorológica No. 2033. Abril – Julio 2006.

IV.2.1.5. Precipitación.

Se considera la misma estación meteorológica No. 2033 y se obtiene la precipitación para este periodo, como es sabido, el régimen de lluvias que domina en la región es en invierno, durante el intervalo de estudio se presenta un mínimo registro de la precipitación en las inmediaciones del CGCP, por lo cual en la (Figura 20) se muestra un gráfico de barras con la precipitación medida en este periodo de interés. Cabe hacer mención, que el valor de precipitación mostrado es acumulado por día.

El grafico ilustra la mínima cantidad de precipitación que se presenta en este periodo, siendo solamente 0.254 mm para el día 22 de Mayo de 2006.

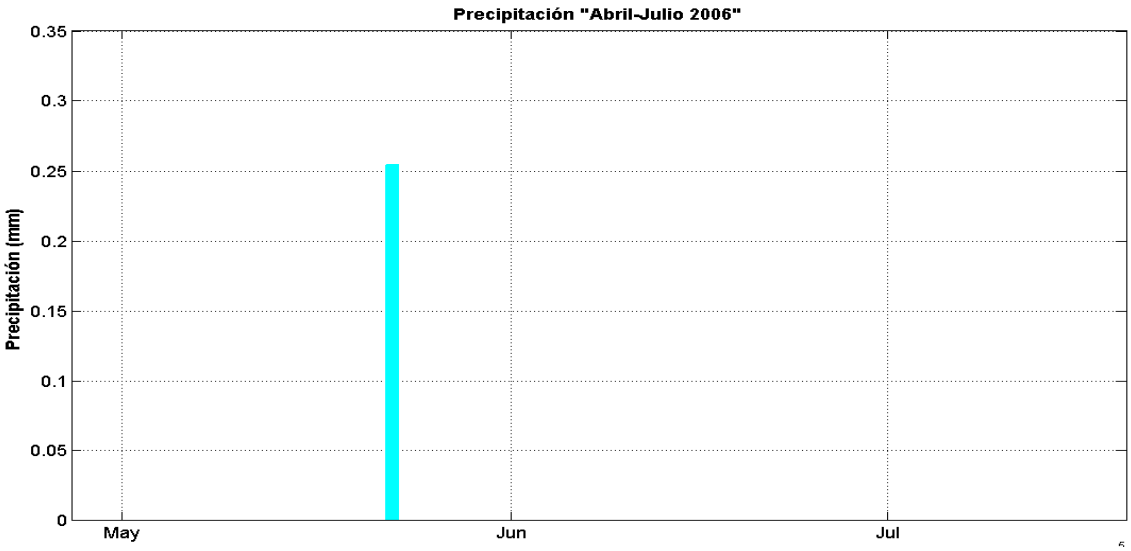

Figura 20. Registro de Precipitación Diario estación meteorológica No. 2033. Abril-Julio 2006

IV.2.1.6. Marea Gravitacional Teórica.

Del trabajo de (Chase, 1978) donde realizó mediciones de gravedad en el Campo Geotérmico, elegimos la estación No. 10 ubicada al centro del CGCP (Latitud 32.4033°N, Longitud -115.2322°W, Elevación 10.645 m), (Figura 13).

Con el software TIDES (Ahern, 1993), se calculó la marea terrestre. Obteniéndose valores a cada hora, mediante código generado en MATLAB (Mathworks, 2008), se realizó interpolación, y se obtuvieron valores compatibles con el resto de las variables consideradas, a cada 5 minutos. (Figura 21).

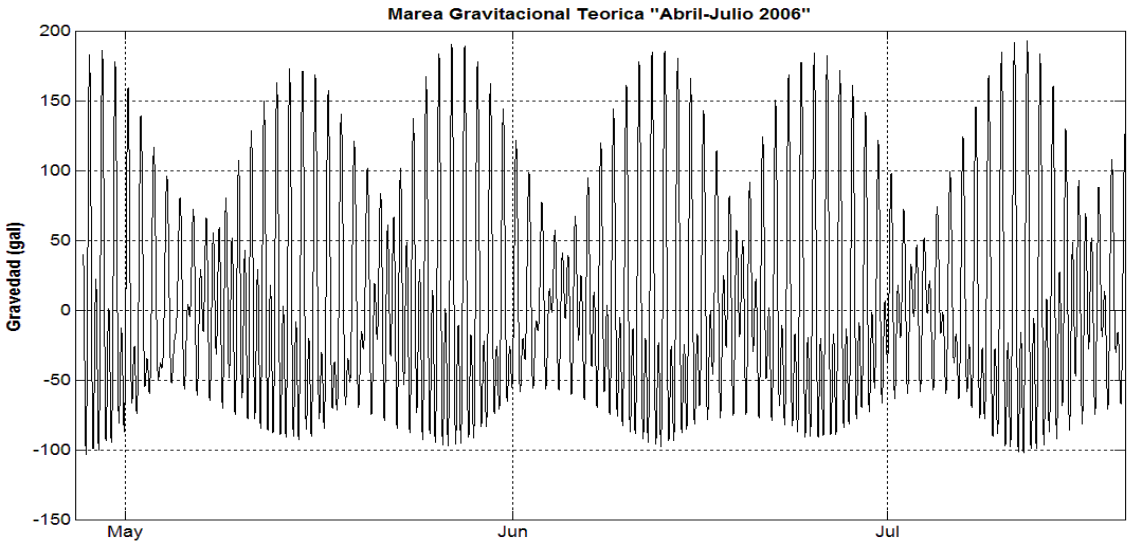

Figura 21. Calculo de la Marea Gravitacional Teórica, para la estación No. 10 (Chase, 1978), con el software Tides (Ahern, 1993). Abril-Julio 2006.

La marea terrestre tiene como origen la influencia del movimiento de cuerpos celestes, principalmente el Sol y la Luna respecto a la Tierra. Siendo este un movimiento complejo que está conformado por varias componentes de frecuencia y nivel de influencia diferentes. La marea gravitacional está compuesta por cerca de 386 armónicos diferentes, pero de estos alrededor de 10 son los responsables del 95 % de la variabilidad y de estos 5 producen el 90 % de dicho comportamiento.

Se muestra el resultado de implementar análisis de Fourier a esta señal, así como un detalle de las bandas de frecuencias de la marea terrestre (Figura 22).

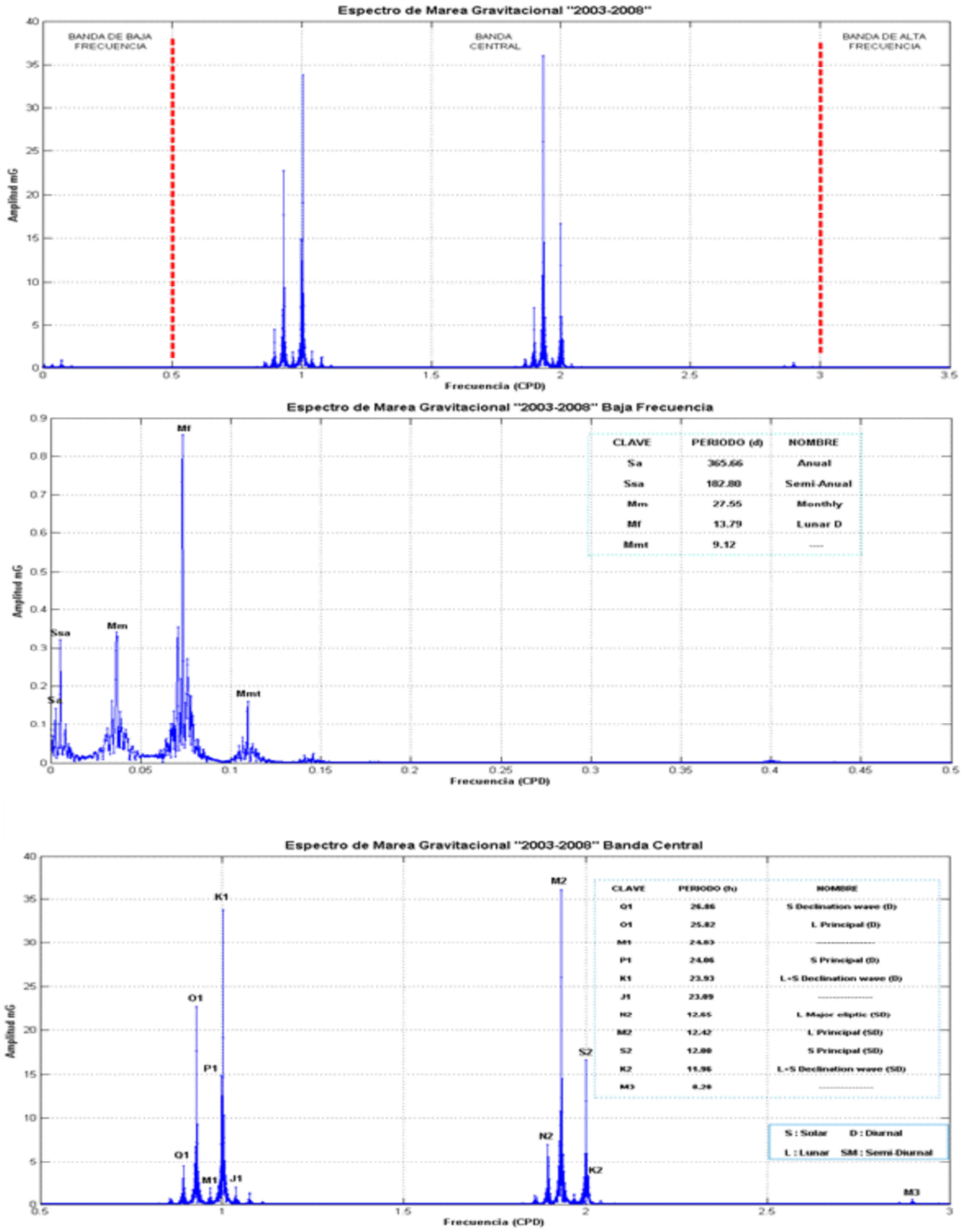

Figura 22. Periodograma de Marea Gravitacional Teórica, estación No. 10 y delimitación de bandas de interés.

En la Tabla IV se enlistan las principales componentes que se logran determinar del análisis de esta señal, que como se ve tienen periodos que coinciden con componentes identificadas en otros de los registros con los que se cuenta (presión barométrica, temperatura, etc.).

Tabla IV. Principales Armónicos que componen a la Marea Gravitacional Teórica.

Símbolo	Frecuencia (cpd)	Periodo	Nombre
Baja Frecuencia			
Sa	0.0027	365.66 d	Anual
Ssa	0.0054	182.80 d	Semi - Anual
Mm	0.0363	27.55 d	Mensual
Mf	0.0725	13.79 d	Declinación Lunar
Mmt	0.1096	9.12 d	-------
Banda Central			
Q1	0.8932	26.86 h	Solar Declinación Diurna
O1	0.9295	25.82 h	Lunar Principal Diurna
M1	0.9664	24.83 h	-------
P1	0.9972	24.06 h	Solar Principal Diurna
K1	1.0027	23.53 h	Lunar + Solar Declinación Diurna
J1	1.0390	23.09 h	-------
N2	1.8959	12.65 h	Lunar Mayor Elipse Semi-Diurna
M2	1.9322	12.42 h	Lunar Principal Semi-Diurna
S2	2.0000	12.00 h	Solar Principal Semi-Diurna
K2	2.0054	11.96 h	Lunar + Solar Declinación Semi-Diurna
M3	2.8985	8.28 h	-------

Es importante mencionar que en este trabajo no se considera la influencia que podría aportar la marea oceánica.

IV.2.1.7. Actividad Sísmica.

La distribución espacial de la actividad sísmica que se presentó en el intervalo 27 de Abril al 19 de Julio de 2006, se mostró en la (Figura 13). A continuación se presenta un gráfico con la distribución temporal de los eventos sísmicos registrados en el catálogo de USGS-Caltech, reportados con sus magnitudes locales, (Figura 23).

En el grafico podemos distinguir la actividad sísmica para el día 24 de Mayo, en este caso el evento principal contemplado; así como actividad en el día 28 de Mayo y el día 14 de Julio también hay presente importante actividad sísmica.

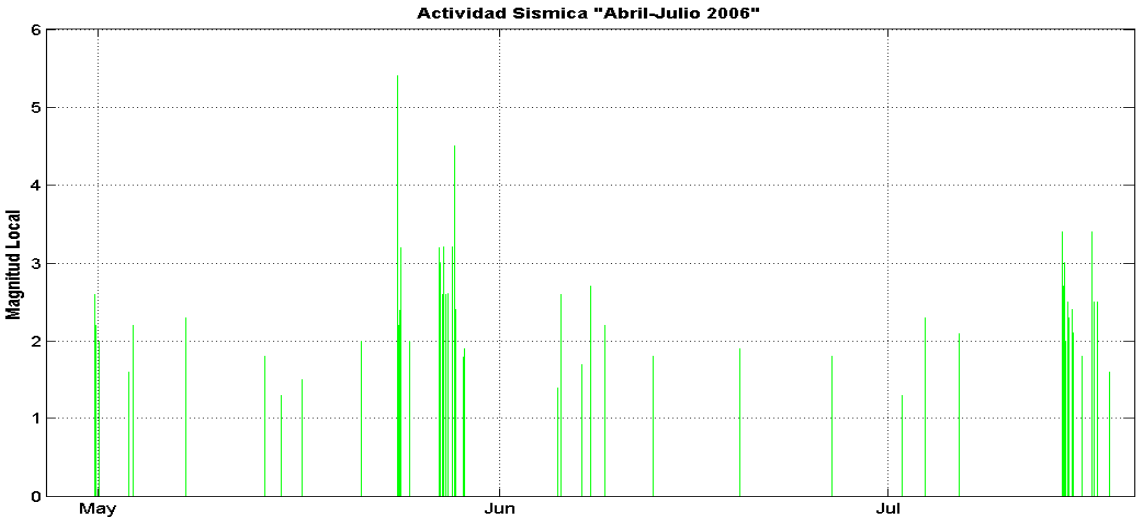

Figura 23. Distribución Temporal, de la actividad sísmica con magnitudes locales reportada en el catálogo USGS-Caltech. Abril-Julio 2006.

IV.2.1.8. Resumen de Parámetros Estadísticos.

A continuación se presenta un resumen de las estadísticas básicas de las series consideradas, Tabla V. Los histogramas de distribución de los datos (Figura 24) y el análisis de correlación cruzada para las series (Figura 25).

Tabla V. Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo C-3. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).

Var	Promedio	Mediana	Moda	STD	Rango	NP	PB	TA	TS
NP	355.2	355.5	356.0	8.3	58.6	*1*	*-0.13*	*0.12*	*0.13*
BP	77.1	77.2	76.7	2.8	19.7	*-0.13*	*1*	*-0.03*	*-0.27*
TA	30.3	30.3	30.3	0.02	0.4	*0.12*	*-0.03*	*1*	*0.17*
TS	32.1	32.6	37.7	6.6	31.7	*0.13*	*-0.27*	*0.17*	*1*

Señal	Frecuencia (CPD)	Periodo (h)	Amplitud	Nombre
Nivel Piezométrico	1.002	23.529	0.703	Diurna
	1.925	12.467	0.153	----
	1.995	12.030	0.228	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.104	----
Presión Barométrica	1.002	23.529	1.007	Diurna
	1.995	12.030	0.639	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.088	----
Temperatura Superficial	1.002	23.529	4.726	Diurna
	1.995	12.030	0.304	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.358	----
Gravedad Teórica	1.002	23.529	44.003	K1
	2.000	12.000	13.875	S2

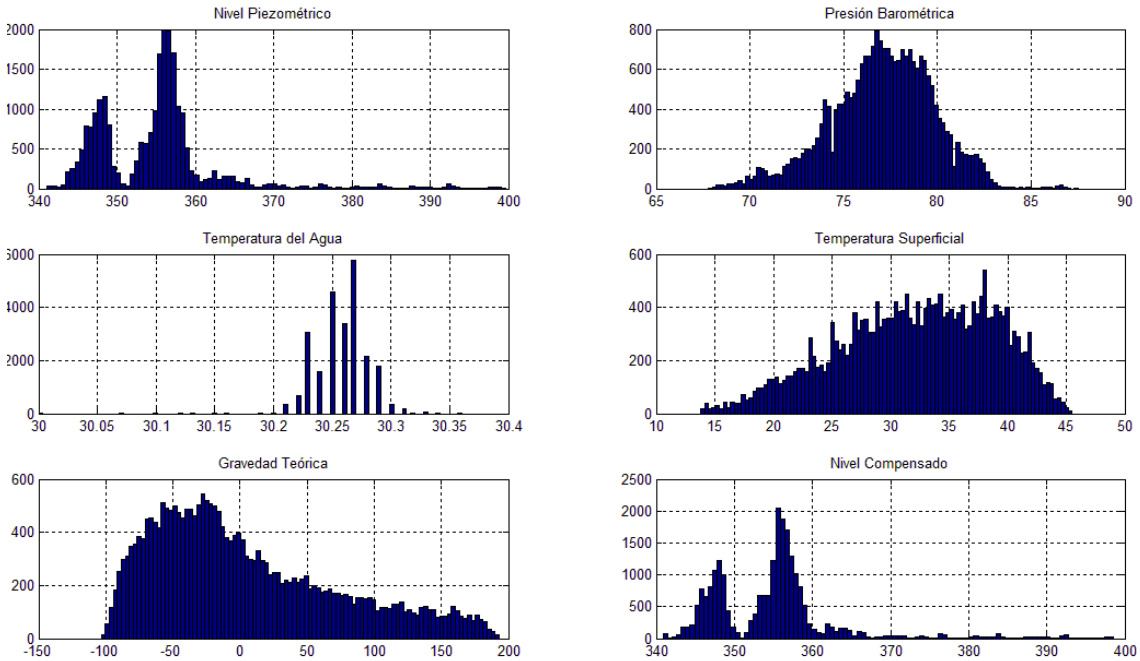

Figura 24. Histogramas de distribución para las series analizadas. C-3, Abril-Julio 2006.

La correlación cruzada por ventanas, implica utilizar pequeños intervalos de datos de cada serie de tiempo para desplazarlos uno respecto al otro, y así estimar la asociación de ambas series, con la ventaja de solo suponer estacionariedad en estos segmentos y no en toda la serie.

Se considera un desplazamiento de (-1,440 a 1,440 puntos; -5 a 5 días), con un ancho de ventana de (288 puntos, 1 día); es decir, se seleccionan los cinco primeros días de cada serie, y se desplazan en pasos de 1 día.

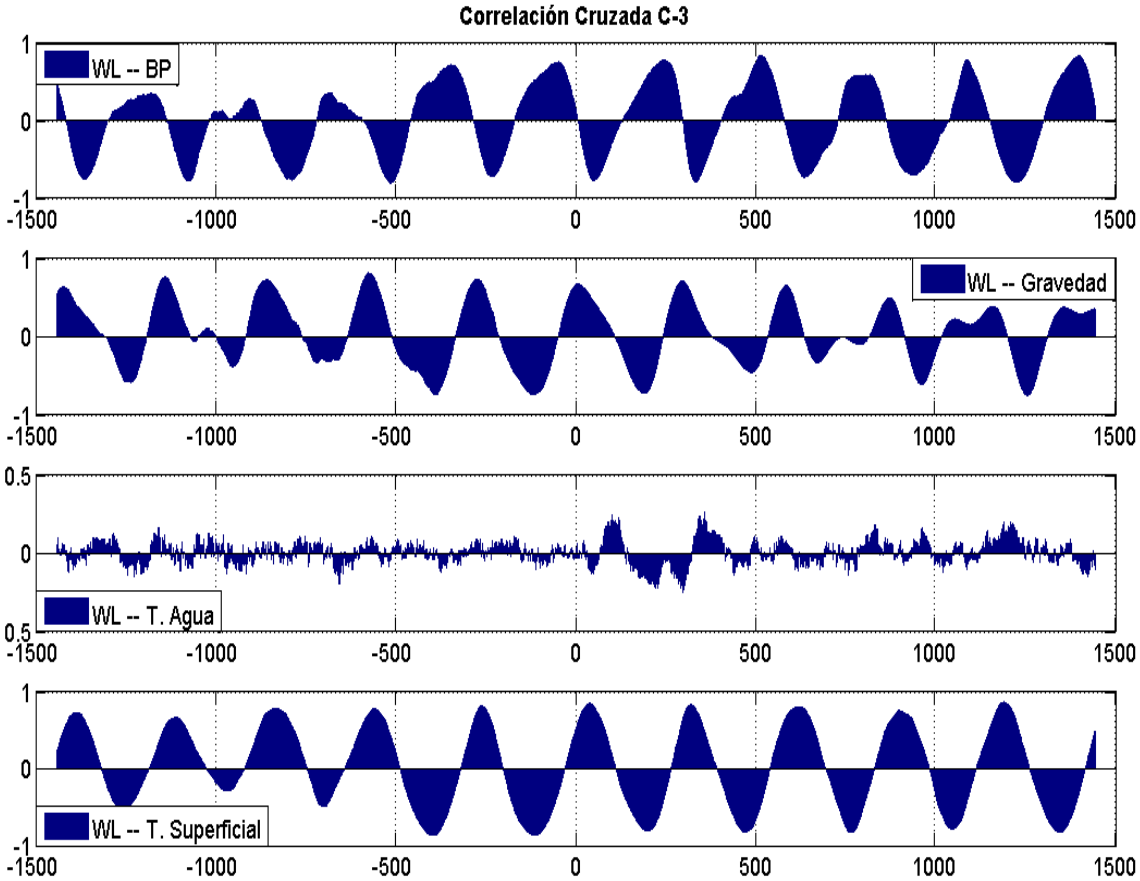

Figura 25. Correlación Cruzada para las series analizadas. Abril-Julio 2006.

El orden en que se presenta el análisis de correlación cruzada es: a) WL–BP (nivel piezométrico–presión barométrica; máxima correlación=0.825 a 42.7 h (+514)), b) WL–G (nivel piezométrico–gravedad; máxima correlación=0.805 a -48

h (-576)) c) WL–T. Agua (nivel piezométrico–temperatura del agua; máxima correlación=+0.250 a 29.7 h (357)) y d) WL–T. Superficial (nivel piezométrico–temperatura superficial; máxima correlación=0.855 a 98.h (1,186)).

IV.2.1.9. Filtrado de Nivel Piezométrico.

Inicialmente se tomó el registro de nivel piezométrico obtenido de la instrumentación, en este caso pozo C-3, se realizó una corrección por efectos barométricos, mediante la técnica de deconvolución de regresión, se calculó el periodograma donde se identificó la presencia de componentes diurnas y semidiurnas, así como una banda de baja frecuencia asociada a procesos de largo periodo (meses, años). Se obtuvo de igual manera los periodógramas para los registros de presión barométrica y temperatura superficial, donde se observa que las componentes dominantes son diurnas y semidiurnas también. De la marea gravitacional terrestre al ser un proceso muy bien estudiado, se pudieron reconocer las principales componentes que generan la variabilidad de está.

A causa de lo anterior se implementó el siguiente algoritmo de filtrado en el dominio de la frecuencia.

1. La transformada rápida de Fourier (TRF) es calculada para la señal.
2. La transformada es multiplicada por la función de respuesta del filtro en el dominio de la frecuencia.
3. La transformada resultante se convierte de regreso al dominio del tiempo.

Debido a las características de los periodógramas obtenidos, resulta de interés analizar la banda central (0.5 a 6 cpd), por lo que se aplica en primer lugar un Filtro Pasa Banda, con frecuencia central (F_C=3 cpd) y un ancho de banda (F_W=6 cpd) con la intención de reconstruir la señal con las componentes de la banda central, y eliminar las componentes de baja frecuencia y las de alta frecuencia; pero debido a las características del filtro aplicado, se aplicó después un Filtro Pasa Altas con frecuencia central (F_C=0.5 cpd) y un ancho de banda (F_W=0.1 cpd) buscando eliminar las componentes de baja frecuencia que permanecieron después del primer filtro.

En la (Figura 26-a) se observa el nivel piezométrico corregido por efectos barométricos. En la (Figura 26-b), se puede apreciar que hay una buena reconstrucción de la señal considerando solo las componentes de la banda central de frecuencias, y que como se mencionó debido al fenómeno de fuga de frecuencias que se presenta al aplicar un filtro pasa banda, se recurrió a un filtro pasa altas, que como se ilustra en la (Figura 26-c), reconstruye la señal principalmente con las componentes de la banda central (diurnas y semidiurnas dominantes), pudiendo identificar la perturbación asociada al evento sísmico principal considerado 5.4 Ml 24 de Mayo de 2006, y que indujo una variación en el nivel de aproximadamente 30 cm.

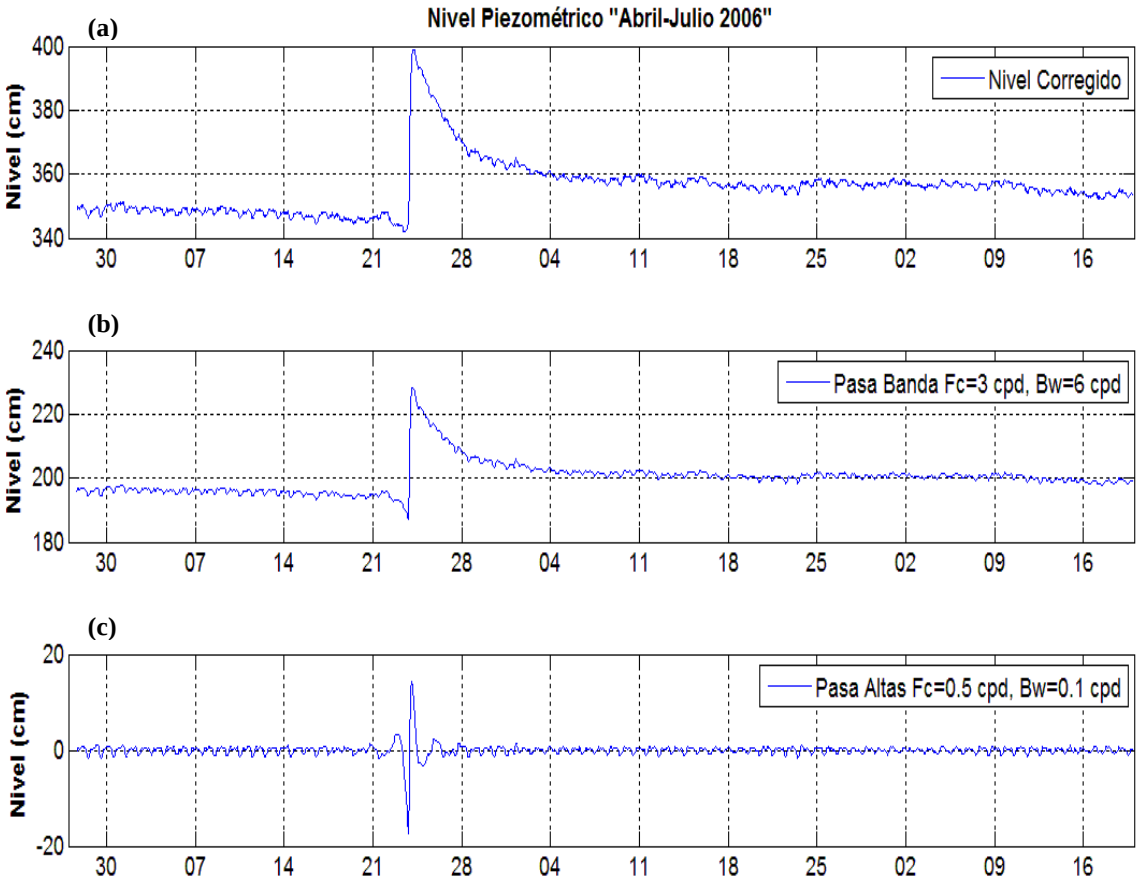

Figura 26. a) Nivel Piezométrico Compensado C-3, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas).

IV.2.2. Análisis para el pozo PZ-3.

IV.2.2.1. Nivel Piezométrico.

El instrumento (Levelogger) en el pozo PZ-3 (5.1 km al NE) del epicentro del evento sísmico (Figura 13), también mostro respuesta en su registro. Se considera el mismo intervalo 27 de Abril a 19 de Julio de 2006, y periodo de muestreo de 5 min, el comportamiento observado se muestra en la (Figura 27-a). Y pudiendo observar la respuesta inferida al evento del 24 de Mayo y a la actividad del día 28 de Mayo de 2006.

Del registro se obtienen los parámetros estadísticos básicos, Tabla VI.

En la (Figura 27-b) se muestra el autocorrelograma de la serie, donde se puede apreciar un efecto de memoria 16.2 días.

IV.2.2.2. Presión Barométrica.

Se mencionó que un Barologger puede ser usado para compensar todos los Leveloggers en un radio de 20 km en la horizontal y 300 m en cambio de elevación. Por lo que el registro obtenido del barómetro ubicado en el sitio correspondiente al pozo PZ-1 a 3.85 km (Figura 13) y su análisis (apartado IV.2.1.2) es usado para realizar la compensación barométrica del PZ-3.

IV.2.2.2.1. Respuesta Barométrica.

Del modelo de respuesta barométrica (Figura 28-a), observamos una eficiencia barométrica instantánea de 95 %, disminuyendo tras 5 minutos, y aumentando, dicho comportamiento se asocia con una respuesta compuesta.

Con la respuesta barométrica calculada (compuesta: acuífero libre y well-bore storage $^{y}/_{o}$ well-skin effects), se procede a realizar la compensación por efectos atmosféricos en el registro de nivel piezométrico del pozo PZ-3.

De la (Figura 28-b) se puede observar un comparativo entre el nivel piezométrico registrado en el pozo PZ-3 contra la presión barométrica medida en

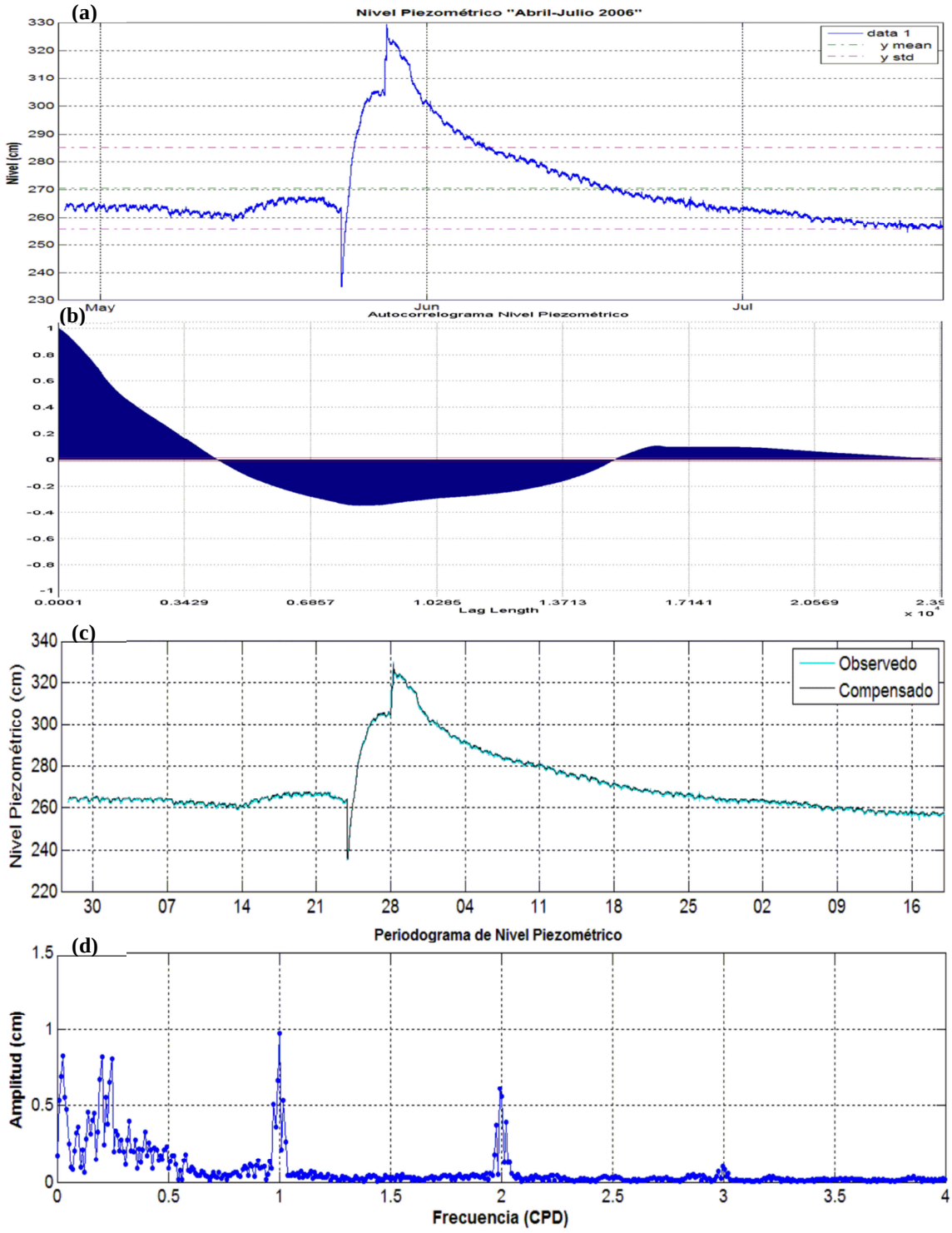

Figura 27. a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma para pozo PZ-3. Abril-Julio 2006.

el pozo PZ-1, mientras que en la (Figura 28-c) podemos apreciar la remoción de estos efectos, lo cual se ve reflejado en la disminución del ruido en la señal, pero se mantiene el comportamiento observado en la señal original. Y quedando aún más evidente la respuesta al evento del 24 y 28 de Mayo de 2006, con variaciones en el nivel de aproximadamente 60 y 25 cm respectivamente.

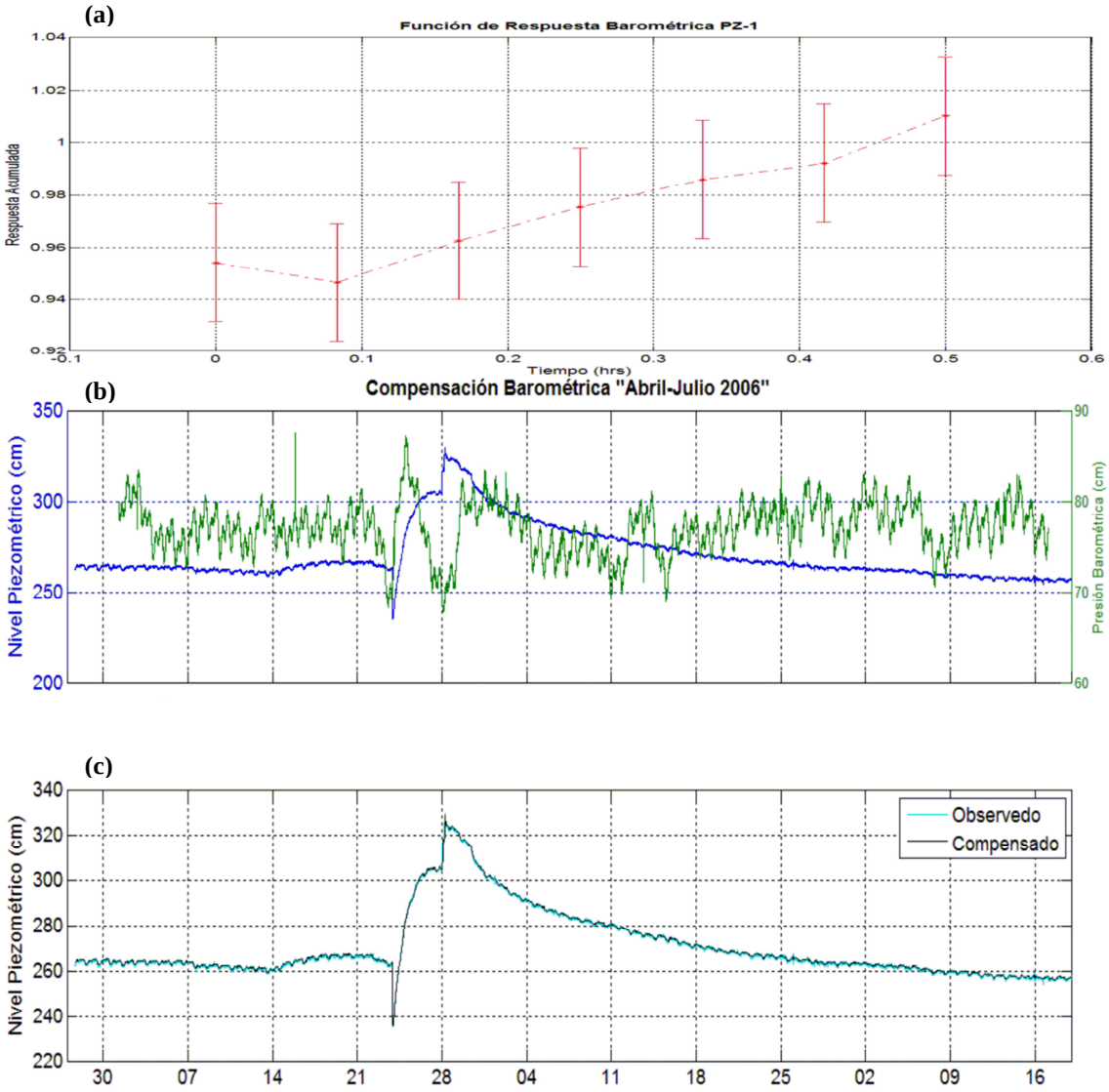

Figura 28. a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (PZ-3 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado.

Aplicando análisis de Fourier a la serie resultante después de aplicar la corrección por efectos barométricos, se obtiene el periodograma (Figura 27-d), en el cual se identifican las bandas de frecuencias definidas en secciones anteriores, con la particularidad, de que la banda de baja frecuencia tiene amplitudes relativamente pequeñas, apreciándose de mejor manera que las componentes diurnas y semidiurnas son las que dominan en la señal, así como la aportación de la componente con periodo de recurrencia cercana a las 8 horas.

IV.2.2.3. Temperatura del agua dentro del pozo PZ-3.

En la (Figura 29) se muestra el registro de temperatura dentro del pozo PZ-3. Se enlistan las propiedades estadísticas características de la serie Tabla VI.

El análisis realizado para las variables: temperatura superficial (apartado IV.2.1.4.), precipitación (apartado IV.2.1.5.), marea gravitacional teórica (apartado IV.2.1.6.) y actividad sísmica (apartado IV.2.1.7.), y que con base en su ubicación y el hecho de cubrir el mismo intervalo de estudio, su análisis es válido para el resto de los pozos que se contemplan en esta sección.

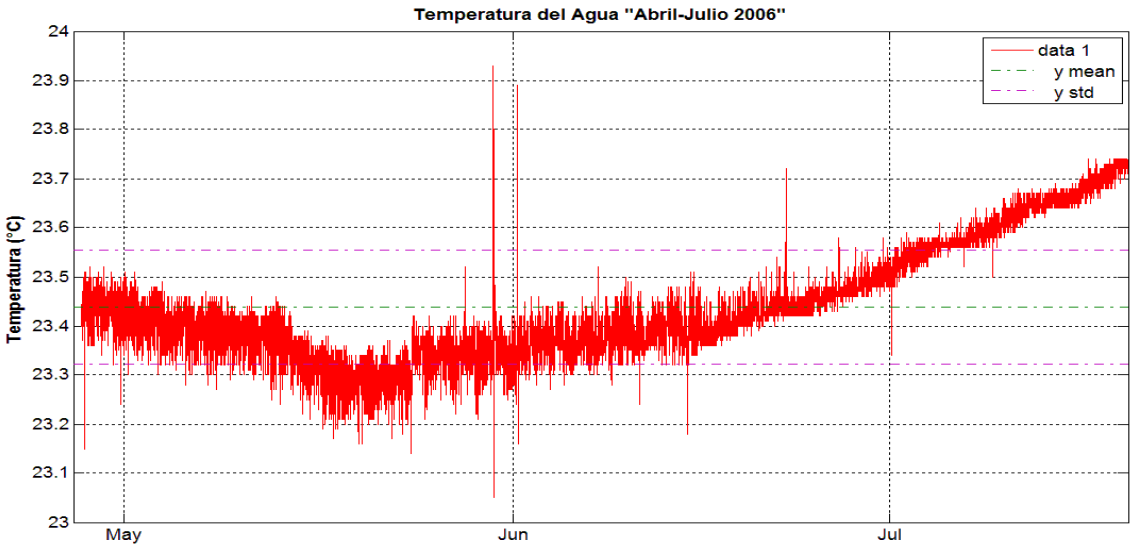

Figura 29. Temperatura del Agua, pozo PZ-3.Abril-Julio 2006.

IV.2.2.4. Resumen de Parámetros Estadísticos.

El coeficiente de correlación de Pearson, las estadísticas básicas y espectrales se muestran, Tabla VI.

Los histogramas de distribución de Nivel Piezométrico y Compensado (Figura 30) son mostrados, el resto de las variables se mostraron en (Figura 24).

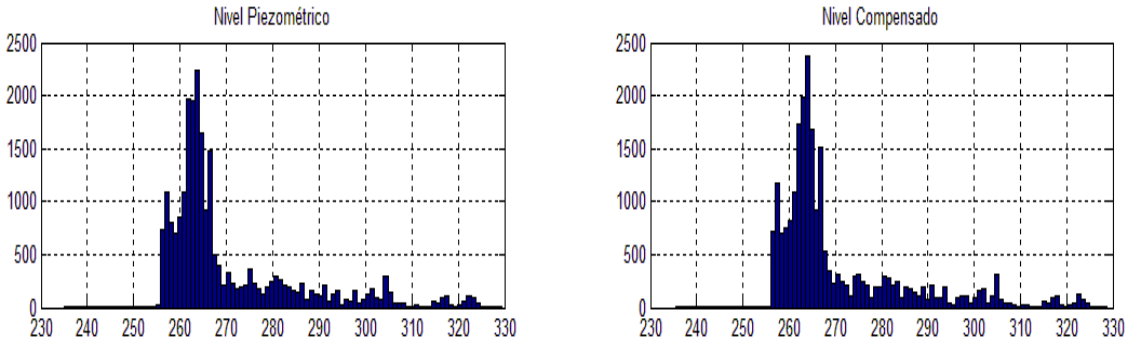

Figura 30. Histogramas de distribución para las series analizadas. PZ-3, Abril-Julio 2006.

Tabla VI. Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo PZ-3. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).

Var	Promedio	Mediana	Moda	STD	Rango	NP	PB	TA	TS
NP	370.4	264.3	264.0	14.9	94.5	*1*	*-0.16*	*-0.47*	*-0.13*
BP	77.1	77.2	76.7	2.8	19.7	*-0.16*	*1*	*0.15*	*-0.27*
TA	23.4	23.4	23.4	0.11	0.8	*-0.47*	*0.15*	*1*	*0.35*
TS	32.1	32.6	37.7	6.6	31.7	*-0.13*	*-0.27*	*0.35*	*1*

Señal	Frecuencia (CPD)	Periodo (h)	Amplitud	Nombre
Nivel Piezométrico	1.002	23.529	0.973	Diurna
	1.995	12.030	0.605	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.101	----
Presión Barométrica	1.002	23.529	1.007	Diurna
	1.995	12.030	0.639	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.088	----
Temperatura Superficial	1.002	23.529	4.726	Diurna
	1.995	12.030	0.304	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.358	----
Gravedad Teórica	1.002	23.529	44.003	K1
	2.000	12.000	13.875	S2

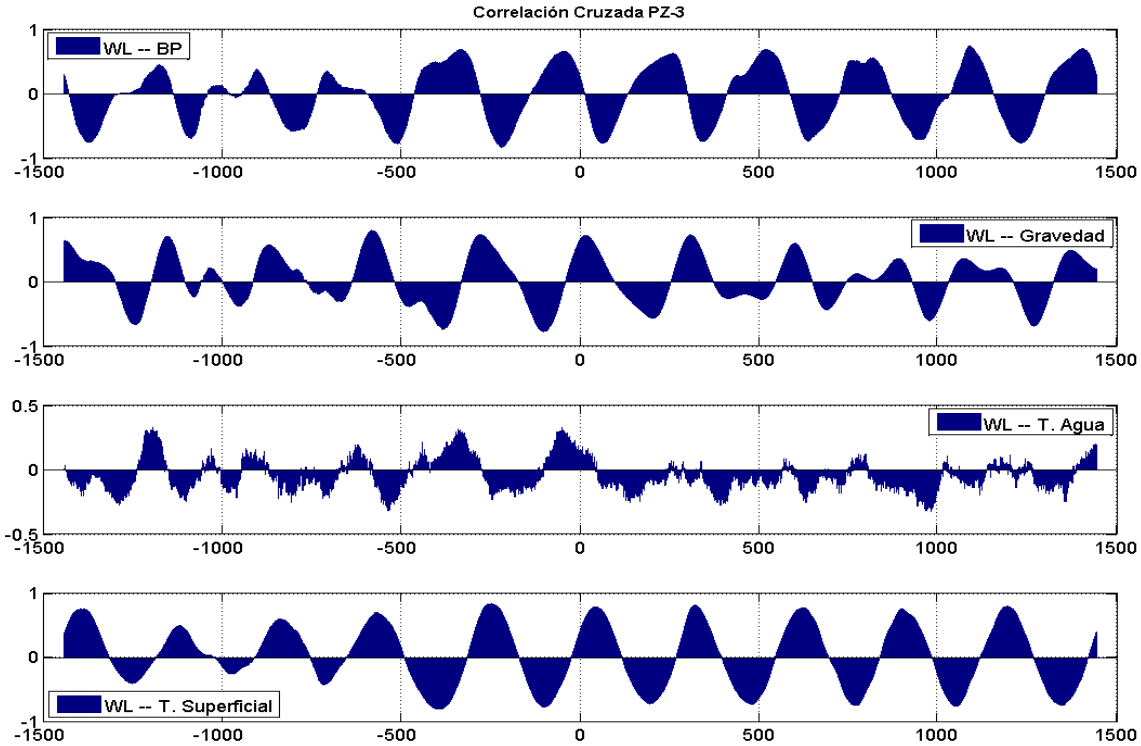

Figura 31. Correlación Cruzada para las series analizadas. Abril-Julio 2006.

Los valores de correlación cruzada máximos son: WL-BP (-0.830 a -18.3 h (-220)), WL-G (0.786 a -48.5 h (-583)), WL-T. Agua (0.325 a -99.5 h (-1,194)), WL-T. Superficial (0.832 a -20.7 h (-249)).

IV.2.2.5. Filtrado de Nivel Piezométrico.

Se retoma la corrección por efectos barométricos del pozo PZ-3, a la cual se le implementa el procedimiento descrito (apartado IV.2.1.9.). Y con el resultado que se muestra (Figura 32). Al aplicar el primer filtro pasa banda, se puede reconstruir la señal de buena manera, lo cual nos dice que las componentes de la banda central son las dominantes; después se implementa el filtro pasa altas, con lo que al pasar al dominio del tiempo, vemos en la figura la respuesta del nivel del agua a los sismos del día 24 y 28 de Mayo de 2006, con una variación de aproximadamente 30 y 20 cm respectivamente.

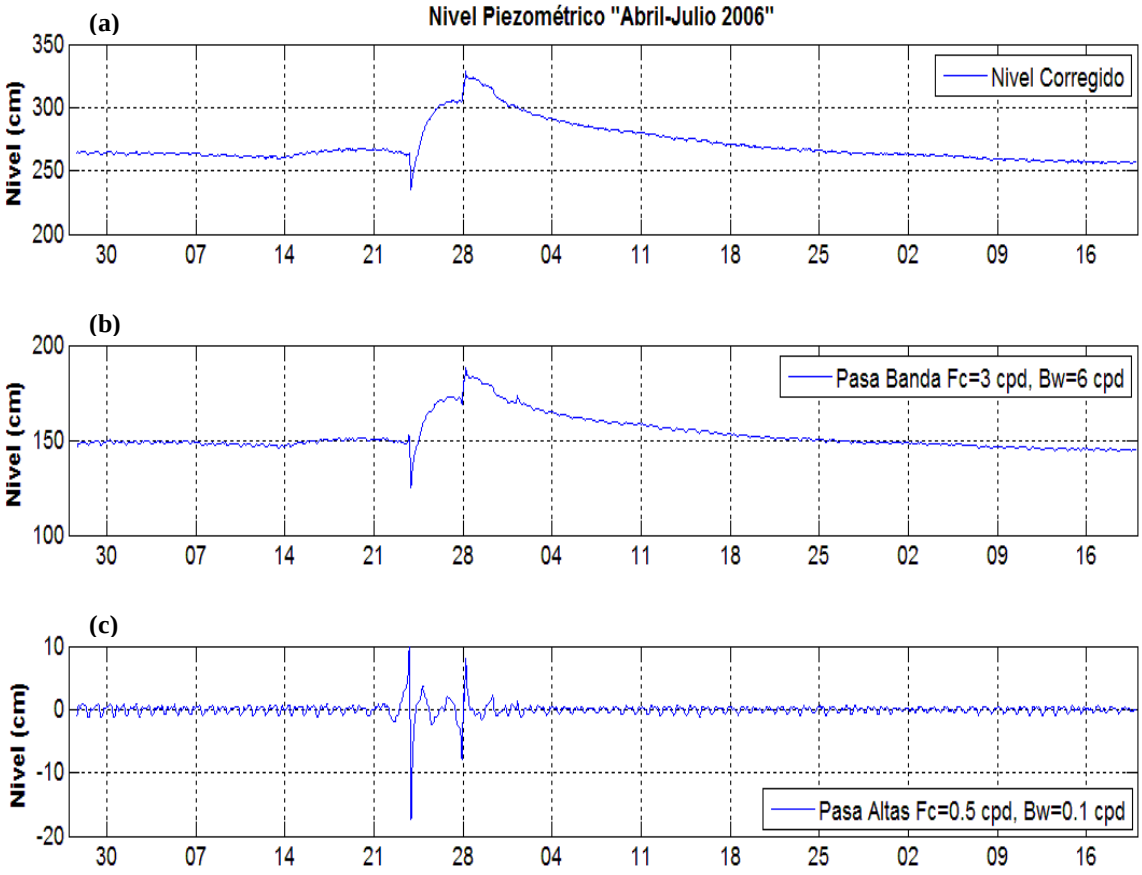

Figura 32. a) Nivel Piezométrico Compensado PZ-3, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas).

IV.2.3. Análisis para el pozo PZ-5.

IV.2.3.1. Nivel Piezométrico.

A 8.7 km al SE del epicentro del evento sísmico se localiza el pozo PZ-5 en este sitio también se observaron variaciones en el registro de nivel piezométrico. Se considera el mismo intervalo 27 de abril a 19 de julio de 2006, y periodo de muestreo de 5 minutos el grafico de su comportamiento se observa en la (Figura 33-a). Mientras que del autocorrelograma (Figura 33-b) se logra apreciar un efecto

de memoria de 20.4 días, y una marcada ciclicidad congruente con lo que se observa en el registro de nivel piezométrico.

Del registro se pueden enlistar los parámetros estadísticos. Tabla VII.

IV.2.3.2. Presión Barométrica.

El registro de presión atmosférica en el PZ-1 a 7.8 km al SE (Figura 13), sus características y análisis (apartado IV.2.1.2.) son usadas para realizar la compensación barométrica en el pozo PZ-5.

IV.2.3.2.1. Respuesta Barométrica.

Con los registros de nivel piezométrico y presión atmosférica se calcula el modelo de respuesta barométrica (Figura 34).

De la figura observamos una eficiencia barométrica instantánea de aproximadamente 97 %, disminuyendo tras 5 minutos, y posteriormente presenta tendencia positiva, dicho comportamiento se asocia con una respuesta compuesta de acuífero libre y características de pozo (well-bore storage y well-skin effects).

Con la respuesta barométrica, se realiza la compensación por efectos atmosféricos en el registro de nivel piezométrico del pozo PZ-5.

Se puede observar (Figura 34-b) la comparación entre el nivel piezométrico registrado en el pozo PZ-5 contra la presión barométrica medida en el pozo PZ-1, mientras que se observa (Figura 34-c) la remoción del efecto barométrico, lo que produce disminución de ruido en la señal.

El gráfico (Figura 34-c) tiene la particularidad de no poderse distinguir claramente la respuesta al evento del 24 y 28 de Mayo de 2006, pero si una para el día 30 de Mayo, con un incremento en el nivel de cerca de 20 cm.

Aplicando análisis de Fourier al registro de nivel corregido, se obtiene el periodograma observado (Figura 33-d), en el cual se identifican las bandas de frecuencias definidas en secciones anteriores, banda de baja frecuencia, banda central con componentes diurnas y semidiurnas y aportación de la componente con periodo de 8 horas.

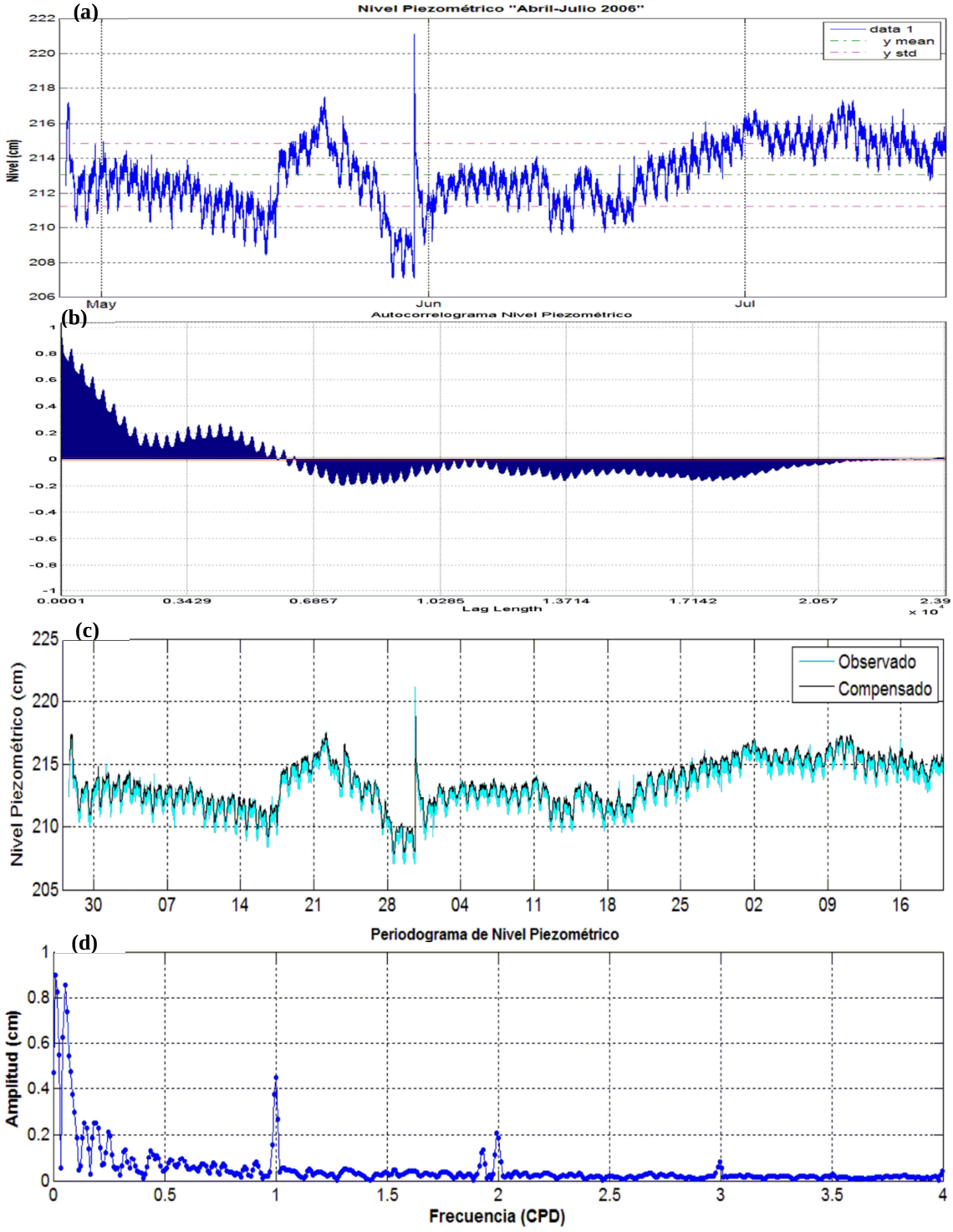

Figura 33. a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma, para pozo PZ-5. Abril-Julio 2006.

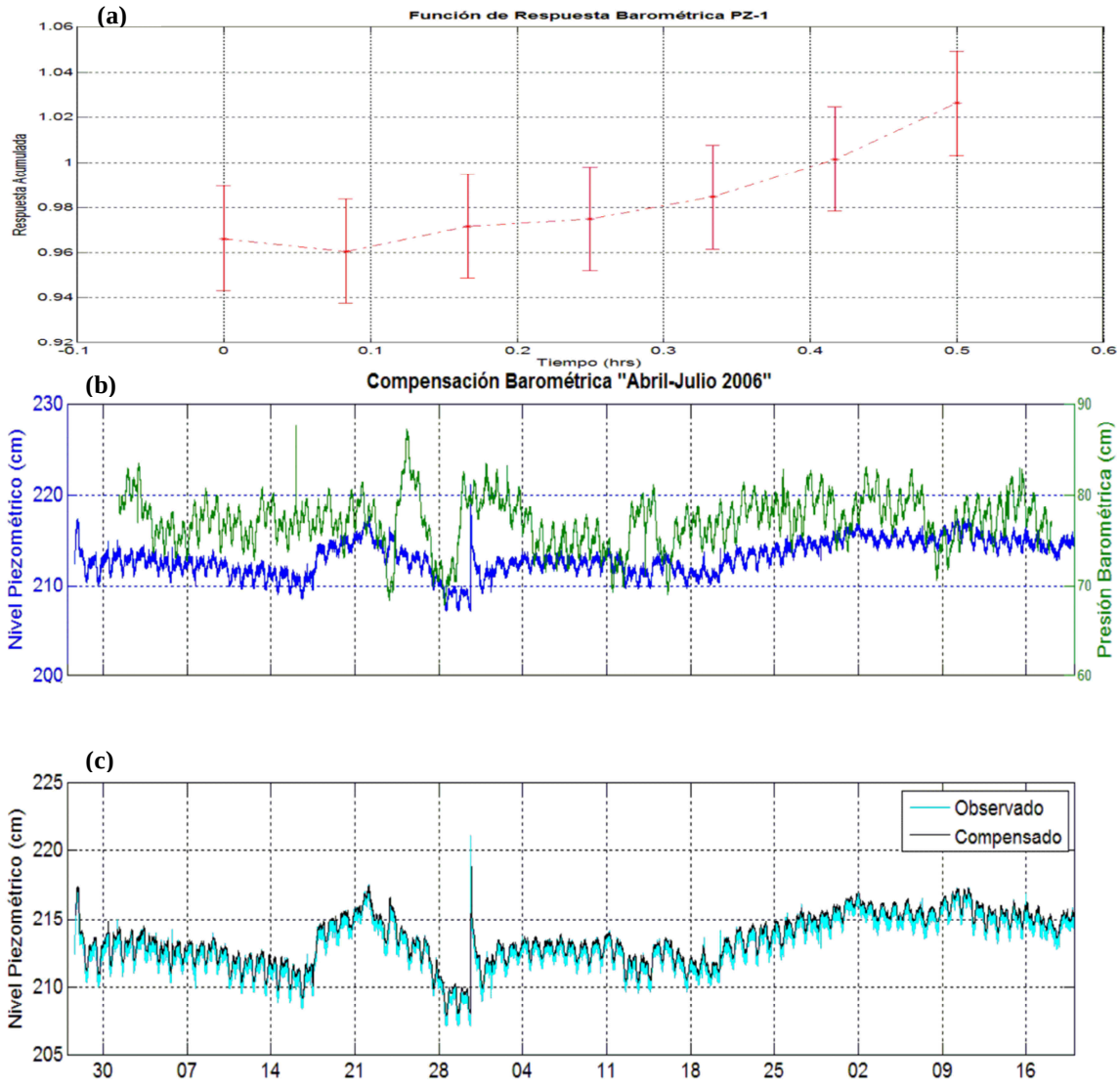

Figura 34. a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (PZ-5 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado.

IV.2.3.3. Temperatura del agua dentro del pozo PZ-5.

En la Figura 35 se muestra la temperatura medida dentro del pozo PZ-5, con parámetros estadísticos mencionados en Tabla VII.

Observándose comportamiento anormal (picos), que puede estar relacionado con un cambio de posición del medidor. Siendo que el pico observado antes del

inicio del mes de junio se aprecia también en el registro de nivel piezométrico, donde una inspección a detalle de la serie original se identifica un aumento en la temperatura de 10 ℃ durante 45 min, que se asocia con la actividad de extraer el instrumento y recopilar los datos del medidor (16:00:00 30-05-06); mientras que el segundo pico anómalo (09:30:00 01-06-06) presenta un incremento de 6 ℃ en 20 min. Lo cual también se logra apreciar en el nivel piezométrico con una disminución de 2 cm en el nivel observado.

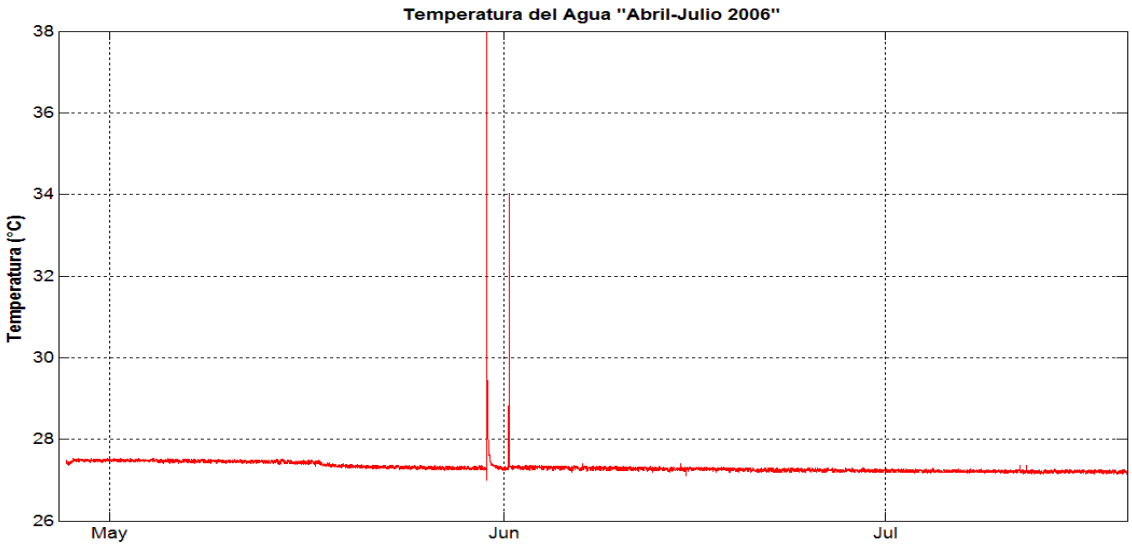

Figura 35. Temperatura del Agua, pozo PZ-5. Abril-Julio 2006.

IV.2.3.4. Resumen de Parámetros Estadísticos.

Los parámetros estadísticos y espectrales de las series, se presentan en la Tabla VII; mientras que en los histogramas para nivel piezométrico y nivel compensado se muestran en (Figura36), y el correlograma de las series (Figura 37), con la variante de que se analizan solo 4 días (1,152 puntos) y no 5 días, lo anterior por problemas de memoria del equipo de cómputo utilizado.

Tabla VII. Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo PZ-5. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).

Var	Promedio	Mediana	Moda	STD	Rango	NP	PB	TA	TS
NP	213.1	213.0	212.8	1.8	14.0	*1*	*0.02*	*-0.22*	*0.39*
BP	77.1	77.2	76.7	2.8	19.7	*0.02*	*1*	*0.02*	*-0.27*
TA	27.3	27.3	27.2	0.21	10.9	*-0.22*	*0.02*	*1*	*-0.22*
TS	32.1	32.6	37.7	6.6	31.7	*0.39*	*-0.27*	*-0.22*	*1*

Señal	Frecuencia (CPD)	Periodo (h)	Amplitud	Nombre
Nivel Piezométrico	1.002	23.529	0.449	Diurna
	1.925	12.467	0.121	----
	1.995	12.030	0.207	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.077	----
Presión Barométrica	1.002	23.529	1.007	Diurna
	1.995	12.030	0.639	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.088	----
Temperatura Superficial	1.002	23.529	4.726	Diurna
	1.995	12.030	0.304	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.358	----
Gravedad Teórica	1.002	23.529	44.003	K1
	2.000	12.000	13.875	S2

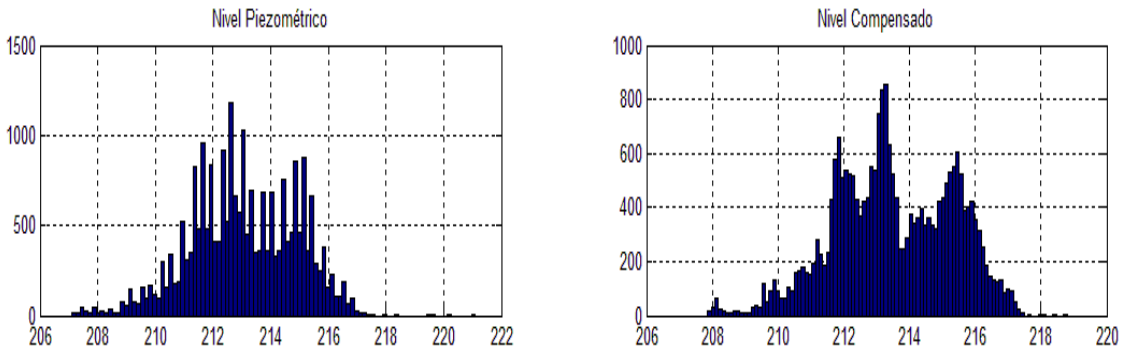

Figura 36. Histogramas de distribución para las series analizadas. PZ-5, Abril-Julio 2006

Los valores de correlación cruzada máximos son: WL-BP (-0.855 a -42.1 h (-504)), WL-G (0.851 a -48.3 h (-580)), WL-T. Agua (0.395 a -85.5 h (-1,026)), WL-T. Superficial (-0.911 a -8.5 h (-102)).

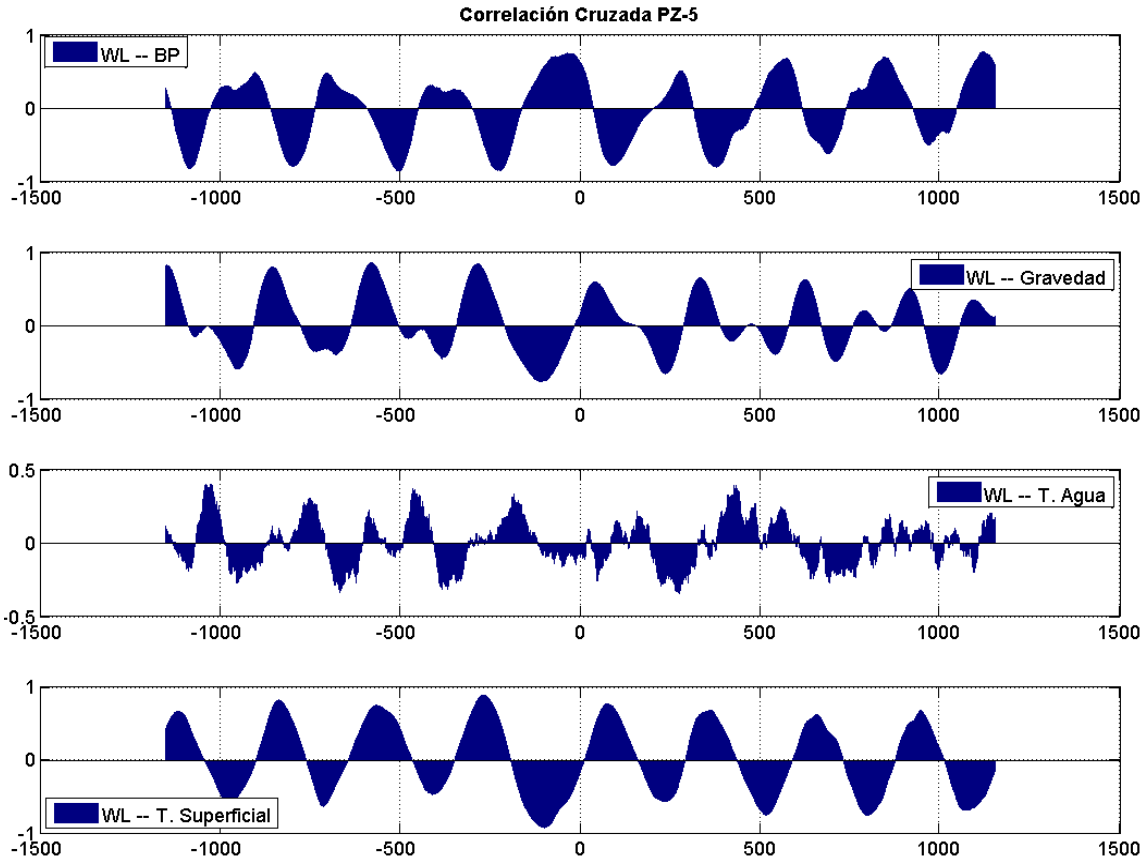

Figura 37. Correlación Cruzada para las series analizadas. Abril-Julio 2006.

IV.2.3.5. Filtrado de Nivel Piezométrico.

La corrección por efectos barométricos del pozo PZ-5, se filtra según el procedimiento descrito (apartado IV.2.1.9.). Y con resultado mostrado (Figura 38). Al aplicar el primer filtro pasa banda, se observa buen ajuste al reconstruir la señal, lo cual nos indica que las componentes de la banda central son las dominantes; después se implementa el filtro pasa altas, y al pasar al dominio del tiempo, vemos en la figura una mínima respuesta del nivel del agua a los sismos del día 24 de Mayo de 2006, y no se logra apreciar la respuesta al evento del día 28, mientras que queda en evidencia una respuesta a un fenómeno acontecido el día 30 de Mayo, pero que no asociado con actividad sísmica.

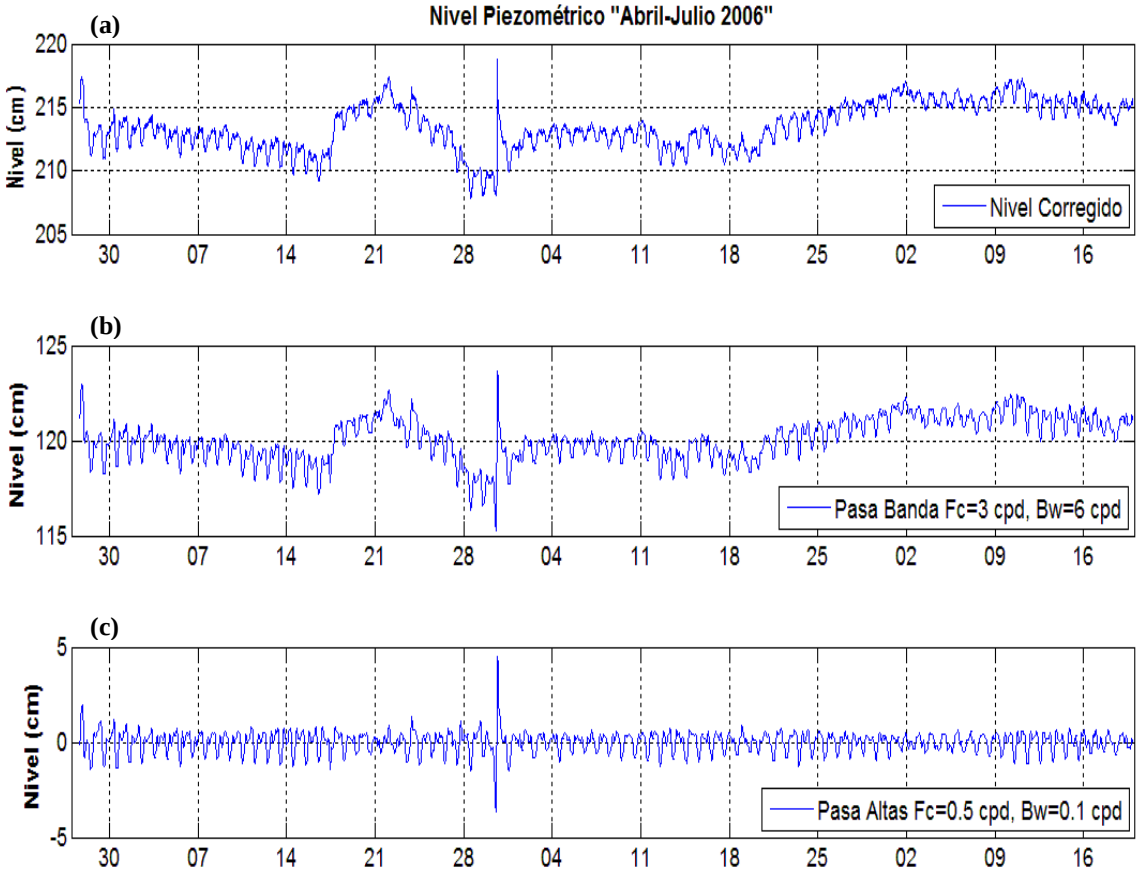

Figura 38. a) Nivel Piezométrico Compensado PZ-5, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas).

IV.2.4. Análisis para el pozo G-1-17.

IV.2.4.1. Nivel Piezométrico.

A una distancia de 12.6 km y dirección E del epicentro, se encuentra el pozo G-1-17. Se considera el mismo intervalo, y periodo de muestreo, cuyo comportamiento se observa (Figura 39-a). Mientras que del autocorrelograma (Figura 39-b) se logra apreciar un efecto de memoria de 32.4 días, y una marcada ciclicidad congruente con lo que se observa en el registro de nivel piezométrico. Y los parámetros estadísticos de esta serie se enlistan en Tabla VIII.

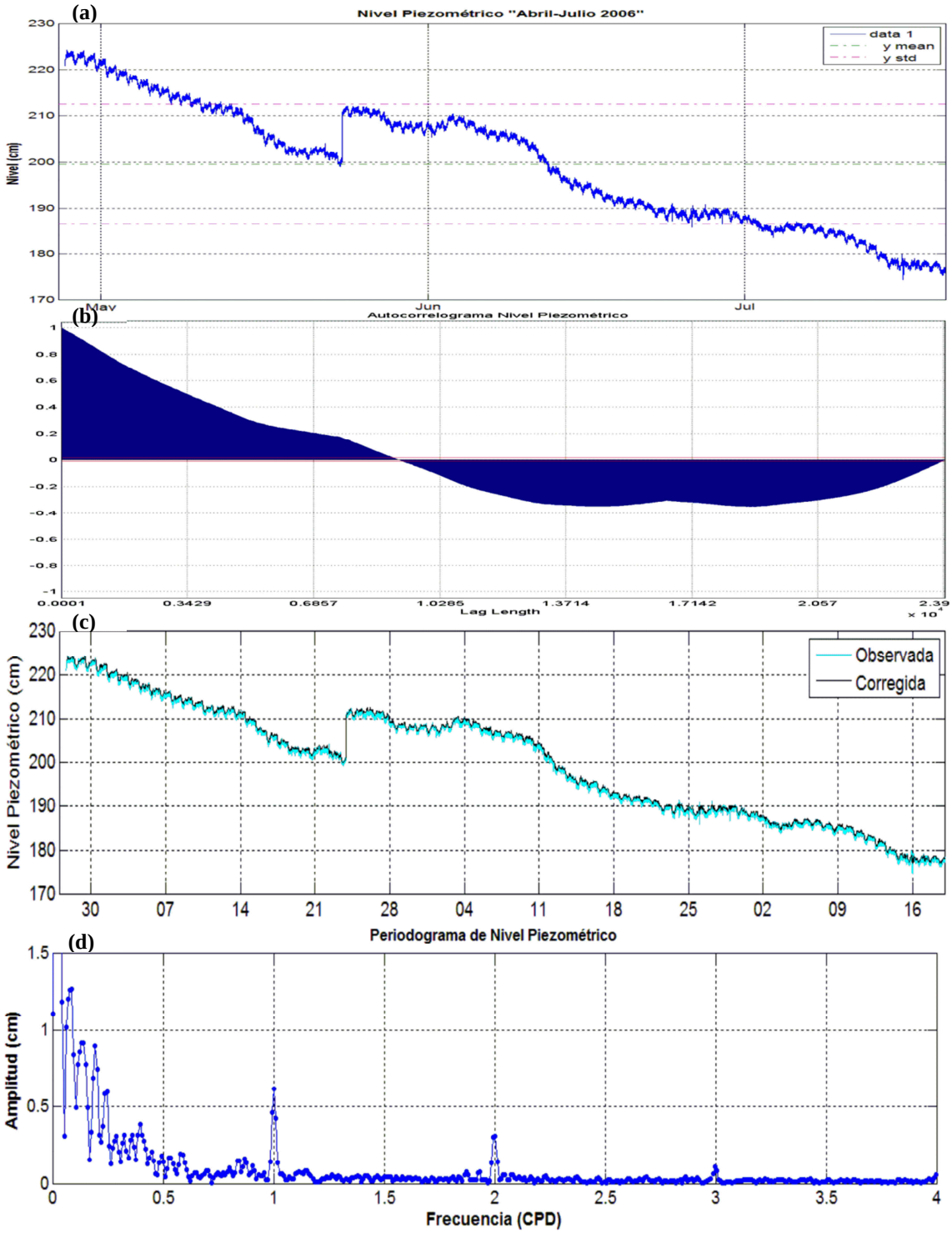

Figura 39. a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma, para pozo G-1-17. Abril-Julio 2006.

IV.2.4.2. Presión Barométrica.

El registro obtenido de presión atmosférica en el PZ-1 a una distancia de 10.3 km al Oeste de G-1-17 (Figura 13) y que sus características (apartado IV.2.1.2.) son válidas, motivo por lo cual usadas para realizar la compensación barométrica en el pozo G-1-17.

IV.2.4.2.1. Respuesta Barométrica.

Con los registros de nivel piezométrico y presión atmosférica se calcula el modelo de respuesta barométrica, y se muestra en (Figura 40-a), una eficiencia barométrica instantánea de aproximadamente 88 %, disminuyendo tras 5 minutos, y posteriormente presenta tendencia positiva se observa en la figura; dicho comportamiento se asocia con una respuesta compuesta de acuífero libre y características de pozo (well-bore storage y well-skin effects).

Con la respuesta barométrica, se realiza la compensación por efectos atmosféricos en el registro de nivel piezométrico del pozo G-1-17.

En la (Figura 40-a) se muestra primeramente la comparación entre el nivel piezométrico registrado en el pozo G-1-17 contra la presión barométrica medida en el pozo PZ-1; mientras que en la (Figura 40-b) se observa la remoción del efecto barométrico, lo que produce importante disminución de ruido en la señal.

Observándose con mayor claridad la respuesta al evento del 24 de Mayo de 2006, y variación de aproximadamente de 10 cm; aunque por otro lado, no se aprecia evidente respuesta a la actividad del día 28.

Aplicando análisis de Fourier, se obtiene el periodograma mostrado en la (Figura 39-d), en el cual al igual que en los pozos considerados anteriormente se identifican claramente las bandas de frecuencias (baja y central); la banda de baja frecuencia bien acotada, conteniendo la componente con mayor amplitud (aproximadamente 7.5 cm), y a la que se puede inferir la tendencia decreciente de la serie; si ahora fijamos nuestra atención en la banda central, se pueden

reconocer con facilidad, las componentes diurnas y semidiurnas así como una ligera aportación de la componente con periodo cercano a 8 horas.

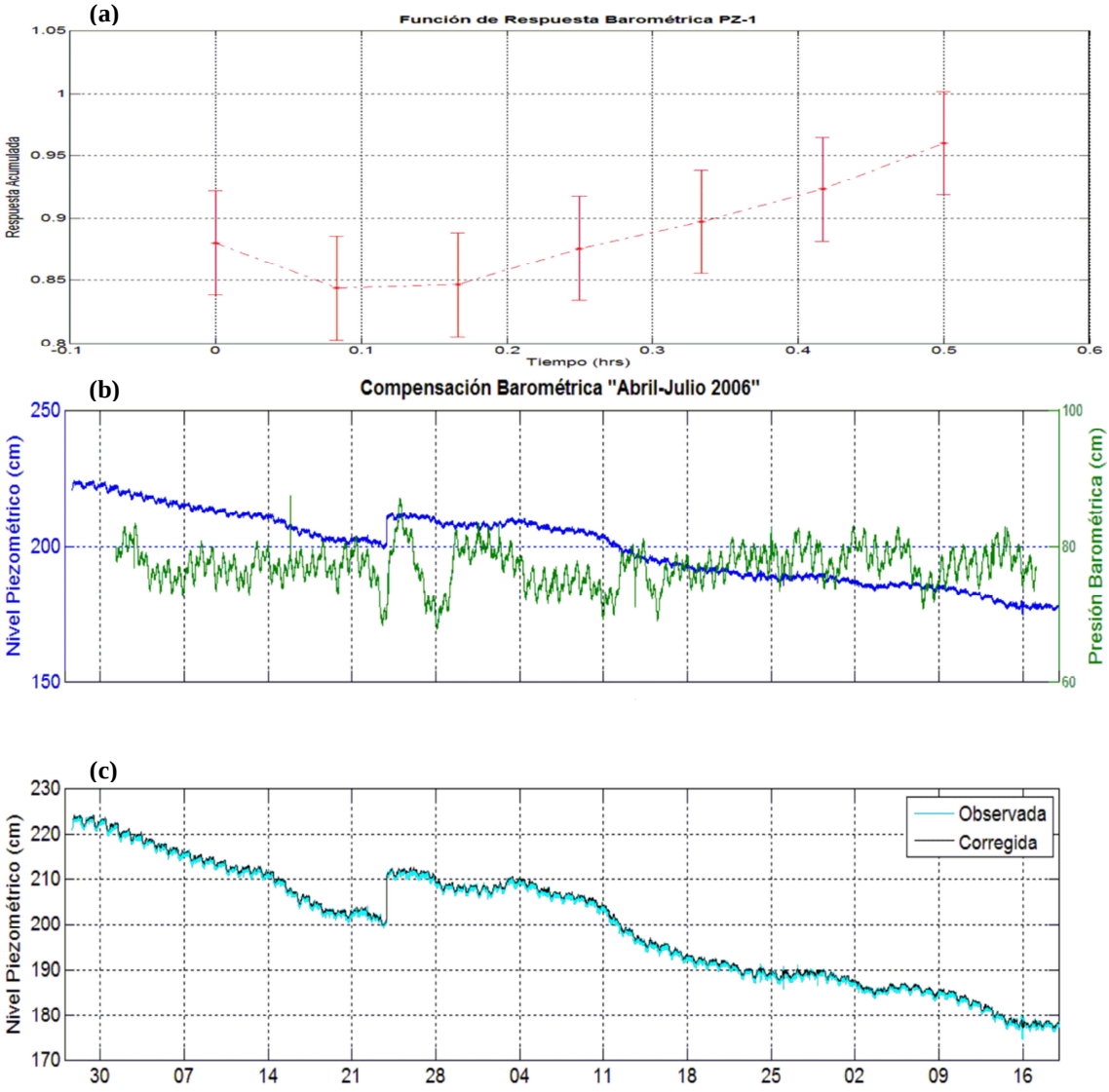

Figura 40. a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (G-1-17 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado.

IV.2.4.3. Temperatura del agua dentro del pozo G-1-17.

Se muestra la temperatura medida dentro del pozo G-1-17 (Figura 41). Las propiedades estadísticas características del registro se mencionan en Tabla VIII.

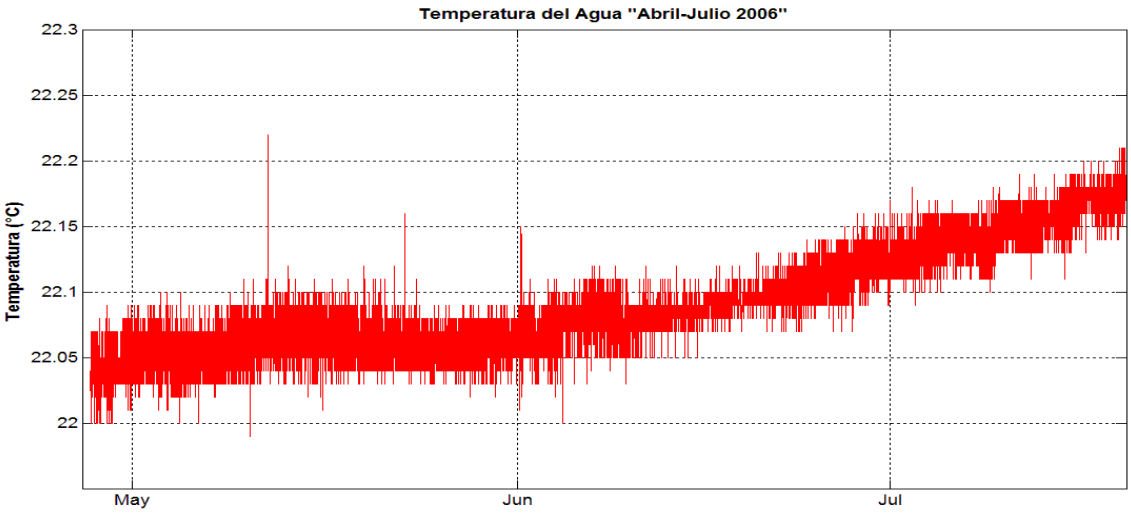

Figura 41. Temperatura del Agua, pozo G-1-17. Abril-Julio 2006.

IV.2.4.4. Resumen de Parámetros Estadísticos.

La matriz de correlación de Pearson, las estadísticas y características del espectro se mencionan, Tabla VIII. Los histogramas de distribución de las series de interés (Figura 42), y del correlograma de las series analizadas (Figura 43), podemos mencionar las máximas correlaciones: WL-BP (0.840 a 43.7 h (+523)), WL-G (-0.802 a -7.6 h (-92)), WL-T. Agua (-0.250 a 93 h (1,116)), WL-T. Superficial (0.830 a 27.1 h (325))

Tabla VIII. Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo G-1-17. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).

Var	Promedio	Mediana	Moda	STD	Rango	NP	PB	TA	TS
NP	199.5	202.3	189.0	12.9	49.9	*1*	*-0.13*	*-0.88*	*-0.52*
BP	77.1	77.2	76.7	2.8	19.7	*-0.13*	*1*	*0.11*	*-0.27*
TA	22.1	22.1	22.1	0.04	0.23	*-0.88*	*0.11*	*1*	*0.49*
TS	32.1	32.6	37.7	6.6	31.7	*-0.52*	*-0.27*	*0.49*	*1*

Señal	Frecuencia (CPD)	Periodo (h)	Amplitud	Nombre
Nivel Piezométrico	1.002	23.529	0.615	Diurna
	1.995	12.030	0.298	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.103	----
Presión Barométrica	1.002	23.529	1.007	Diurna
	1.995	12.030	0.639	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.088	----
Temperatura Superficial	1.002	23.529	4.726	Diurna
	1.995	12.030	0.304	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.358	----
Gravedad Teórica	1.002	23.529	44.003	K1
	2.000	12.000	13.875	S2

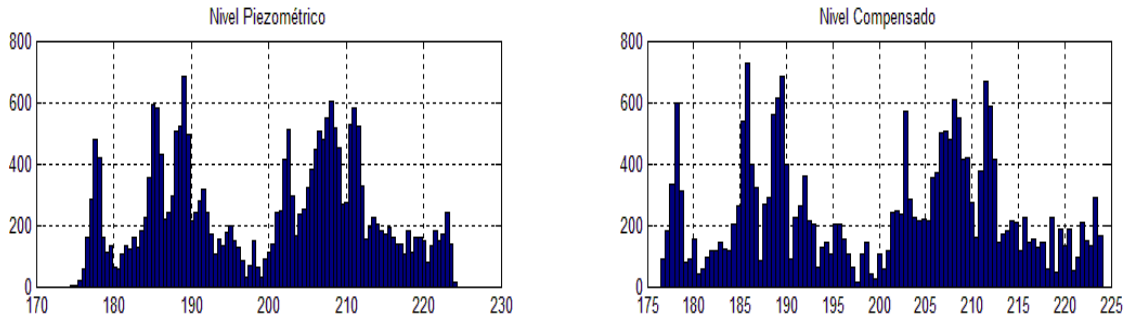

Figura 42. Histogramas de distribución para las series analizadas. G-1-17, Abril-Julio 2006.

IV.2.4.5. Filtrado de Nivel Piezométrico.

La compensación por efectos barométricos, se filtra según el procedimiento descrito (apartado IV.2.1.9.). Y con resultado mostrado (Figura 44). Una vez que se aplica el filtro pasa banda, se observa que al reconstruir la señal se obtiene un buen ajuste, lo cual puede indicar que las componentes de la banda central son las dominantes, aún es posible identificar la tendencia negativa en la señal, la cual puede estar asociada a una de las componentes de la banda de bajas frecuencias. Después se implementa el filtro pasa altas, y al pasar al dominio del tiempo vemos en la figura una mínima respuesta del nivel del agua a la actividad del día 28 y dominando, la variación inferida al sismo del día 24 de Mayo de 2006.

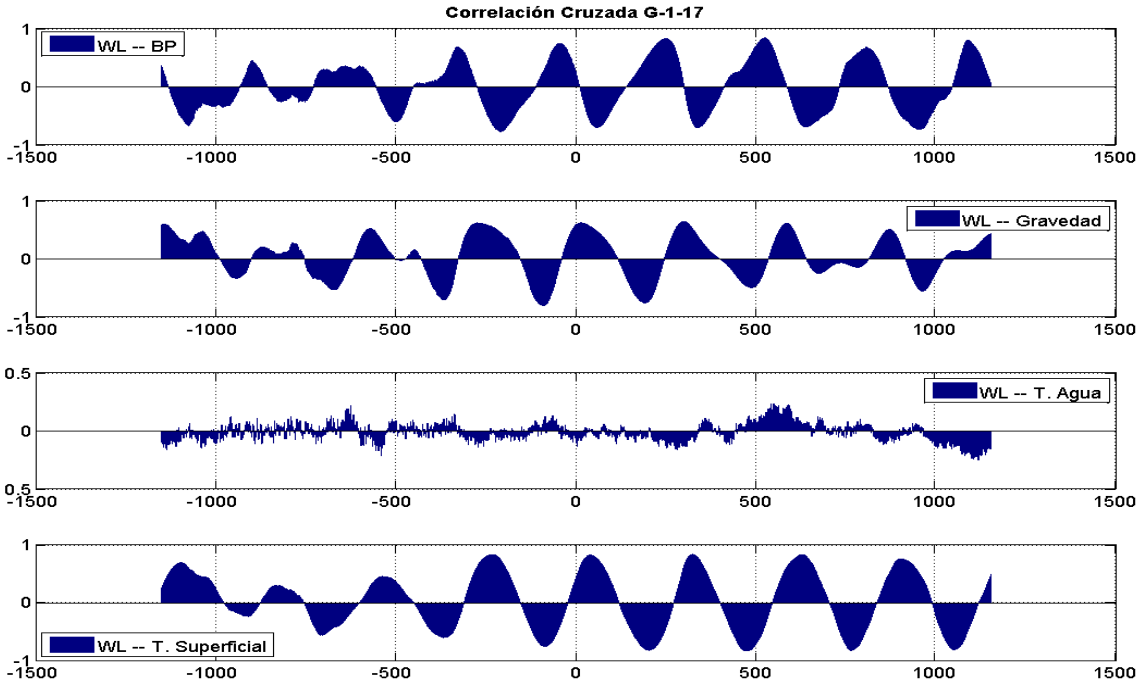

Figura 43. Correlación Cruzada para las series analizadas. Abril-Julio 2006.

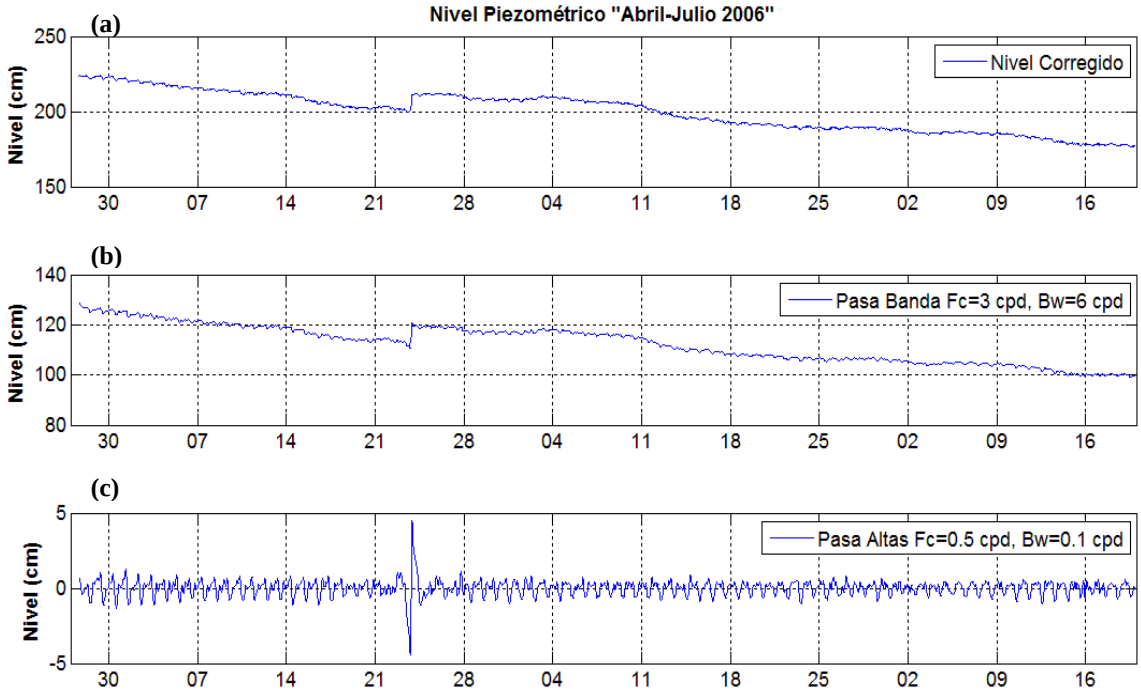

Figura 44. a) Nivel Piezométrico Compensado G-1-17, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas).

Finalmente retomamos el comparativo de las respuestas de nivel para los pozos C-3, PZ-3, PZ-5 y G-1-17. (Figura 14); se procede a mostrar el correlograma de la combinación de estas series (Figura 45).

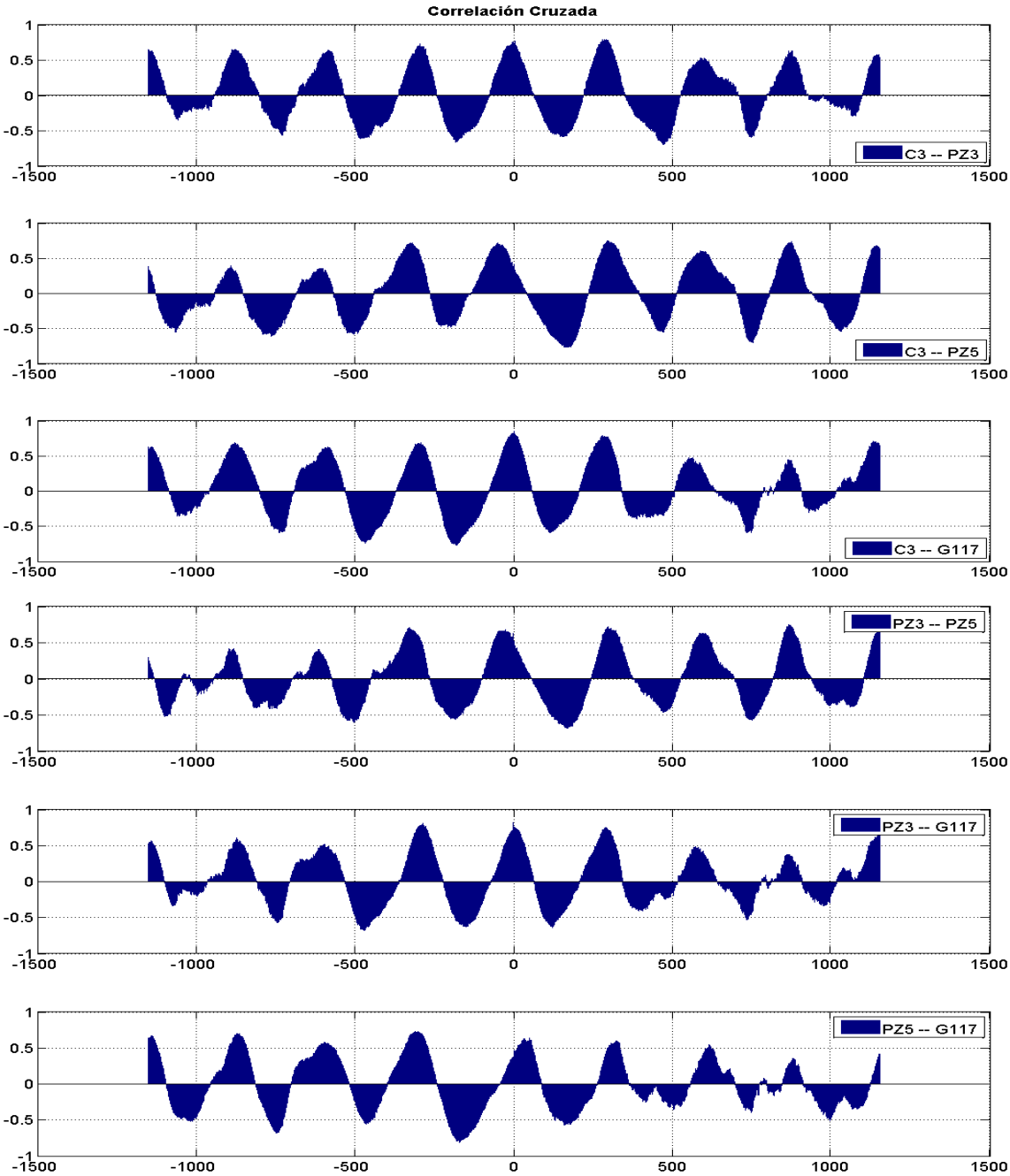

Figura 45. Correlación Cruzada Niveles Piezométricos con respuesta al sismo 24 de Mayo.

IV.3. Mínima Actividad Sísmica.

Una condición interesante a analizar, es el comportamiento del nivel piezométrico bajo estado de mínima actividad sísmica. En base al Momento Sísmico Acumulado (Figura 12), podemos identificar que el año de 2007, es el que presenta la menor actividad sísmica de los años contemplados, por lo que se analizan los registros en el intervalo 22 de Mayo (05:00 pm PST) a 14 de Agosto (01:00 am PST), cubriendo un periodo de 83.3 días de registro continuo.

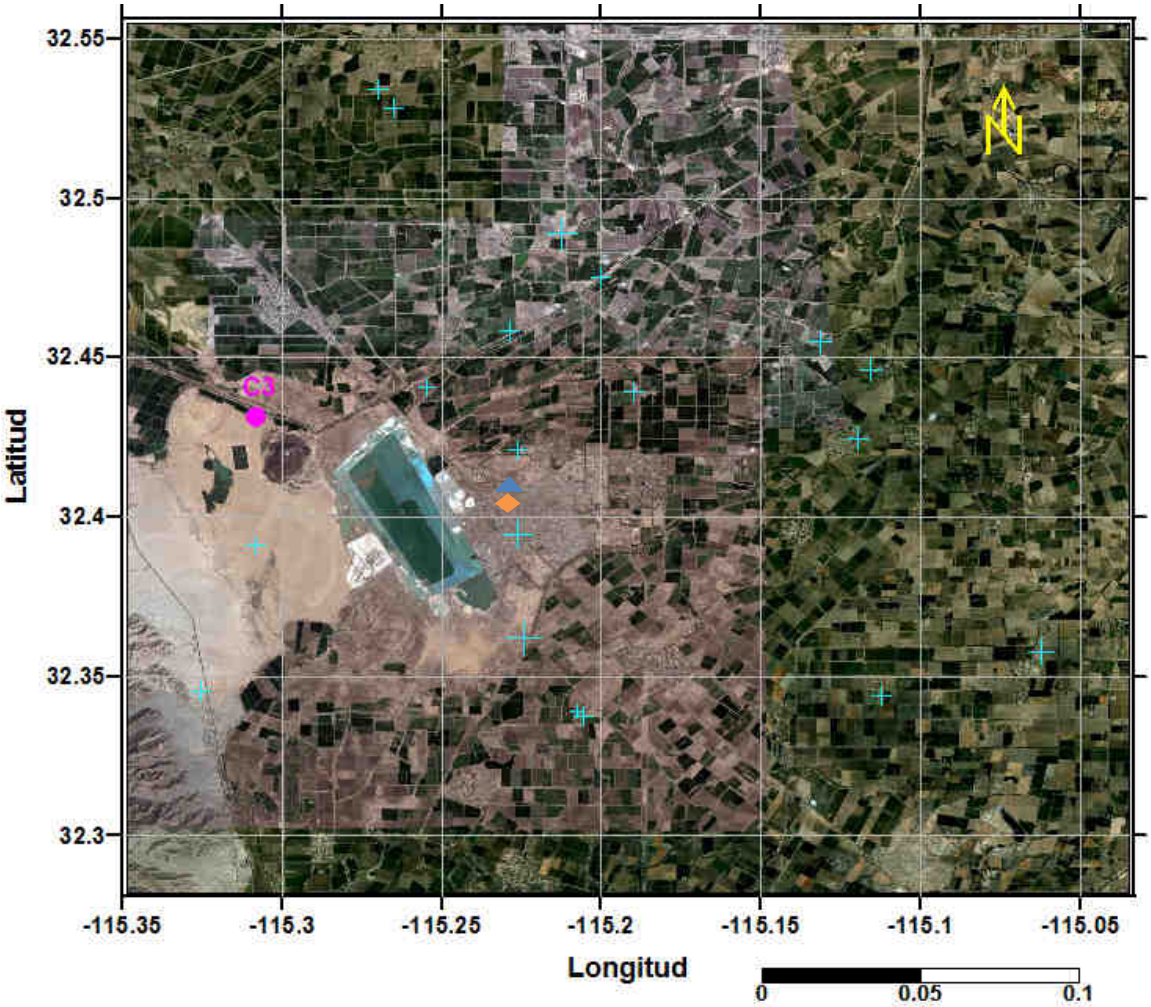

Figura 46. Actividad catálogo USGS-Caltech, piezómetro C-3 con registro (círculo magenta), barómetro en pozo PZ-1 (triangulo azul) y estación gravimétrica (rombo naranja).

Se muestra la ubicación del pozo C-3, siendo el único con registro para el intervalo definido; así como la localización de la actividad sísmica acontecida y que podemos obtener del catálogo de USGS-Caltech (Figura 46).

IV.3.1. Análisis para el pozo C-3.

IV.3.1.1. Nivel Piezométrico.

En la Figura 47 se muestra el registro del nivel piezométrico resultado de la instrumentación con un Levelogger en el pozo C-3, en el intervalo 22 de Mayo a 14 de Agosto de 2007 con un periodo de muestreo de 5 min (24,000 datos).

El autocorrelograma de la serie de nivel piezométrico (Figura 47-b) se puede deducir que hay un efecto de memoria alto de 27.1 días.

Como se hizo mención, el intervalo que se analiza en esta sección corresponde a un periodo donde la actividad sísmica es mínima.

Del registro se obtienen los parámetros estadísticos y se reportan, Tabla IX.

IV.3.1.2. Presión Barométrica.

En la (Figura 44-a) se muestra el registro del barómetro instalado en el pozo PZ-1, ubicado a 7.8 km al SE del pozo C-3, (Figura 48).

Se presentan los parámetros estadísticos básicos del registro, Tabla IX. Mientras que del autocorrelograma (Figura 48-b) se aprecia un mínimo efecto de memoria de 1.3 días y una fuerte periodicidad congruente con el fenómeno.

Se aplicó análisis de Fourier al registro de presión barométrica, el periodograma obtenido (Figura 48-c), muestra que las componentes dominantes son diurnas y semidiurnas a frecuencias de uno y dos ciclos por día y una ligera aportación de un señal con frecuencia de tres ciclos por día puede apreciarse.

Se recuerda que la banda de frecuencias de 0 a 0.5 cpd es causada por fluctuaciones de presión atmosférica aperiódicas, con duraciones de días o semanas.

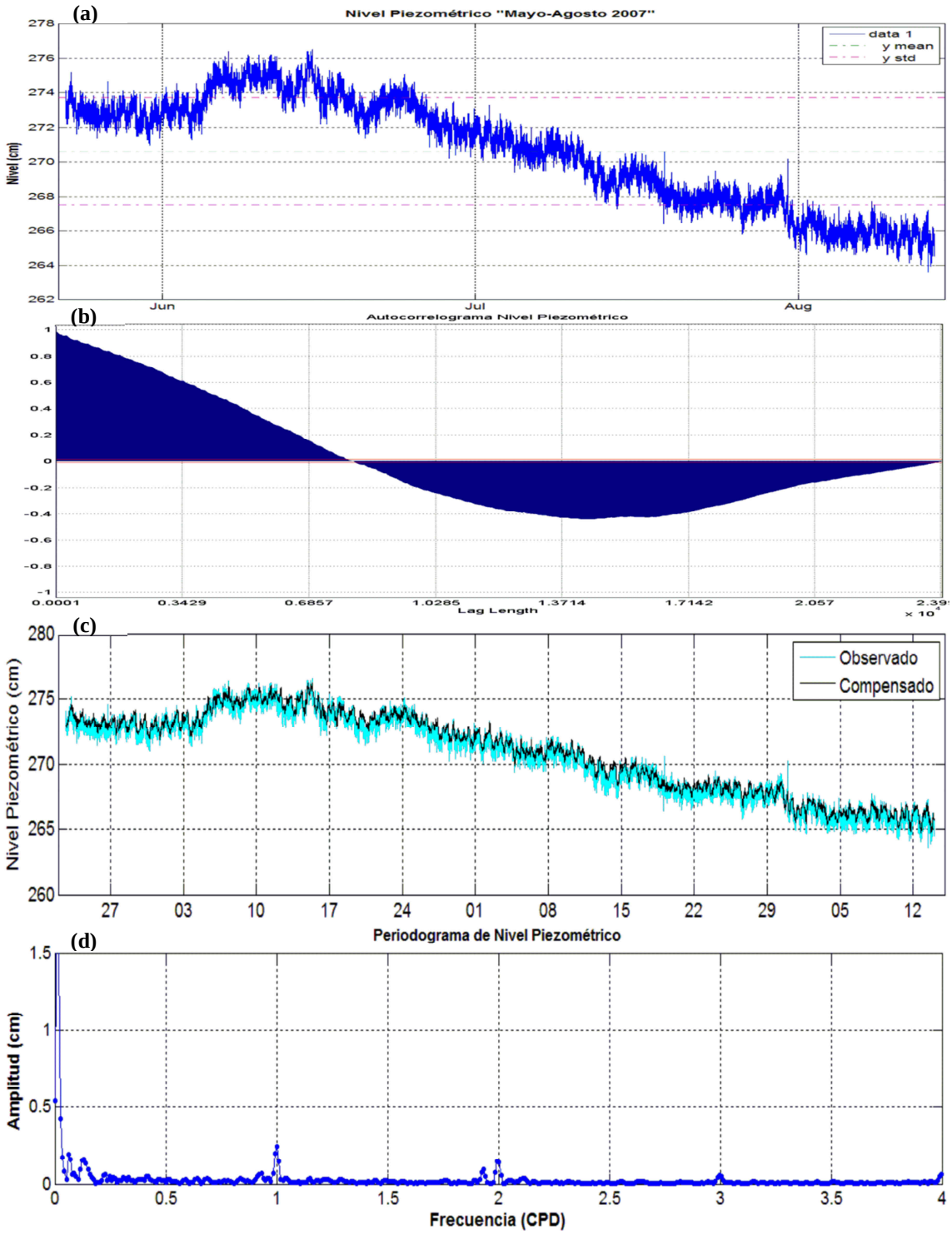

Figura 47. a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma, para pozo C-3. Mayo-Agosto 2007.

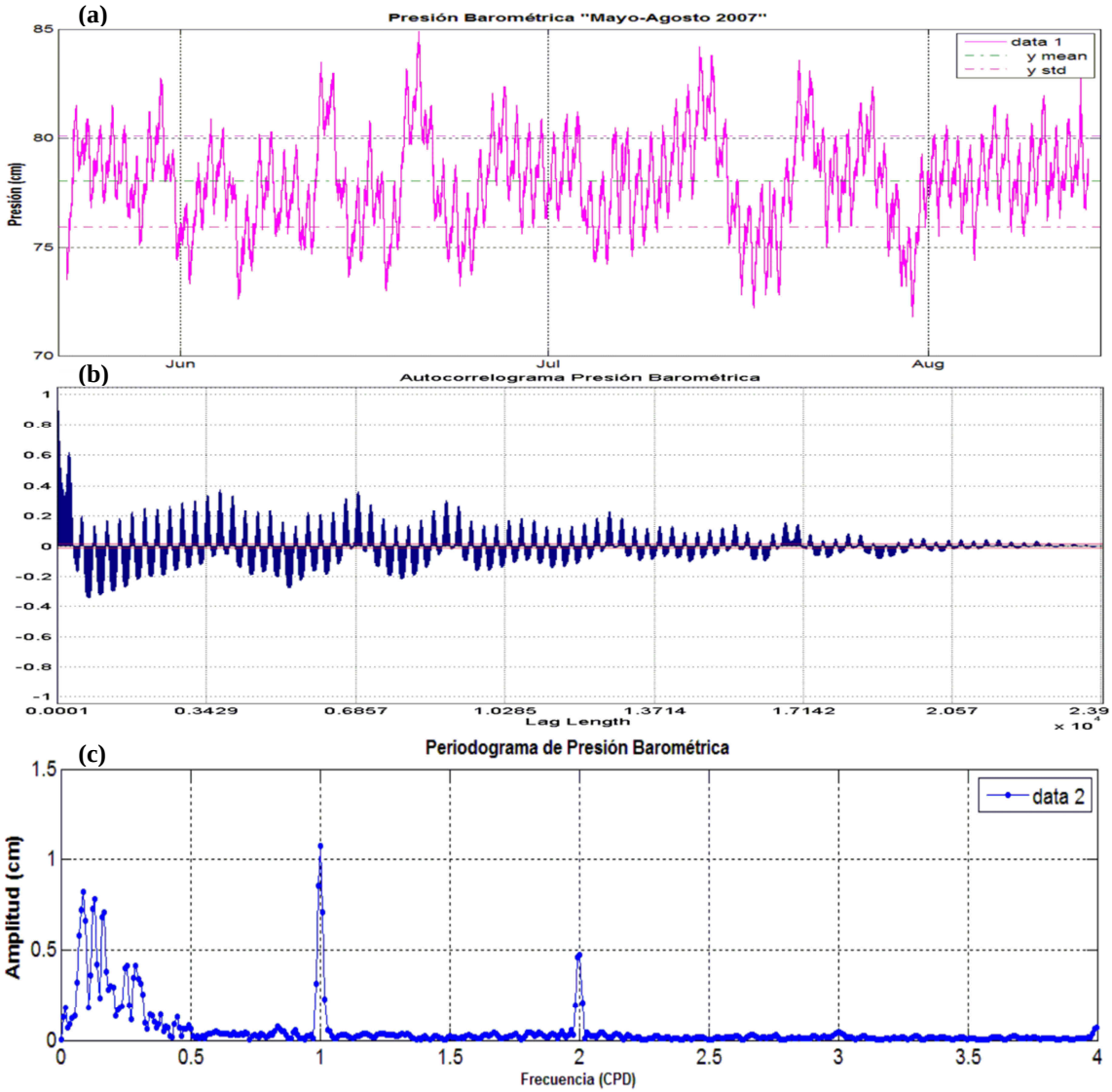

Figura 48. a) Registro de Presión Barométrica, b) Autocorrelograma y c) Periodograma, Barologger instalado en el pozo PZ-1.

IV.3.1.2.1. Respuesta Barométrica.

Se definió en capítulos anteriores, el acuífero superficial en las inmediaciones del CGCP, corresponde a una formación del tipo libre. Lo cual se

corrobora al implementar el método visto (apartado III.1.) gráficos de diagnóstico y que para este intervalo se muestra en la (Figura 49-a).

En la figura, podemos observar el comportamiento esperado de la respuesta barométrica para un acuífero del tipo libre, con una eficiencia barométrica inicial de aproximadamente el 70 % disminuyendo gradualmente a cerca del 10 % tras 30 minutos, es necesario comentar la diferencia en la respuesta de este modelo, donde se aprecia puramente el patrón característico de un acuífero libre, no mostrando una respuesta combinada como las observadas en la sección donde se analizó el sismo del 24 de Mayo de 2006.

Una vez que se conoce el modelo de respuesta se procede a realizar la remoción de los efectos barométricos, mediante el método descrito en el (apartado III.1.4.2), se muestran sobre puestos ambos registros (Figura 49-b); el nivel observado contra el nivel corregido (Figura 45-c), donde se logra eliminar algo de variabilidad y una gran cantidad de ruido presente en la señal original, pero manteniendo la tendencia decreciente (negativa).

A este registro corregido por efectos barométricos, se le aplica análisis de Fourier, para identificar las componentes principales de la señal. El periodograma correspondiente se muestra en la (Figura 47-d).

En este periodograma se puede identificar que las componentes dominantes son las diurnas y semidiurnas, de igual manera observamos una aportación de una componente con frecuencia de tres ciclos por día, y la presencia de la banda de baja frecuencia ubicada al inicio entre 0 y 0.5 ciclos por día, donde se tiene la componente de mayor amplitud, la cual como se mencionó, puede ser la causa de la tendencia decreciente observada en el nivel piezométrico corregido.

Cabe hacer mención que el periodograma (Figura 47-d) esta truncado en el eje de las ordenadas, la máxima amplitud tiene un valor de aproximadamente 2.5 cm y corresponde a una componente ubicada en la banda de baja frecuencia.

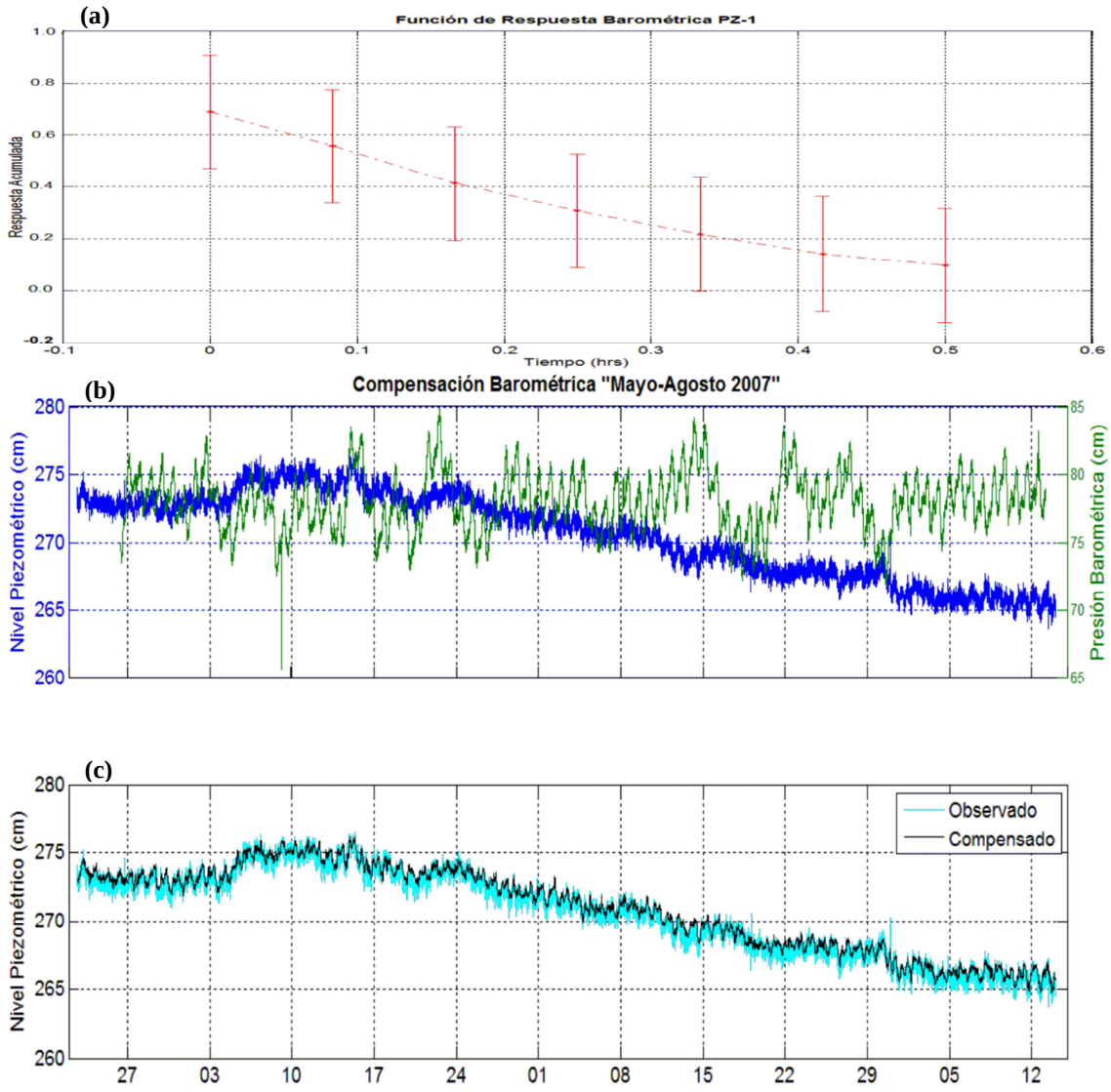

Figura 49. a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (C-3 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado.

IV.3.1.3. Temperatura del agua dentro del pozo C-3.

Se muestra a continuación el registro de temperatura del medidor Levelogger instalado en el pozo C-3, (Figura 50-a). y que tiene características estadísticas mostradas en la Tabla IX.

Se puede observar la mínima variabilidad de este parámetro de aproximadamente 2 décimas de grado dentro del pozo. Del autocorrelograma (Figura 50-b) se distingue un efecto de memoria medio de 19 días.

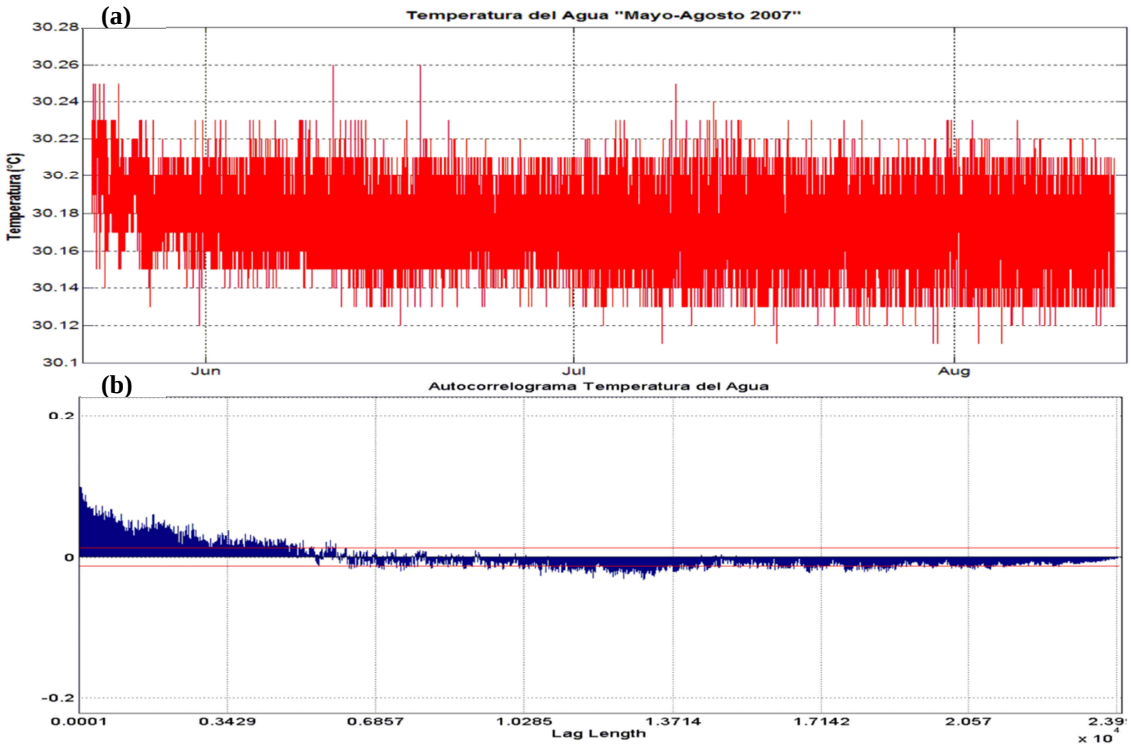

Figura 50. a) Temperatura del Agua, b) Autocorrelograma, pozo C-3. Mayo-Agosto 2007.

IV.3.1.4. Temperatura Superficial.

Se tomó el registro de temperatura de la estación meteorológica automática No. 2033 (PEACC-BC). Y se ajustó a observaciones a cada 5 min (Figura 51-a).

De esta serie de tiempo, si bien la longitud de la observación no permite identificar las tendencias estacionales, si es posible reconocer un incremento en los valores de temperatura hacia el inicio de los meses de verano.

En el autocorrelograma (Figura 51-b) se aprecia claramente la periodicidad que domina al fenómeno.

El periodograma resultante de aplicar análisis de Fourier (Figura 51-c), se puede apreciar la tendencia positiva (aumento) en la temperatura, relaciona con el inicio de los meses de verano (Figura 51-a); se observa que la componente principal y dominante es la diurna (24 h) con una amplitud aproximadamente 10 veces mayor que la componente semidiurna y a cada ocho horas. De igual manera se presenta la banda de baja frecuencia con componentes de menor amplitud.

Esta estación meteorológica reporta precipitación cero para el intervalo.

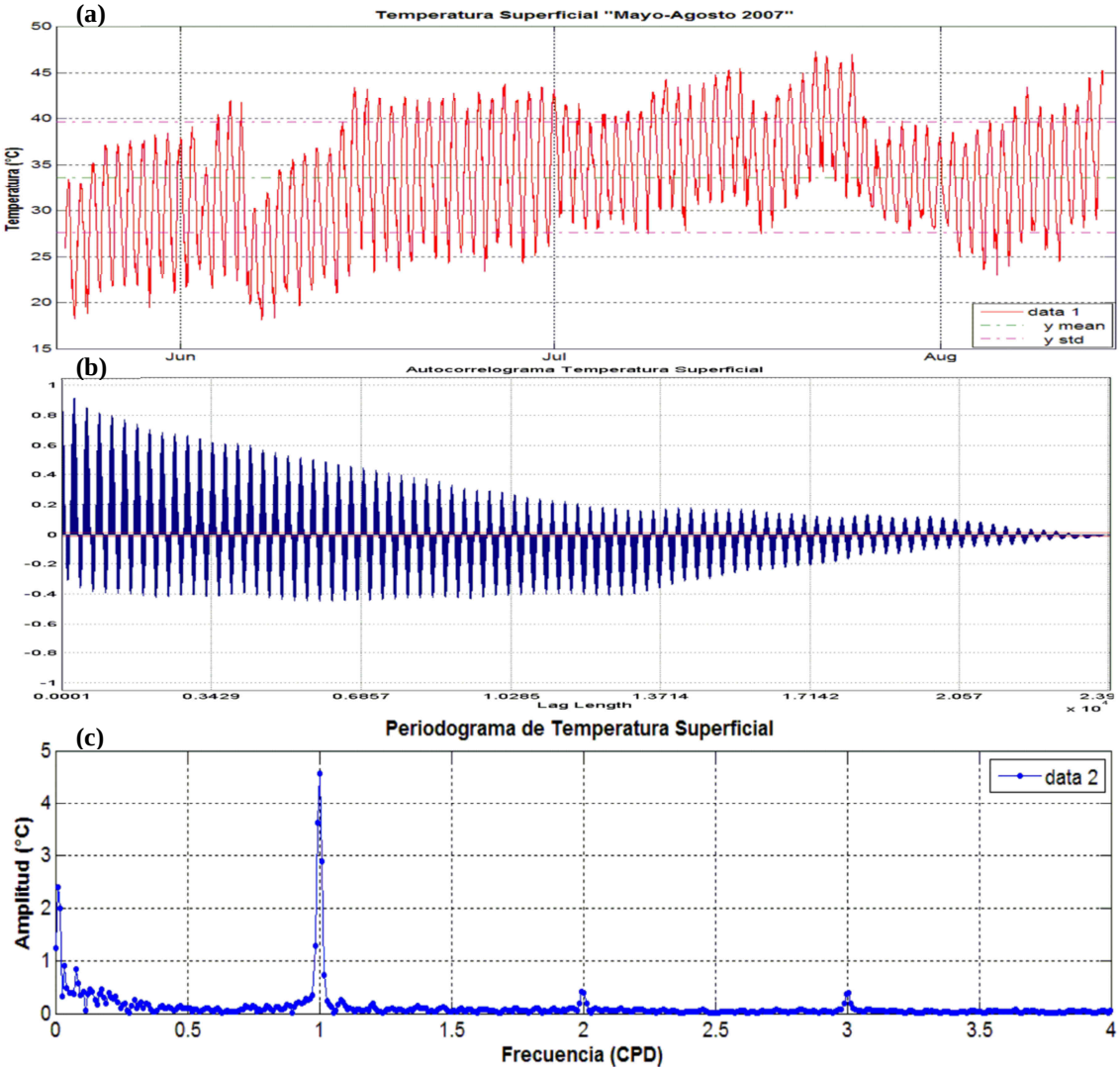

Figura 51. a) Registro de Temperatura Superficial, b) Autocorrelograma, c) Periodograma de la estación meteorológica No. 2033. Mayo-Agosto 2007.

IV.3.1.5. Marea Gravitacional Teórica.

Del análisis de las componentes de la marea gravitacional se conoce con gran precisión los periodos que componen la marea calculada en cada sitio, siendo la amplitud la única variable; debido a la superficie que se considera, el análisis realizado (apartado IV.2.1.6.) donde se tomó en cuenta la marea gravitacional a lo largo del periodo 2003-2008, la identificación de las componentes es válida para esta sección y mostrando el comportamiento ilustrado (Figura 52).

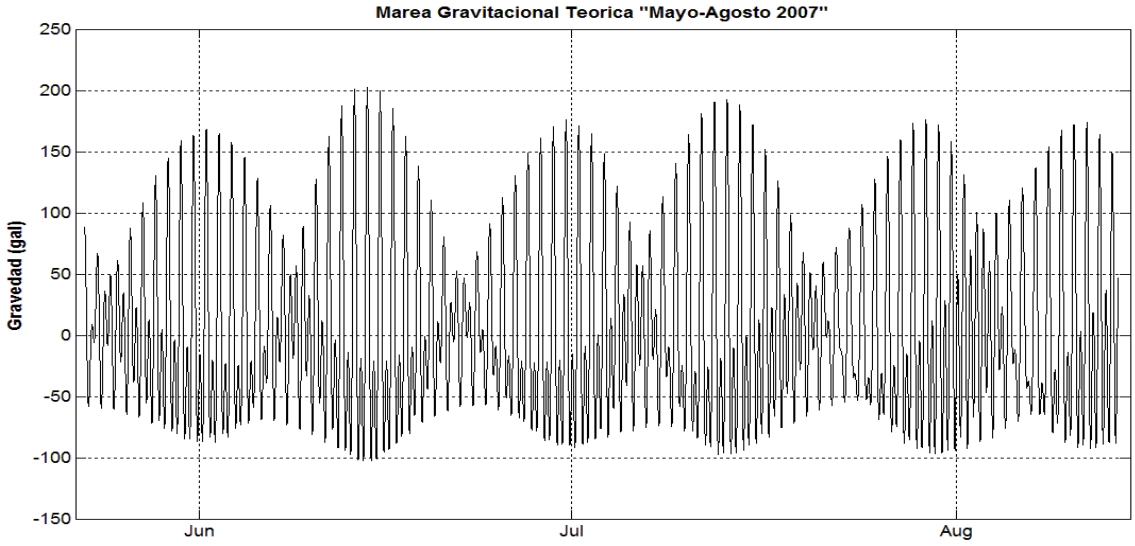

Figura 52. Calculo de la Marea Gravitacional Teórica, para la estación No. 10 (Chase, 1978), con el software Tides (Ahern, 1993). Mayo-Agosto 2007.

IV.3.1.6. Actividad Sísmica.

La distribución espacial de la actividad sísmica que se presentó en el intervalo 22 de mayo al 14 de agosto de 2007 se muestra (Figura 46). A continuación se presenta un gráfico con la distribución temporal de los eventos sísmicos registrados en el catálogo de USGS-Caltech, reportados con sus magnitudes locales, (Figura 53).

La actividad sísmica acontecida los días 1° de Junio (3.3 Ml) y 3 de Junio (3.1 Ml), representan los eventos más significativos del intervalo de estudio. Se observa que tanto la cantidad y magnitud de los eventos, es inferior respecto a la que se observa en los escenarios de estudio (evento principal y enjambre).

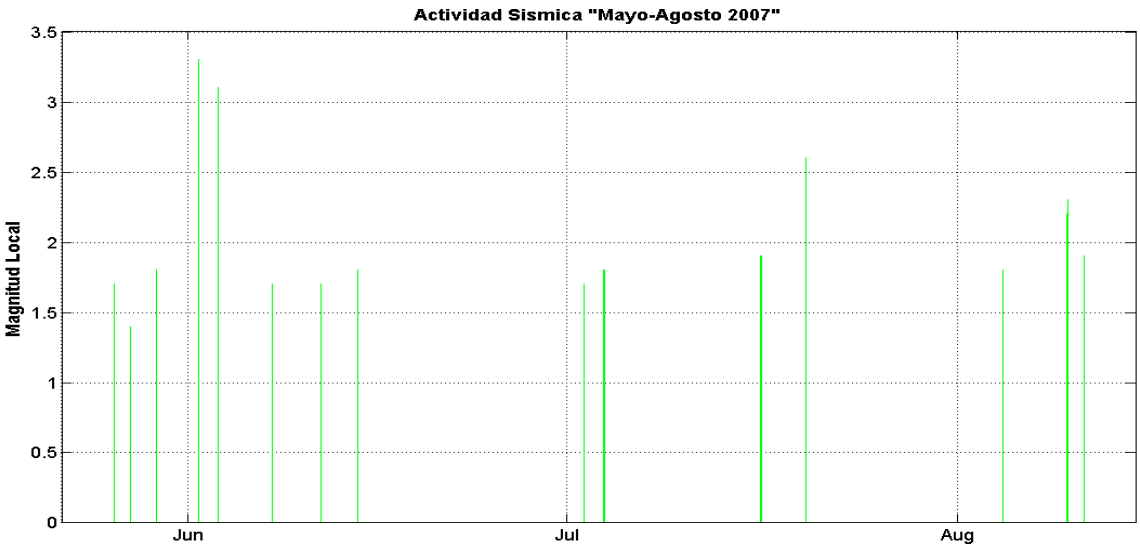

Figura 53. Distribución Temporal, de la actividad sísmica con magnitudes locales reportada en el catálogo USGS-Caltech. Mayo-Agosto 2007.

IV.3.1.7. Resumen de Parámetros Estadísticos.

El índice de relación lineal que pudiera existir entre dos de las variables analizadas, se mide con el coeficiente de correlación de Pearson. A continuación se presenta un resumen de las estadísticas básicas de las series, características del análisis espectral. Tabla IX y los histogramas de distribución (Figura 54).

Se realizó un análisis de correlación cruzada para las series consideradas (Figura 55), siendo las correlaciones máximas: WL-BP (-0.731 a -16.8 h (-202)), WL-G (-0.710 a -72.2 h (-866)), WL-T. Agua (0.240 a 35.5 h (426)), WL-T. Superficial (0.785 a -18.4 h (-221)).

Tabla IX. Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo C-3. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).

Var	Promedio	Mediana	Moda	STD	Rango	NP	PB	TA	TS
NP	270.6	271.3	273.0	3.1	12.8	*1*	*-0.08*	*0.16*	*-0.35*
BP	78.1	78.0	77.6	2.1	13.1	*-0.08*	*1*	*-0.01*	*-0.25*
TA	30.2	30.2	30.2	0.02	0.15	*0.16*	*-0.01*	*1*	*-0.11*
TS	33.6	33.7	37.1	5.9	29.9	*-0.35*	*-0.25*	*-0.11*	*1*

Señal	Frecuencia (CPD)	Periodo (h)	Amplitud	Nombre
Nivel Piezométrico	1.002	23.529	0.240	Diurna
	1.925	12.467	0.076	
	1.995	12.030	0.147	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.055	----
Presión Barométrica	1.002	23.529	1.072	Diurna
	1.995	12.030	0.461	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.045	----
Temperatura Superficial	1.002	23.529	4.577	Diurna
	1.995	12.030	0.408	Semi-Diurna
	2.997	8.008	0.373	----
Gravedad Teórica	1.002	23.529	44.010	K1
	2.000	12.000	13.850	S2

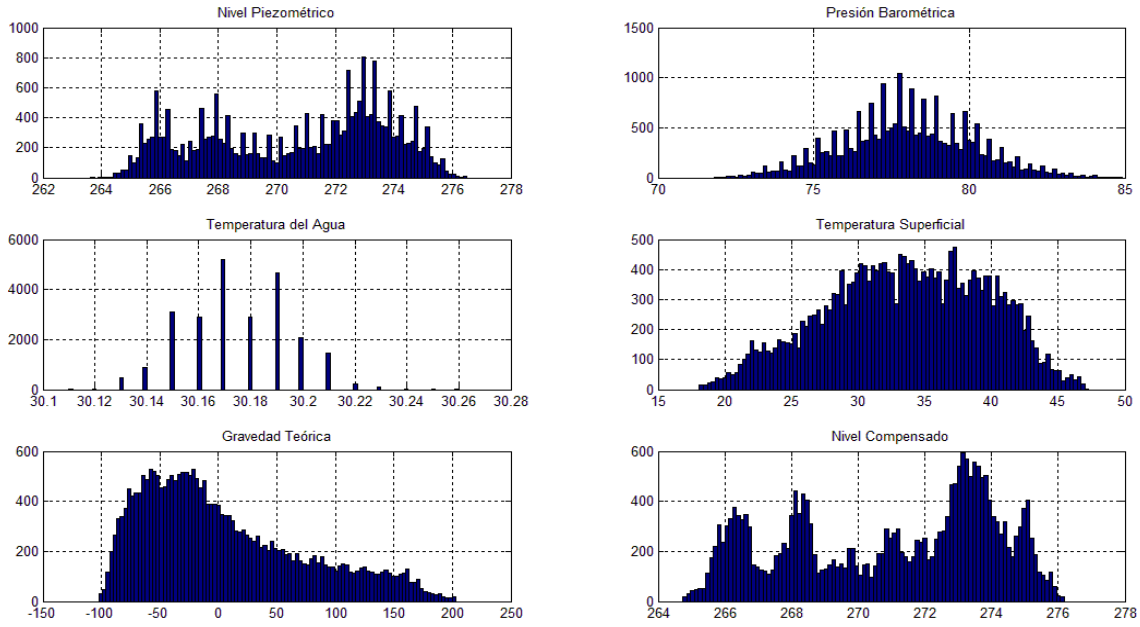

Figura 54. Histogramas de distribución para las series analizadas. C-3, Mayo-Agosto 2007

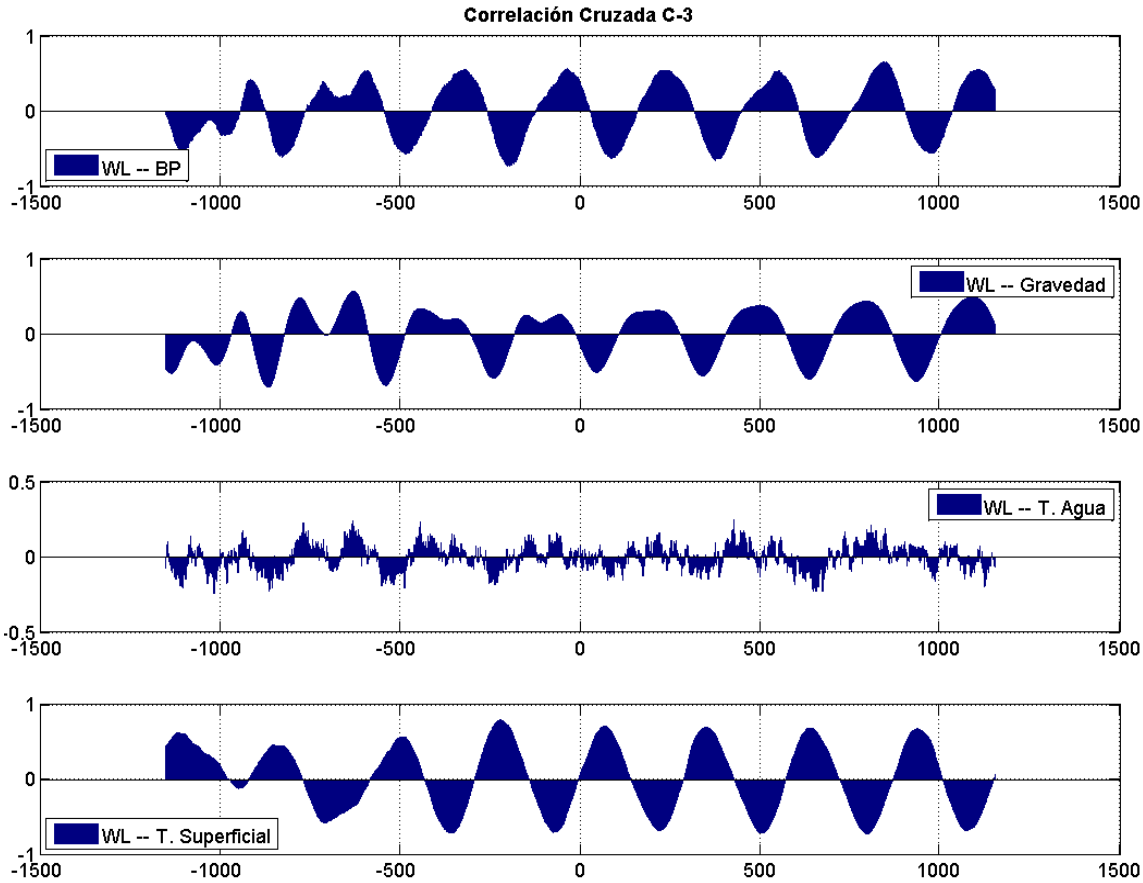

Figura 55 Correlación Cruzada de las series de tiempo intervalo de mínima actividad.

IV.3.1.8. Filtrado de Nivel Piezométrico.

Debido a las características de los periodógramas, resulta de interés analizar la banda central (0.5 a 6 cpd), por lo que se aplica en primer lugar un Filtro Pasa Banda, con frecuencia central (F_C=3 cpd) y un ancho de banda (F_W=6 cpd) con la intención de reconstruir la señal con las componentes de la banda central, y eliminar las componentes de baja y alta frecuencia; pero debido a las características del filtro aplicado, se implementó después un Filtro Pasa Altas con frecuencia central (F_C=0.5 cpd) y un ancho de banda (F_W=0.1 cpd) buscando eliminar las componentes de baja frecuencia que permanecieron después del primer filtro. Se puede apreciar que hay buena reconstrucción de la señal

considerando solo las componentes de la banda central de frecuencias (Figura 56-b), y que como se mencionó debido al fenómeno de fuga de frecuencias que se presenta al aplicar un filtro pasa banda, se recurrió a un filtro pasa altas (Figura 56-c), y se reconstruye la señal principalmente con las componentes de la banda central (diurnas y semidiurnas); como se mencionó, la actividad sísmica en este periodo es mínima, se aprecia la señal que se espera observar bajo condiciones de solo influencia de componentes barométricos, gravitacionales y de temperatura.

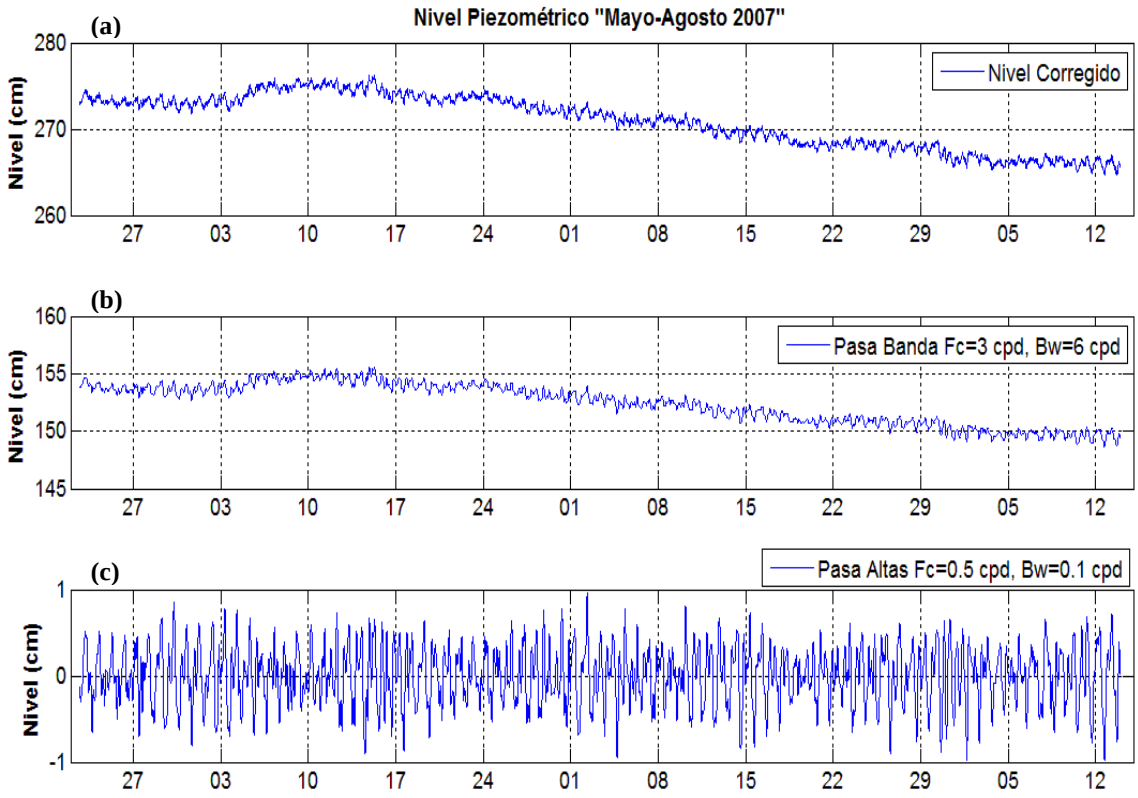

Figura 56. a) Nivel Piezométrico Compensado C-3, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas).

IV.4. Enjambré de Actividad Sísmica.

Una condición más a analizar, es el comportamiento del nivel piezométrico bajo influencia de un enjambré de actividad sísmica. En base al Momento Sísmico Acumulado (Figura 12), podemos identificar en Febrero del año 2008, la presencia de un enjambré de sismos (~ 550 eventos), por lo que se analizan los registros en el intervalo 1 de Febrero (00:00 am PST) a 15 de Febrero (00:00 am PST), cubriendo un periodo de 14 días de registro continuo.

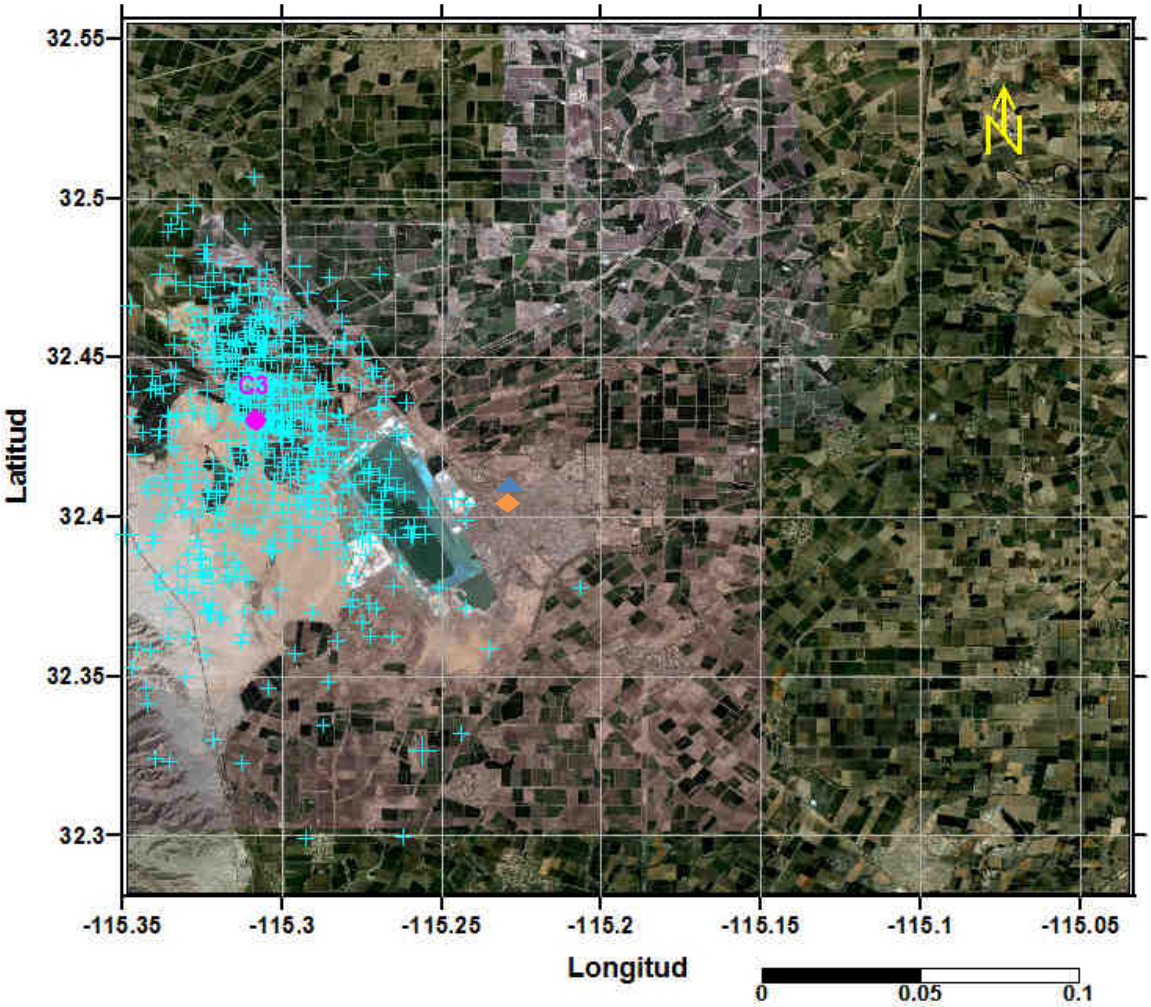

Figura 57. Actividad catálogo USGS-Caltech, piezómetro C-3 con registro (círculo magenta), barómetro en pozo PZ-1 (triangulo azul) y estación gravimétrica (rombo naranja).

Se muestra la ubicación del pozo C-3 (Figura 57), contando con registro para el intervalo definido; así como localización de los epicentros de la sismicidad reportada por el catálogo de USGS-Caltech.

IV.4.1. Análisis para el pozo C-3.

IV.4.1.1. Nivel Piezométrico.

El registro del nivel piezométrico resultado de la instrumentación con un medidor de nivel de registro continuo en el pozo C-3, en el intervalo 1 a 15 de Febrero de 2008 con un periodo de muestreo de 5 min (4,032 datos), (Figura 58-a)

En el grafico podemos observar un comportamiento periódico hasta antes del día 9 donde inicia la actividad sísmica importante, siendo hasta el día 13 donde se retoma el comportamiento visto previamente. Los parámetros estadísticos de esta serie se mencionan en Tabla X. Del autocorrelograma (Figura 58-b) se determina un efecto de memoria medio de 5.2 días.

IV.4.1.2. Presión Barométrica.

Se muestra el registro de presión barométrica (Figura 59-a) medida en el pozo PZ-1, ubicado a 7.8 km al SE del pozo C-3 (Figura 57). Las estadísticas básicas de este registro se reportan en Tabla X.

La técnica de autocorrelación para medir patrones en la serie se implementó en la representación gráfica (Figura 59-b), se puede observar un efecto de memoria corto de 1.6 días.

Se aplicó análisis de Fourier al registro de presión barométrica, el periodograma (Figura 59-c), muestra que las componentes dominantes son diurnas y semidiurnas a frecuencias de uno y dos ciclos por día y una ligera aportación de una componente con frecuencia cercana a tres ciclos por día, dentro de la banda de baja frecuencia se tiene una componente con una amplitud de (~ 4 cm) la cual puede ser la responsable de la ligera tendencia.

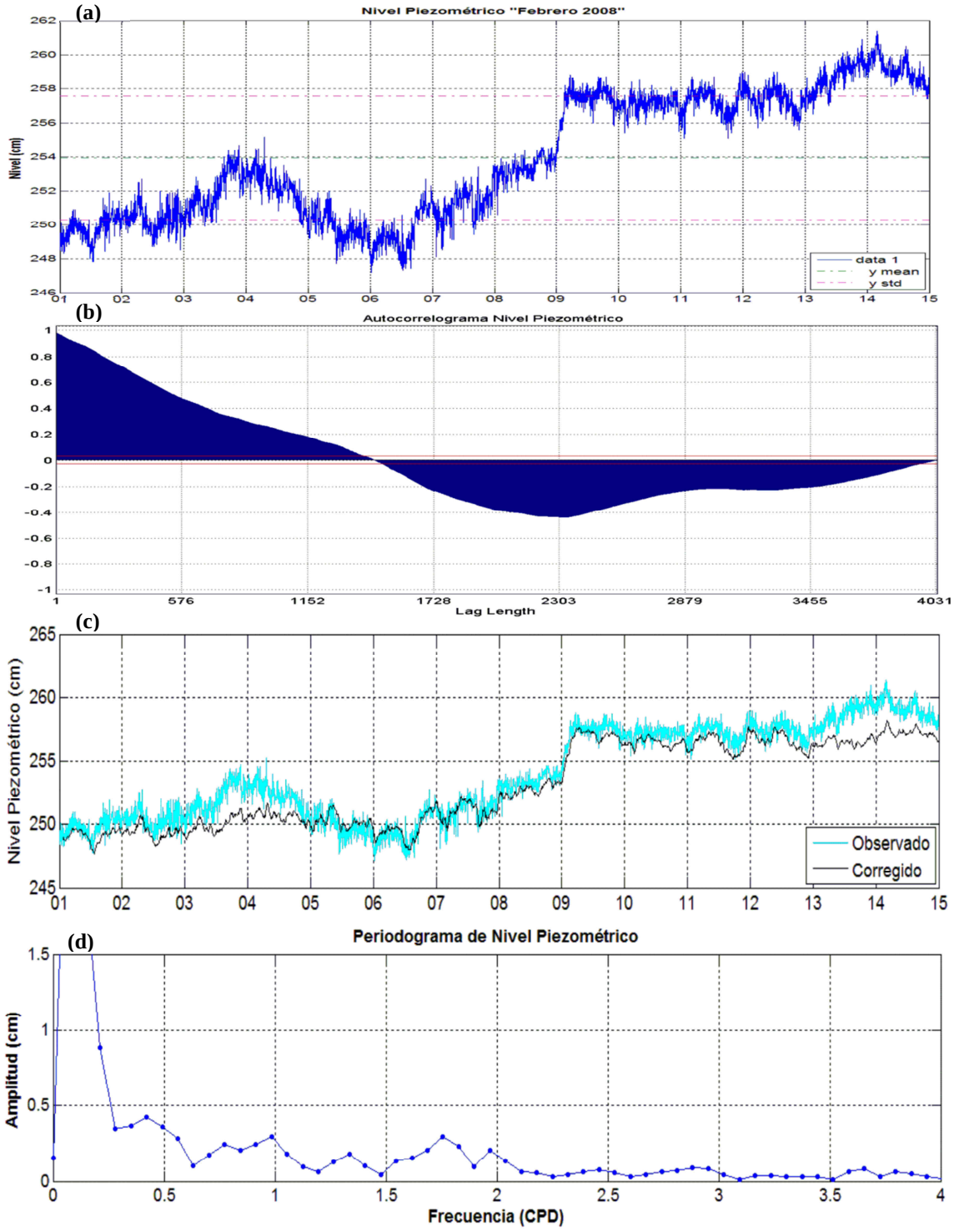

Figura 58. a) Nivel Piezométrico, b) Autocorrelograma, c) Nivel Piezométrico Compensado, d) Periodograma, para pozo C-3. Febrero 2008.

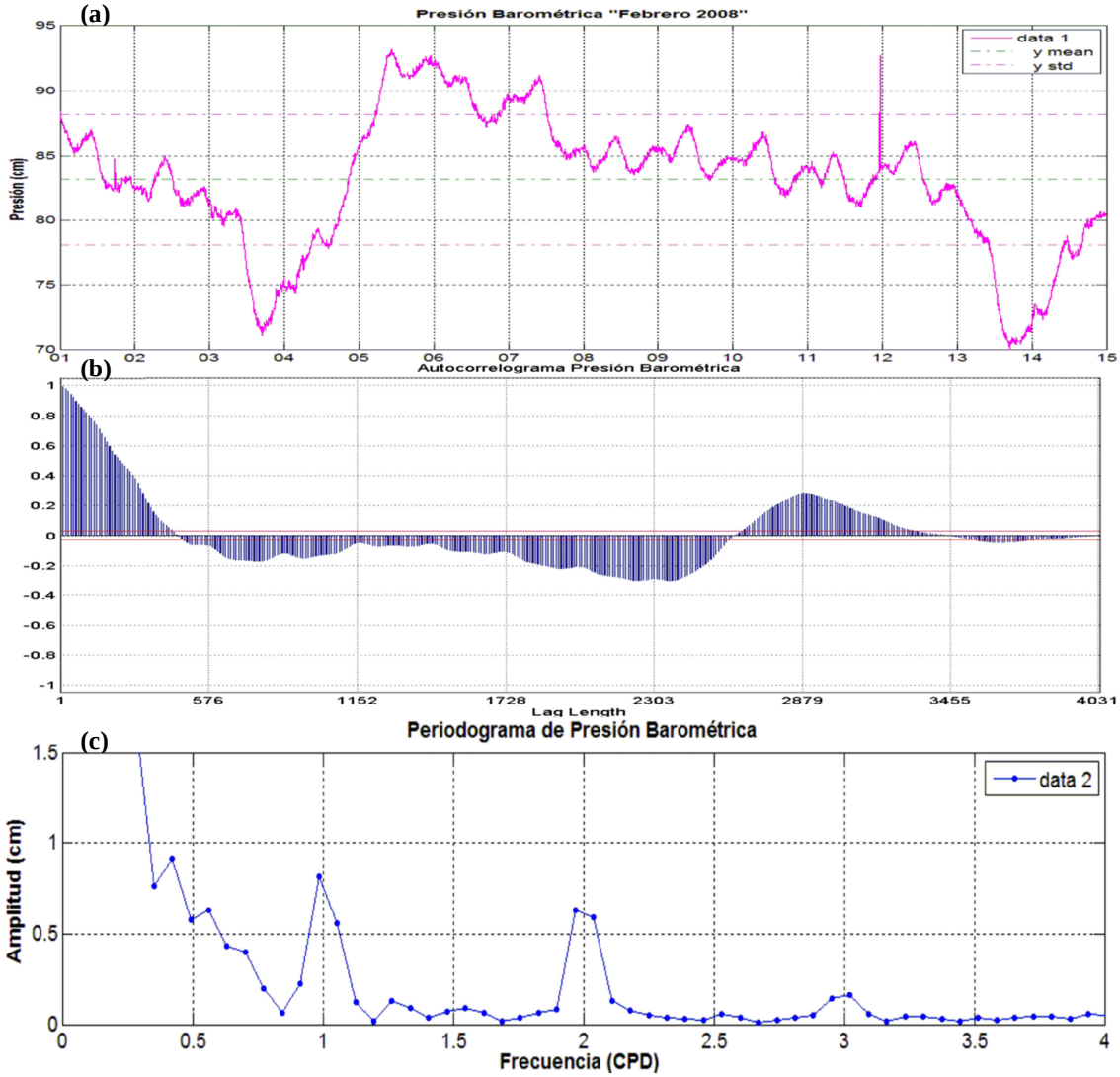

Figura 59. a) Registro de Presión Barométrica, b) Autocorrelograma y c) Periodograma, Barologger instalado en el pozo PZ-1.

IV.4.1.2.1. Respuesta Barométrica.

Después de implementar el método descrito (apartado III.1.) con base en gráficos de diagnóstico, para este intervalo podemos observar el comportamiento de la respuesta barométrica para un acuífero del tipo libre (Figura 60-a), con una eficiencia barométrica inicial de 45 % disminuyendo a 20 % tras 30 minutos.

Una vez que se conoce el modelo de respuesta se procede a realizar la remoción de los efectos barométricos, mediante el método descrito (apartado III.1.4.2.) y que el resultado de la corrección es mostrado (Figura 60-c).

Se muestran sobre puestos ambos registros, tanto de presión barométrica como de nivel observados (Figura 60-b); mientras que el nivel observado contra el nivel corregido (Figura 60-c), donde se logra eliminar con la técnica empleada algo de la variabilidad observada y una gran cantidad de ruido presente en la señal original, pero manteniendo la tendencia creciente (positiva), la cual como se mencionó en secciones anteriores, puede estar relacionada con alguna de las componentes de la banda de baja frecuencia.

En el periodograma resultado de aplicar análisis de Fourier al registro corregido (Figura 58-d), se puede identificar que la componente dominante se encuentra en la banda de baja frecuencia, con una amplitud de aproximadamente 4 cm, posiblemente relacionada con la tendencia positiva mostrada en la señal; identificándose ligeramente las componentes diurnas y semidiurnas, No se logra distinguir la componente con periodo cercano a ocho horas.

IV.4.1.3. Temperatura del agua dentro del pozo C-3.

Registro de temperatura del Levelogger instalado en pozo C-3, (Figura 61-a), los parámetros estadísticos de muestran en Tabla X. Y del autocorrelograma (Figura 61-b) se distingue un efecto de respuesta medio de cerca de 4.4 días.

IV.4.1.4. Temperatura Superficial.

Se tomó el registro de temperatura de la estación meteorológica automática No. 2033 (PEACC-BC). Ajustándose a observaciones discretas a cada 5 min (Figura 62). De esta serie de tiempo, debido a la longitud de la observación no permite identificar las tendencias estacionales, pero si la periodicidad diaria.

Donde dicha periodicidad puede ser corroborada al observar el autocorrelograma (Figura 62-b). Y estadísticas enlistadas en Tabla X.

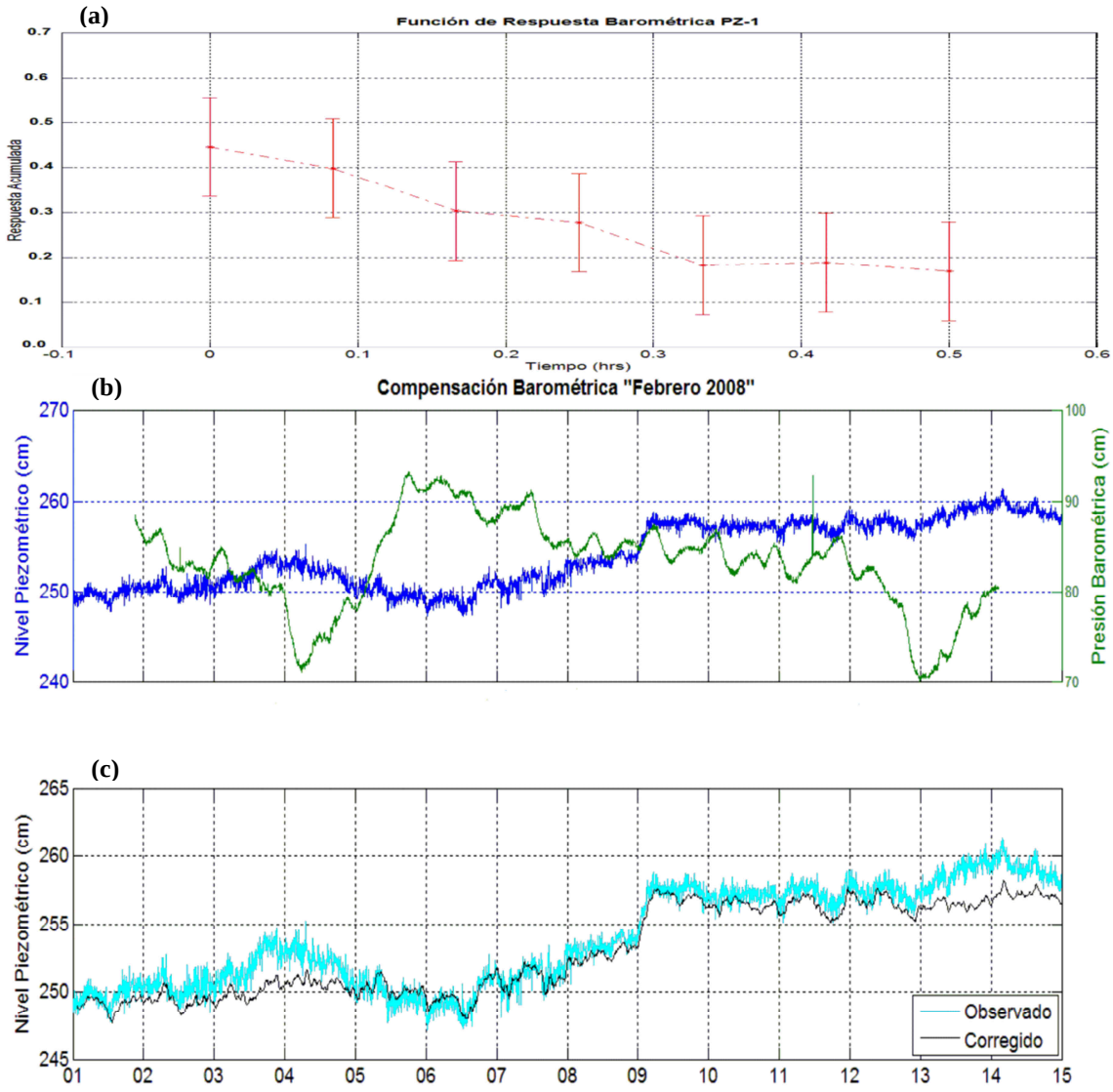

Figura 60. a) Función de Respuesta Barométrica del Pozo (C-3 -- PZ-1), b) Comparativa Nivel Piezométrico vs Presión Barométrica, c) Nivel Piezométrico Compensado.

El periodograma resultante de aplicar análisis de Fourier al registro de temperatura superficial, (Figura 62-c), se puede ver en primera instancia la tendencia positiva (aumento) en la temperatura, que como se comentó se relaciona con el incremento hacia el inicio de los meses de verano (Figura 57-a).

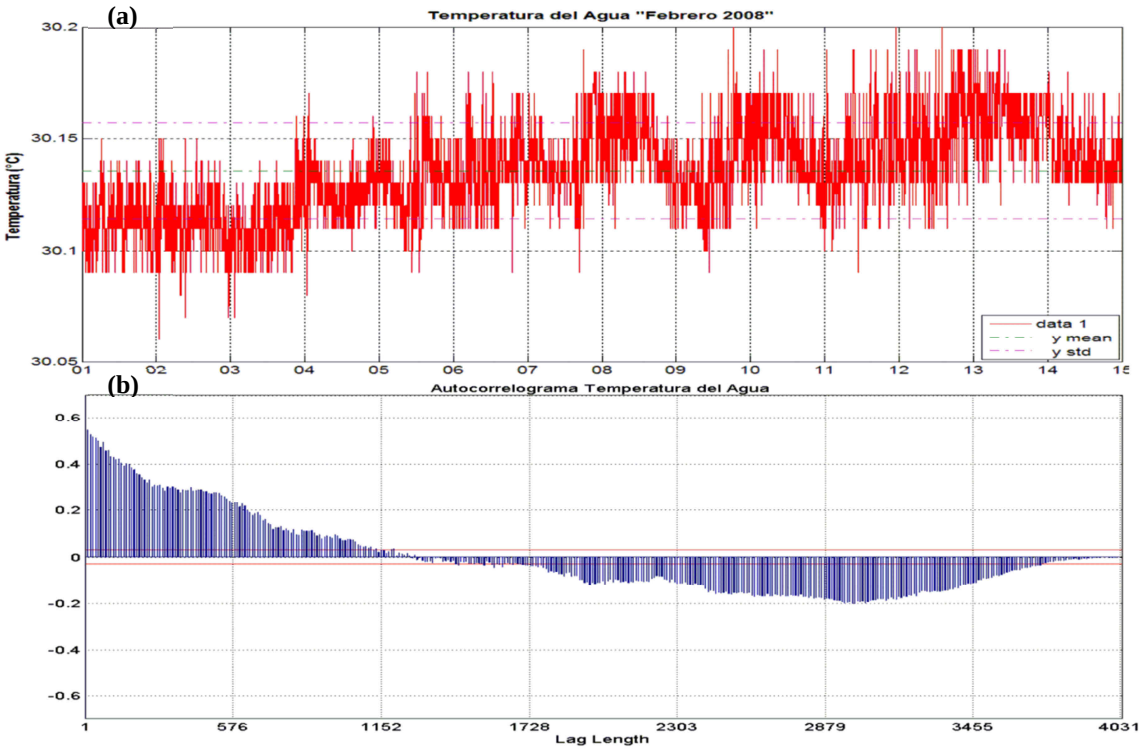

Figura 61. a) Temperatura del Agua, b) Autocorrelograma, pozo C-3. Febrero 2008.

Se observa que la componente principal y dominante es la diurna (24 h) con una amplitud aproximadamente 10 veces mayor que la componente semidiurna y que la componente con frecuencia cercana a ocho horas.

IV.4.1.5. Marea Gravitacional Teórica.

El análisis realizado (apartado III.2.1.6.) donde se tomó en cuenta la marea gravitacional a lo largo del periodo 2003-2008, la identificación de las componentes es válida para esta sección, ya que como se mencionó, los periodos de las componentes se mantienen constantes; mientras que la amplitud es la que varía de sitio a sitio, pero debido a la superficie de interés, también se puede considerar constante, y presentando para este intervalo de 15 días, el siguiente comportamiento (Figura 63).

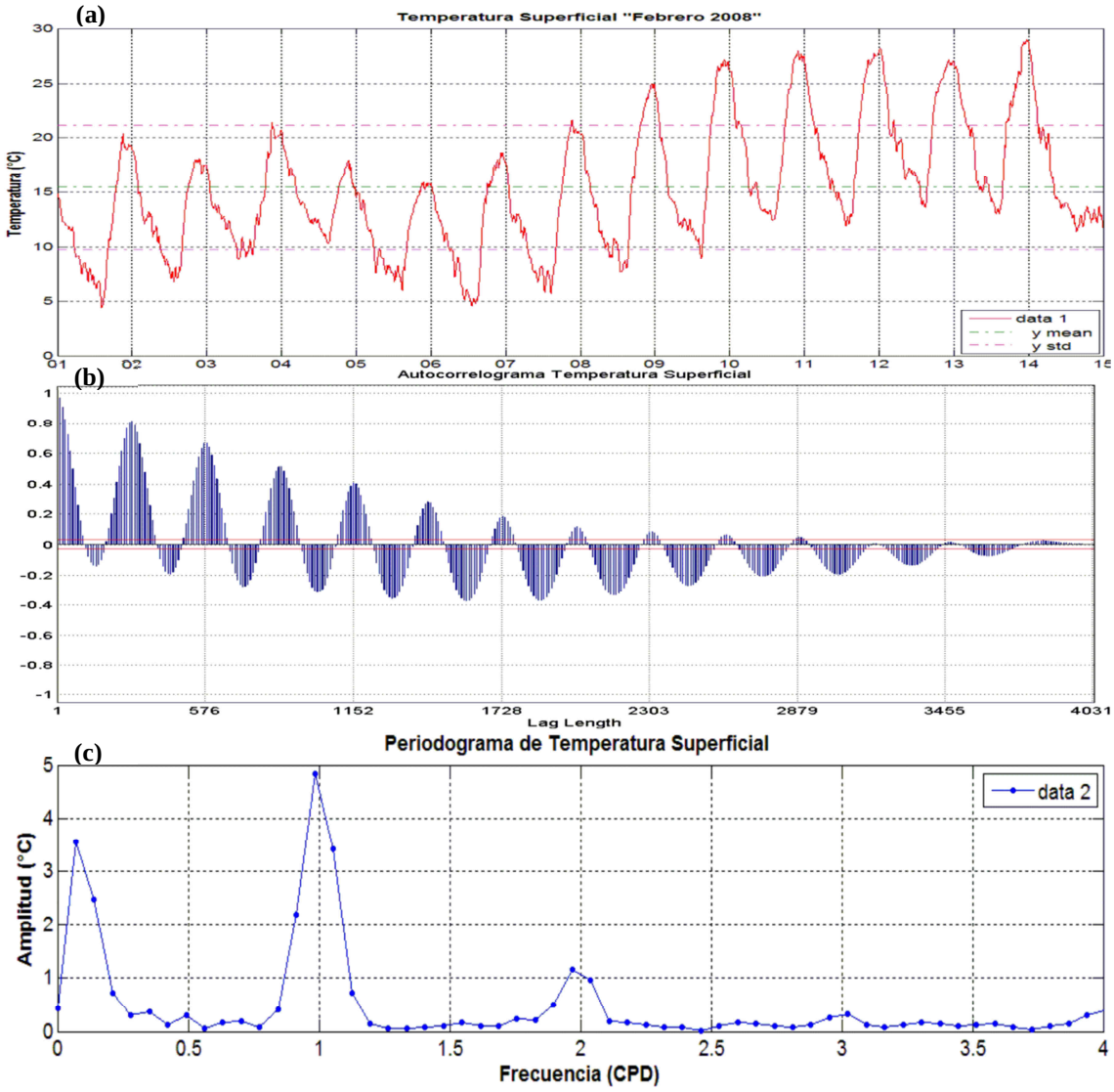

Figura 62. a) Registro de Temperatura Superficial, b) Autocorrelograma, c) Periodograma de la estación meteorológica No. 2033. Febrero 2008.

IV.4.1.6. Actividad Sísmica.

La distribución espacial de la actividad sísmica (enjambre) que se presentó entre el 1 y 15 de febrero de 2008, se mostró en la (Figura 57). A continuación se presenta un gráfico con la distribución temporal de los eventos sísmicos reportados en el catálogo de USGS-Caltech, con magnitudes locales, (Figura 64).

Se observa el fenómeno de enjambre que inició el día 9 de Febrero, donde el catálogo de USGS-Caltech reporta 554 eventos la mayoría con magnitud local por debajo de 3, un par de eventos con magnitud local arriba de 4 Ml (12 de febrero) y un evento por encima de la magnitud local 5 Ml (11 de febrero).

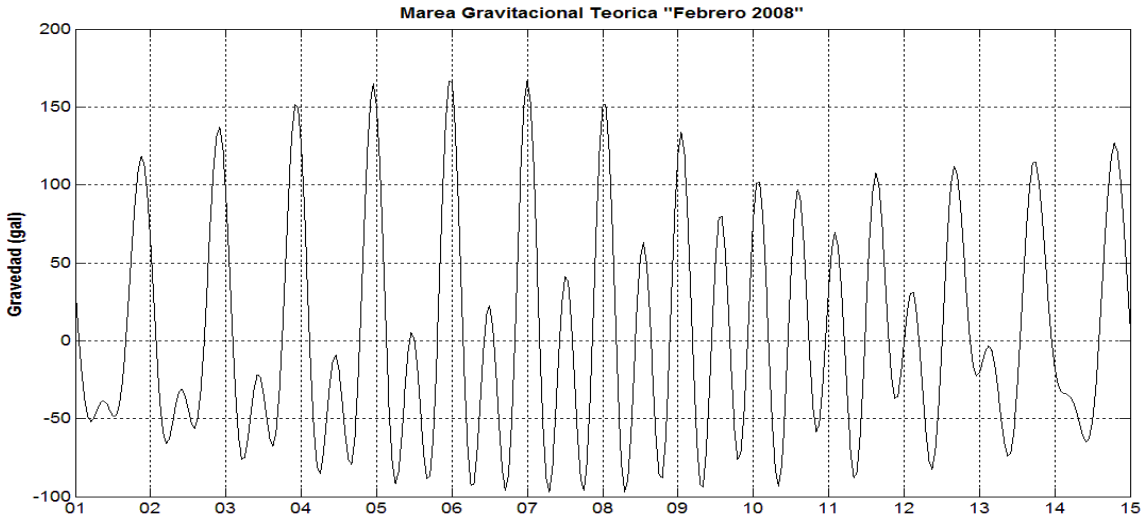

Figura 63. Calculo de la Marea Gravitacional Teórica, para la estación No. 10 (Chase, 1978), con el software Tides (Ahern, 1993). Febrero de 2008.

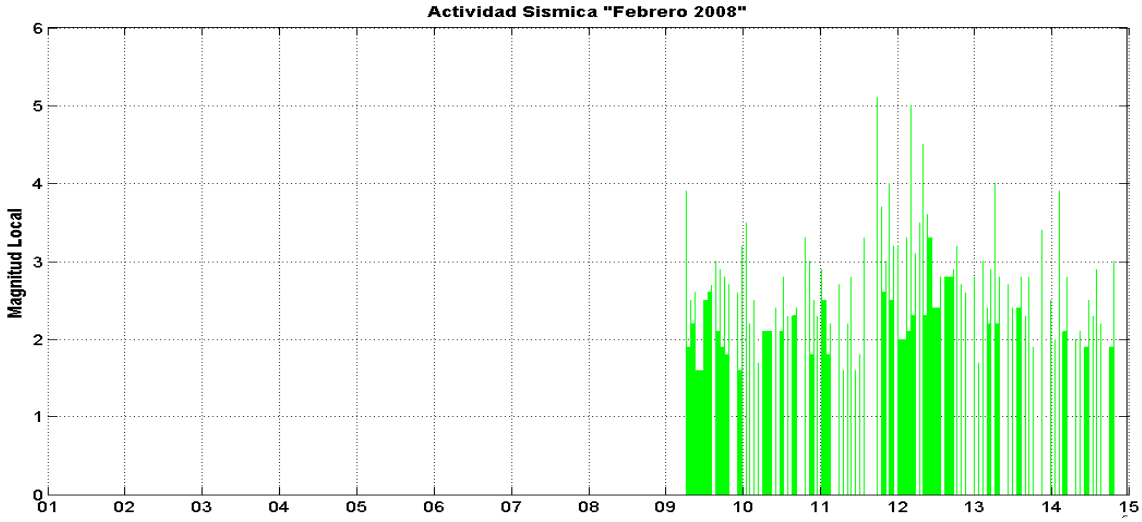

Figura 64. Distribución Temporal, de la actividad sísmica con magnitudes locales reportada en el catálogo USGS-Caltech. Febrero 2008.

IV.4.1.7. Resumen de Parámetros Estadísticos.

Se presenta un resumen de las estadísticas básicas de las series, Tabla X. Y características generales observadas en los espectros; mientras que los histogramas de distribución para las variables analizadas en esta sección son mostrados (Figura 65). Y el resultado del análisis de correlación cruzada entre las variables de estudio, (Figura 66).

Tabla X. Resumen de Estadísticas de las Series para el pozo C-3. (NP=Nivel Piezométrico, PB=Presión Barométrica, TA=Temperatura del Agua, TS=Temperatura Superficial).

Var	Promedio	Mediana	Moda	STD	Rango	NP	PB	TA	TS
NP	253.9	253.2	257.3	3.6	14.2	*1*	*-0.49*	*0.46*	*0.55*
BP	83.1	83.8	85.5	5.1	23.2	*-0.49*	*1*	*-0.04*	*-0.30*
TA	30.1	30.1	30.1	0.02	0.14	*0.46*	*0.04*	*1*	*0.33*
TS	15.4	14.4	12.5	5.6	24.6	*0.55*	*-0.31*	*0.33*	*1*

Señal	Frecuencia (CPD)	Periodo (h)	Amplitud	Nombre
Nivel Piezométrico	0.984	24.379	0.289	----
	1.758	13.652	0.289	-----
	1.969	12.189	0.203	----
	2.953	8.127	0.078	----
Presión Barométrica	0.984	24.379	0.815	----
	1.969	12.189	0.632	----
	2.953	8.127	0.142	----
Temperatura Superficial	0.984	24.379	4.828	----
	1.969	12.189	1.155	----
	2.953	8.127	0.248	----
Gravedad Teórica	1.002	23.529	35.010	K1
	2.000	12.000	66.200	S2

Del análisis de correlación cruzada realizado, se mencionan las correlaciones máximas observadas (Figura 66): WL-BP (0.865 a -28.4 h (-341)), WL-G (0.765 a 60.5 h (726)), WL-T. Agua (0.470 a 4.2 h (50)), WL-T. Superficial (-0.820 a -27.2 h (-326)).

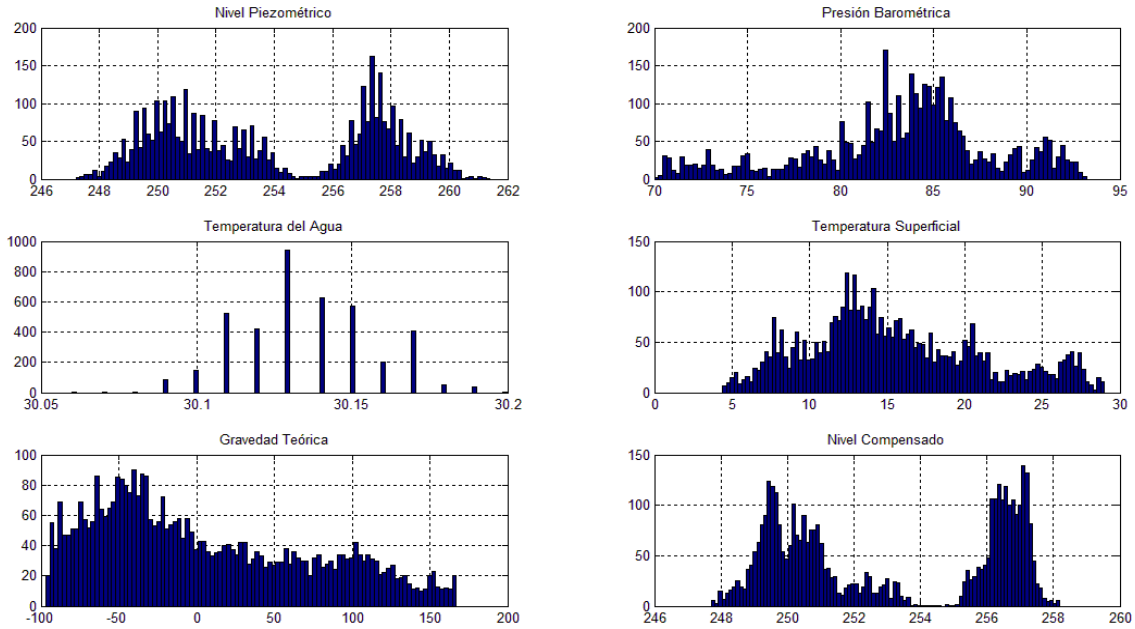

Figura 65. Histogramas de distribución para las series analizadas. C-3, Febrero 2008.

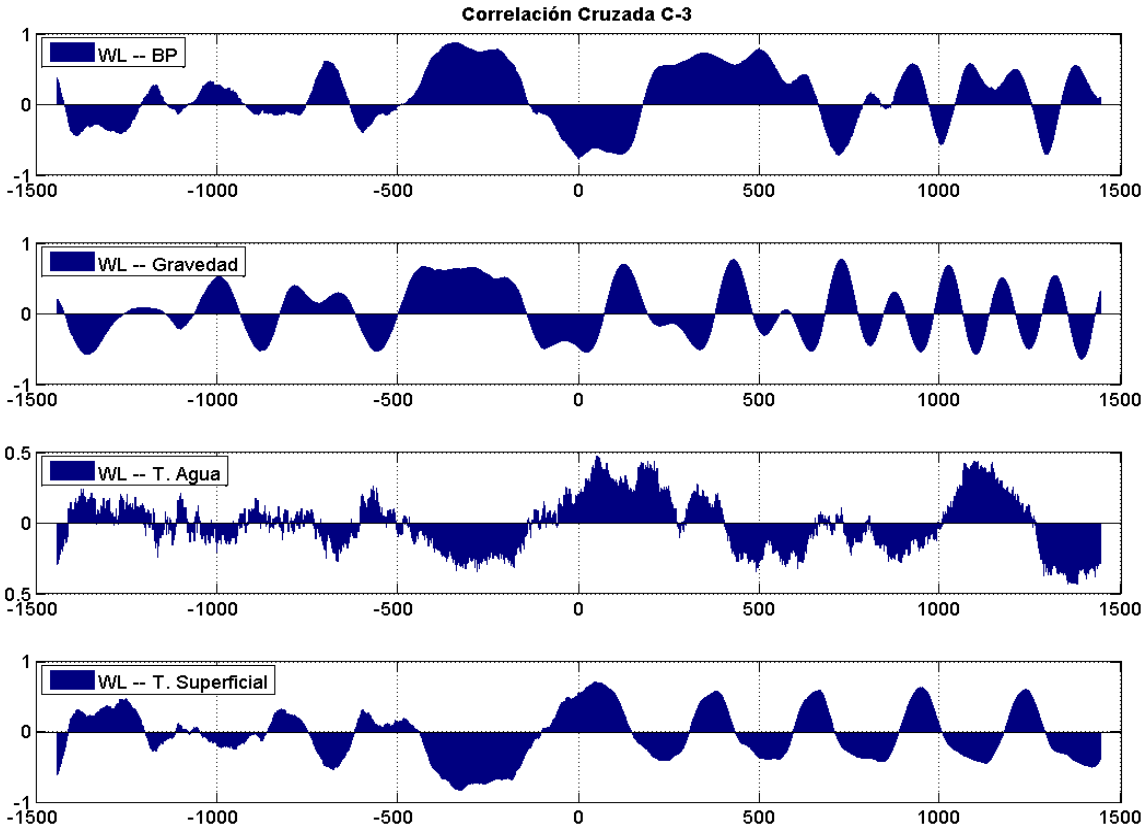

Figura 66. Correlación Cruzada de las series de tiempo, intervalo de actividad en enjambre.

IV.4.1.8. Filtrado de Nivel Piezométrico.

Resulta de interés analizar la banda central (0.5 a 6 cpd), por lo que se aplica un Filtro Pasa Banda, con frecuencia central (F_C=3 cpd) y un ancho de banda (F_W=6 cpd) para reconstruir la señal con las componentes de la banda central, y eliminar las componentes de baja frecuencia y las de alta frecuencia; debido a las características del filtro aplicado, se aplicó después un Filtro Pasa Altas con frecuencia central (F_C=0.5 cpd) y ancho de banda (F_W=0.1 cpd) buscando eliminar las componentes de baja frecuencia que permanecieron después (Figura 67).

El nivel piezométrico corregido por efectos barométricos (Figura 67-a). Se logra una buena reconstrucción de la señal considerando solo las componentes de la banda central de frecuencias (Figura 67-b), debido al fenómeno de fuga de frecuencias, se recurrió a un filtro pasa altas (Figura 67-c), y se reconstruye la señal con las componentes de la banda central (diurnas y semidiurnas). Debido a que la actividad sísmica en este periodo es importante en cantidad, la señal previa al enjambre (9 de Febrero) tiene comportamiento asociado a fenómenos barométricos, gravitacionales y temperatura.

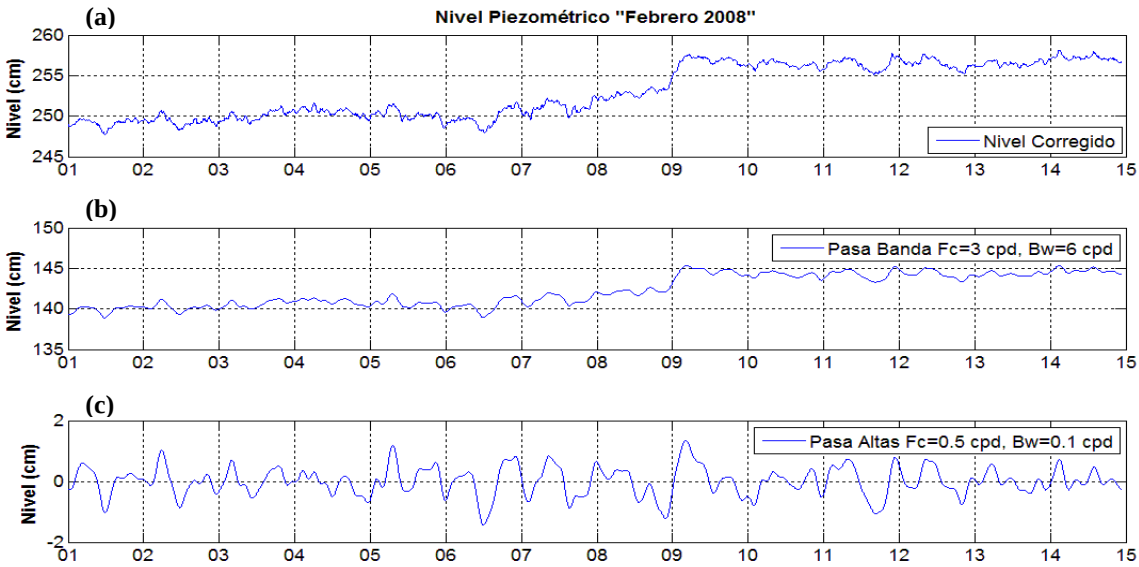

Figura 67. a) Nivel Piezométrico Compensado C-3, b) Nivel filtrando componentes de baja y alta frecuencia (Pasa Banda), c) Nivel filtrando bajas frecuencias (Pasa Altas).

Capítulo V.

Discusión.

Mediante la aplicación de técnicas de análisis en los dominios temporal y frecuencial a los registros de nivel piezométrico, en algunos pozos de la red de monitoreo del acuífero superficial en las inmediaciones del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, fue posible desarrollar una metodología que permitió analizar estos registros lográndose identificar las componentes dominantes, las cuales fueron correlacionadas con un análisis similar implementado en registros de variables atmosféricas y fenómenos naturales que suceden en la zona y que es bien sabido, que inducen variaciones de nivel del agua.

Debido a la ausencia de datos durante intervalos importantes de tiempo, causada principalmente por actos vandálicos donde han sustraído los instrumentos perdiéndose la información, además al ser reemplazado el instrumento puede llegar a ocurrir una variación en la posición del medidor, lo que produce escalones importantes en la serie y que deben de ser considerados con criterio. Con la anterior condición no resulta conveniente aplicar la metodología propuesta ya que la incertidumbre de los resultados obtenidos aumentaría de una manera significativa. Esto motivo que se definieran tres escenarios que representan condiciones de interés, siendo un evento sísmico de magnitud moderada (24 de mayo 2006), un periodo de mínima actividad sísmica (mayo – agosto 2007) y durante un fenómeno de enjambre sísmico (febrero 2008).

A continuación se presentan los resultados más significativos para cada una de las condiciones mencionadas.

Tabla XI. Evento sísmico 24 de mayo 2006, pozos C-3, PZ-3, PZ-5 y G-1-17.

Variable	Frecuencia CPD	Periodo h	Amplitud	Efecto de Memoria	Respuesta Barométrica	Eficiencia Barométrica	C-3	PZ-3	PZ-5	G-117
Presión Barométrica cm H_2O	1.002	23.529	1.007	10.5 h	-----	-----	0.82 42.7 h	-0.83 -18.3h	0.85 -42.1 h	0.84 43.7 h
	1.995	12.030	0.639							
	2.997	8.008	0.088							
Temperatura del Agua ℃	1.002	23.529	0.001	13.6 d	-----	-----	0.25 29.7 h	0.32 -99.5h	0.39 -85.5h	-0.25 93 h
	1.995	12.030	0.001							
	2.997	8.008	0.001							
Temperatura Superficial ℃	1.002	23.529	4.726	12.0 h	-----	-----	0.85 98 h	0.83 -20.7h	-0.91 -8.49h	0.83 27.1 h
	1.995	12.030	0.304							
	2.997	8.008	0.358							
Marea Gravitacional mGal	1.002	23.529	44.003	-----	-----	-----	0.80 -48 h	0.78 -48.5h	0.85 -48.3h	-0.80 -7.6 h
	1.995	12.030	13.875							
	2.898	8.280	0.063							
Pozo C-3										
Nivel Piezométrico cm H_2O	1.002	23.529	0.703	10.9 d	Libre Compuesta	0.96 ± 0.04	1	0.78 24.2 h	-0.76 14.1 h	0.84 0 h
	1.995	12.030	0.228			0.83 ± 0.04				
	2.997	8.008	0.104			0.93 ± 0.04				
Pozo PZ-3										
Nivel Piezométrico cm H_2O	1.002	23.529	0.973	16.2 d	Libre Compuesta	0.95 ± 0.025	-----	1	0.74 71.9 h	0.80 -23.8h
	1.995	12.030	0.605			0.97 ± 0.025				
	2.997	8.008	0.101			1.01 ± 0.025				
Pozo PZ-5										
Nivel Piezométrico cm H_2O	1.002	23.529	0.449	20.4 d	Libre Compuesta	0.965 ± 0.025	-----	-----	1	-0.81 -14.2h
	1.995	12.030	0.207			0.975 ± 0.025				
	2.997	8.008	0.077			0.96 ± 0.04				
Pozo G-1-17										
Nivel Piezométrico cm H_2O	1.002	23.529	0.615	32.4 d	Libre Compuesta	0.88 ± 0.04	-----	-----	-----	1
	1.995	12.030	0.298			0.875 ± 0.04				
	2.997	8.008	0.103			0.96 ± 0.04				

Del primer escenario (Sismo 5.4 Mayo 2006), en el intervalo de estudio obtenemos que las variaciones del nivel de agua, están asociadas a componentes diurnas y semi-diurnas, resultando coincidir con las componentes dominantes del resto de las variables analizadas (presión barométrica, temperatura, marea terrestre), lo que en primera instancia nos confirma que estos fenómenos son los principales responsables de las variaciones de nivel, donde mediante la correlación cruzada podemos observar que las correlaciones presentan valores muy similares, lo cual representa otro motivo por el cual resulta difícil inferir la aportación de cada una de estas y aunado a lo anterior también tenemos que los periodos de estas componentes coinciden con actividad humana, complicando cualquier aproximación que se haga.

El efecto de memoria en los cuatro pozos considerados resulta distinto, lo cual asociado con la ubicación de cada uno de estos, C-3 en el área cercana al contacto de abanicos aluviales y materiales finos del ambiente lagunar, PZ-3 y PZ-5 dentro del ambientes estuario, pero en zonas de cultivo, mientras que G-1-17 se encuentra al este de Falla Imperial, donde comienza la presencia de materiales de ambiente fluvial.

Los cuatro pozos presentan una respuesta barométrica compuesta (acuífero libre y efectos de pozo), que apoyándonos en el valor del efecto de memoria podemos hacer una nueva agrupación, donde C-3, PZ-3 y PZ-5 aunque presentan una importante diferencia de este parámetro, se encuentra que los valores de eficiencia barométrica son similares, lo cual también puede ser apoyado en el valor absoluto de correlación cruzada, el cual nos infiere que el pozo G-1-17 responde de manera muy distinta al resto de los pozos. Lo cual se asocia a su ubicación que modifica la secuencia cortada en su perforación y presenta diferentes propiedades hidráulicas locales para esta zona del acuífero.

Para las condiciones de mínima actividad sísmica se identifica que las componentes dominantes de las variaciones de nivel son diurnas y semi-diurnas, las cuales corresponden con las componentes de las variables analizadas (presión barométrica, temperatura y marea gravitacional), que se hace mención que

coinciden con actividades humanas, por lo cual es difícil inferir una aportación cuantitativa de cada una de estas, y más aún cuando se utiliza el coeficiente de correlación el cual es alto para cada una de las variables, indicando una fuerte y similar dependencia de las variables. Se presenta una respuesta tipo libre.

Tabla XII. Mínima actividad sísmica y enjambre sísmico, pozo C-3.

Mínima Actividad Sísmica (Mayo – Agosto 2007).							
Variable	Frecuencia CPD	Periodo h	Amplitud	Efecto de Memoria	Respuesta Barométrica	Eficiencia Barométrica	C.C.
Nivel Piezométrico cm H_2O	1.002	23.529	0.240	27.1 d	Libre	0.70 ± 0.20	-----
	1.995	12.030	0.147			0.50 ± 0.20	
	2.997	8.008	0.055			0.10 ± 0.20	
Presión Barométrica cm H_2O	1.002	23.529	1.072	1.3 d	-----	-----	-0.73 -16.8h
	1.995	12.030	0.461				
	2.997	8.008	0.045				
Temperatura del Agua ℃	1.002	23.529	0.001	19.0 d	-----	-----	0.24 35.5 h
	1.995	12.030	0.001				
	2.997	8.008	0.001				
Temperatura Superficial ℃	1.002	23.529	4.577	12.0 h	-----	-----	0.78 -18.4h
	1.995	12.030	0.408				
	2.997	8.008	0.373				
Marea Gravitacional mGal	1.002	23.529	44.010	-----	-----	-----	-0.71 -72.2h
	1.995	12.030	13.850				
	2.898	8.280	0.050				
Enjambre de Actividad Sísmica (Febrero 2008)							
Nivel Piezométrico cm H_2O	0.984	24.379	0.289	5.2 d	Libre	0.45 ± 0.10	-----
	1.969	12.189	0.289			0.28 ± 0.10	
	2.953	8.127	0.203			0.18 ± 0.10	
Presión Barométrica cm H_2O	0.984	24.379	0.815	1.6 d	-----	-----	0.86 -28.4h
	1.969	12.189	0.632				
	2.953	8.127	0.142				
Temperatura del Agua ℃	0.984	24.379	0.001	4.4 d	-----	-----	0.47 4.2 h
	1.969	12.189	0.001				
	2.953	8.127	0.001				
Temperatura Superficial ℃	0.984	24.379	4.828	12.0 h	-----	-----	-0.82 -27.2h
	1.969	12.189	1.155				
	2.953	8.127	0.248				
Marea Gravitacional mGal	1.002	23.529	35.010	-----	-----	-----	0.76 60.5 h
	2.000	12.000	66.200				
	2.898	8.280	0.063				

El cuanto al periodo donde se presentó el enjambre de actividad sísmica, se corrobora que las componentes principales con diurnas y semi-diurnas, que a su vez conforman los fenómenos (presión barométrica, temperatura y marea gravitacional) que propician las fluctuaciones de nivel observado.

La respuesta a efectos barométricos corresponde con la de un acuífero del tipo libre, sin afectación de condiciones de pozo.

Los registros obtenidos de la instrumentación del pozo C-3 cubrieron las tres condiciones analizadas en este trabajo (evento sísmico moderado, mínima actividad sísmica y enjambre sísmico), lo cual nos permite realizar un análisis de la respuesta para estos fenómenos. En primera instancia observamos diferentes respuestas a efectos de presión barométrica, con una respuesta compuesta para la condición de sismo moderado, el cual puede enmascarar un poco la respuesta real del sistema.

Para una condición de mínima actividad, el efecto es alto (27.1 días) debido a condiciones cuasi-estáticas, es decir, a no presentarse fuertes variaciones asociadas a sismicidad, la serie es muy dependiente de los datos anteriores, es decir, al no presentar mucha variabilidad el registro, cualquier perturbación permanece en el sistema por mas tiempo.

El efecto de memoria menor (5.2 días), que se presentó en el enjambre de sismicidad se relaciona con las constantes variaciones inducidas por el fenómeno, si bien la magnitud de los sismos no es muy significativa, sin duda la frecuencia de cada una de estas, es la que propicia este menor efecto de memoria del sistema.

En las condiciones de evento sísmico moderado (10.9 días), se presenta un efecto intermedio, el cual se asocia a la fuerte pero puntual variación inducida por este sismo.

Capítulo VI.

Conclusiones.

La metodología implementada permitió identificar en los registros producto de la instrumentación de algunos pozos en la red de monitoreo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, que las componentes principales son diurnas y semi-diurnas, las cuales se asocian a fenómenos naturales: presión barométrica, temperatura y marea gravitacional teórica.

Una variante importante, es el empleo de un método de convolución de regresión múltiple, obteniendo un comportamiento transitorio de la aportación a las variaciones de nivel del agua que induce la presión barométrica, dicho comportamiento transitorio, se presenta al atravesar la zona vadosa en acuíferos libres. Dicha técnica difiere, a considerar una eficiencia barométrica constante que se plantean en otros métodos de compensación pro efectos barométricos, pero que fueron planteados para acuíferos confinados.

No fue posible determinar la aportación de cada uno de los fenómenos que inducen variaciones de nivel en el agua, debido a que coinciden en componentes principales de cada uno de ellos, además la actividad antropogénica también coincide en los periodos identificados.

Un sismo moderado, afecta la respuesta del sistema, por lo cual se recomienda analizar registros en intervalos previos y posteriores a un sismo de estas características, y así evitar la modificación que propicia.

Esta tesis puede servir como base de trabajos posteriores donde se busque determinar parámetros geohidrológicos del acuífero con base en respuesta marea gravitacional y presión barométrica.

Bibliografía.

- Aguilar Dumas A, 2008. Análisis geológico-productivo enfocado a la exploración de la parte oriental del geotérmico de Cerro Prieto, BC. Geotermia. 21 (1): 2-11 p.

- Aguilar Dumas A. 2010. Situación actual y alternativas de exploración y explotación en el campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. Geotermia. 23 (2): 33-40 p.

- Ahern J. L. 1993. Software TIDES-ACD.BAS

- Anderson R. L. 1942. Distribution of the Serial Correlation Coefficient. Annals of Mathematical Statistics Vol 13: 1-13 p.

- Anuario Estadístico de Baja California INEGI, 2010. http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?ent=02

- Ariel Construcciones, S. A. 1967. Estudio Hidrogeológico preliminar de los Acuíferos del Valle de Mexicali, B. C. y Mesa de San Luis, Sonora. Contrato de Estudio S/N clave AS-1.

- Ariel Construcciones, S. A. 1968. Estudio Hidrogeológico de los Acuíferos del Valle de Mexicali, B. C., y Mesa de San Luis, Sonora. Contrato de Estudio S/N clave AS-1. 114 p., planos 29.

- CFE. 1986. Consideraciones sobre opciones de desecho del agua separada en Cerro Prieto, B. C. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Estudios Geotérmicos. Reporte Interno DEX 1/86.

- CFE. 1987. Permeabilidad del subsuelo al W de la laguna de evaporación. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Plantas Geotérmicas. Reporte Interno ET-CP-0187. 12 p.

- CFE. 1998. Resultados de la Perforación de Piezómetros en el Área de Cerro Prieto, B. C. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Reporte Interno. Inédito, 42 p

- Chapman S. and Lindzen R. S. 1970. Atmospheric tides, thermal and gravitational: Dordrecht, Holland, D. Reidel Publishing Co., 200 p.

- Chase D. S., Clover R. C., Grannell R. B., Leggewie R. M., Eppink J., Tarman D. W., Goldstein N. E. 1978. Precision gravity studies at Cerro Prieto: in Proceedings, First Symposium of the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, September 1978: Lawrence Berkeley Laboratory, LBL – 7098. CA, USA. 249-257 p.

- Chien Y. M., Bryce R. W., Strait S. R., and Yeatman R. A. 1986. Elimination of frecuency noise from groundwater measurements. In High-level nuclear waste disposal, ed. HC Burkholder: 389 – 400 p.

- CNA, 1992. Las Aguas Subterráneas en el Distrito de Riego 014, Río Colorado, Su Estado Actual, Tomo I.

- Clark W. E. 1967. Computing the barometric efficiency of a well. American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulic Division, Proceedings 93 (HY4): 93 – 98p.

- Colección del Archivo Histórico Diplomático Mexicano. 1975. La salinidad del Río Colorado: Una diferencia internacional.

- Díaz Cabrera P. 2001. Simulación numérica del acuífero superior del Valle de Mexicali, Baja California, México. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B. C. México. 148 p.

- Domínguez B. A. y Sánchez G. G. 1981. Comentarios de algunos problemas de perforación y terminación de pozos en Cerro Prieto. Proceedings, Third Symposium of the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, March 1981: Lawrence Berkeley Laboratory, LBL – 11967. CA. USA. 431-454 p.

- Escamilla A. M., 1991. Notas sobre las recargas al acuífero del Valle de Mexicali. CNA, Distrito de Riego No. 014. Inédito.

- Elders W. A., Bird D. K., Williams A. E. and Schiffman P. 1984. Hydrothermal Flow Regime and Magmatic Heat Source of the Cerro Prieto Geothermal System. Geothermics 13: 27 – 47 p.

- Fabriol H. 1997. Análisis de dos Catálogos de Sismicidad en el Área Geotérmica de Cerro Prieto (Baja California) de 1988 a 1995, Relación con la Reinyección. Geotermia 12 (3) 163-187 p.

- Furbish D. J. 1991. The response of water level in a well to a time series of atmospheric loading under confined conditions. Water Resources Research 27 (4): 557 – 568 p.

- Garnica Romo G., y Godínez Uribe V. 1987. Modelo matemático de las infiltraciones de salmuera en los abanicos aluviales de Cerro Prieto, B.C. Universidad de San Nicolás de Hidalgo, Morelia Michoacán. Contrato GRG-CLS-06/87. 56 p.

- Glowacka E., Sarychikhina O., Nava F. A. 2005. Subsidence and stress change in the Cerro Prieto Geothermal Field, B.C., México. Pure Applied Geophysics. 162: 2,095 – 2,110 p.

- Glowacka E., Sarychikhina O., Suárez F., Nava A., and Mellors R. 2010. Anthropogenic subsidence in the Mexicali Valley, Baja California, Mexico, and slip on the Saltillo Fault. Environmental Earth Sciences. 57 (7): 1,515 – 1,524.

- Gutiérrez P. H. y Ribó M. M. O. 1994. Reinjection experiences in the Cerro Prieto Geothermal Field. Geothermal Resources Council Transactions. Vol. 18.

- Halfman S. E., Lippmann M. J., Zelwer R. and Howard J. H. 1984. Geologic interpretation of geothermal fluid movement in Cerro Prieto Field, Baja California, Mexico. Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull. 68: 18 – 30 p.

- Halfman Dooley S. E., Lippmann M. J., and Bodvarsson G. S. 1989. Progress report on LBL's numerical modeling studies on Cerro Prieto. Proc. DOE/CFE Symp. In the Field of Geoth. Energy, San Diego, CA. Apr. 4-5, Conf-8904129, 247-267 p.

- Hwa-Sheng Gau, Ting-Chien Chen, Jui-Sheng Chen and Chen-Wuing Liu. 2007. Time series decomposition of groundwater level changes in wells due to the Chi-Chi earthquake in Taiwan: a possible hydrological precursor to earthquakes. Hydrological Processes. 21: 510 – 524 p.

- Hernández Blanket J. 2001. Curvas de Isoevapotranspiración para el Valle de Mexicali Baja California. Tesis de Maestría, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Departamento de Ingeniería, 85 p.

- Humphrey, S. y Weldon, R, 1991. Kinematic constraints on the rifting of Baja California, In Dauphin P. and Simoneit, B. Editors. American Association of Petroleum Geologist memoir 47, p. 217-230.

- Jacob C. E. 1940. On the flow of wáter in an elastic artesian aquifer. American Geophysical Union Transaction (14): 446 – 460 p.

- Kanamori Hidoo. 1977. The energy release in great earthquakes. Journal Geophysics Research 82. 2981-2987 p.

- Leaver Jonathan D. 2006. Identification and Interpretation of Characteristics Periodic Variations of Near Surface Fluids in The Aroha, Rotorua and Orakeikorako Geothermal Fields of New Zealand using Wavelet and Fourier Analysis. Thesis of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. The University of Auckland.

- Leaver Jonathan D., Unsworth Charles P. 2007. Fourier analysis of short-period water level variations in the Rotorua geothermal field, New Zealand. Geothermics 36: 539 – 557 p.

- Lee J., Miller M. M., Crippen R., Hacker B., y Ledesma – Vazquez J. 1996. Middle Miocene extensión in the Gulf Extensional Province, Baja California: Evidence from the southern Sierra Juarez. Geological Society of America Bulletin. V. 108: 505 – 525 p.

- Lira Herrera Héctor, 2005. Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC. Geotermia. 18 (1). p. 33-40.

- Lira Herrera., 2006. Características del sismo del 23 de Mayo de 2006. Informe RE-023/2006. Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Estudios. México.

- López L. A. 1991. Evaluación de la calidad del agua del acuífero del Valle de Mexicali, B. C. Tesis de Maestría, Instituto de Investigación en Agricultura y Ganadería. Universidad Autónoma de Baja California. 93 p.

- Lyons D. J. and Van de Kamp D. C. 1980. Subsurface Geological and Geophysical Study of the Cerro Prieto Geothermal Field. Baja California, Mexico. University of California Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley CA. Report LBL-10540.

- Matalas, N. C. 1967. Time Series Analysis. W. R. R. vol 3: 817 – 829 p.

- Mathworks. 2008. Matlab 7.6.0.324 (R2008a). The Mathworks Inc.

- Matsumoto N., Kitagawa G., Roeloffs A. E. 2003. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan I. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric

pressure, rainfall and tidal response. Geophysical Journal International. 155: 885 – 898 p.

- Mehnert E., Valocchi A. J., Heidari M., Kapoor S. G., and Kumar P. 1999. Estimating Transmissivity from the Water Level Fluctuations of a Sinusoidally Forced Well. Ground Water. 37 (6): 855 – 860.

- Merrit L. Michael. 2004. Estimating Hydraulic Properties of the Floridan Aquifer System by Analysis of Earth – Tide, Ocean – Tide, and Barometrics Effects, Collier and Hendry Counties, Florida. U. S. Geological Survey. Water Resources Investigations Report 03-4267.

- Molerio León L. F., Torres Rodríguez J. C., Rocamora Álvarez E., Guerra Oliva M. G., Rodríguez K. R. 2002. Optimización de la red de monitoreo del régimen de las aguas subterráneas en la Cuenca Sur de Matanzas, Cuba. II. Dominios temporal y frecuencial. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 23 (2): 23 – 37 p.

- Munguía L., Glowacka E., Suárez Vidal F, Lira Herrara H., Sarychikhina O. 2009. Near-Fault Strong Ground Motion Recorded during the Morelia Normal-Fault Earthquake of May 2006 in Mexicali Valley, BC, México. Bull. Seismol. Soc. Am. 99 (3), 561 – 578 p.

- Paredes Arellano E. 1992. Las aguas subterráneas en el Distrito de Riego 014, Río Colorado, su estado actual. Informe CNA. Gerencia Estatal en Baja California, Reporte Interno. Inédito, 38 p.

- Pérez P. R. F., 1996. Análisis de los mapas de potencial gravimétrico y magnético del sistema geotérmico Cerro Prieto, Baja California, México. Tesis de Licenciatura en Geofísica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Inédito.

- Quilty E. G. and Roeloffs A. E. 1991. Removal of barometric pressure response from water level data. Journal of Geophysical Research. 96 (B6): 10,209 – 10,218 p.

- Ramírez Hernández J., Huerta G., Vázquez González R. y Vega Aguilar R. 1989. Desarrollo de un simulador numérico del efecto de las infiltraciones de salmueras geotérmicas. Universidad Autónoma de Baja California. Informe Final. Contrato de Servicios No. 882215 CFE.

- Ramírez Hernández J., Sastre Merlín A., Carreón D. C., Vega Aguilar M., Reyes López J. A. y Sampedro José A. 1994. Determinación experimental de la ubicación y avance del frente salino dentro del

acuífero superior en la zona del campo geotérmico de Cerro Prieto. CFE-Instituto de Ingeniería Universidad Autónoma de Baja California. Reporte Interno.

- Ramírez Hernández J. 1997. Estudio de las relaciones geohidrólogicas del acuífero superior del Valle de Mexicali con aguas geotérmicas superficiales. Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá, Departamento de Geología, España.

- Rasmussen T. C. and Crawford L. A. 1997. Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers. Ground Water 35 (3): 502 – 511 p.

- Ritzi R. W., Sorooshian S., Hsieh P. A. 1991. The estimation of fluid flow properties from the response of water levels in wells to the combined atmospheric and earth tide forces. Water Resources Research. 27 (5): 883 – 893 p.

- Rojstaczer S. 1988. Determination of fluid flow properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading. Water Resources Research. 24(11): 1,927 – 1,938 p.

- Roeloffs A. E., Schaulz B. S., Riley S. F., Records W. A. 1989. Hydrologic Effects on Water Level Changes Associated With Episodic Fault Creep Near Parkfield, California. Journal of Geophysical Research. 94 (B9): 12,378 – 12,402 p.

- Roeloffs A. Evelyn. 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. Journal of Geophysical Research. 103 (B1): 869 – 889 p.

- SARH. 1972. Resumen del estudio geohidrólogico del Valle de Mexicali, B. C. y Mesa Arenosa de San Luis, Sonora. Inédito.

- Sarychikhina O., Glowacka E., Mellors R., Vázquez R., Munguía L., and Guzmán M. 2009. Surface Displacement and Groundwater Level Changes Associated with the 24 May 2006 Mw 5.4 Morelia Fault Earthquake, Mexicalli Valley, Baja California, México. Bulletin of the Seismological Society of America. 99 (4): 2,180 – 2,189 p.

- Sarychikhina Olga, 2010. The spatial and temporal distribution of the ground deformations in the Mexicaly Valley in the context of tectonic, anthropogenic and seismic processes. Tesis Doctoral. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California, México.

- Secretaria de Fomento Agropecuario, Gobierno de Baja California, 2010. http://www.sfa.gob.mx/agua.aspx

- Solinst, 2011. Levelogger Series, User Guide: Software version 3.4.1. Solinst Canada LTD. 72 p.

- Suárez Vidal F., Munguía Orozco L., González Escobar M., González García J., Glowacka E., 2007. Surface Rupture of the Morelia Fault Near the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexicali, Baja California, Mexico, during the Mw 5.4 Earthquake of 24 May 2006. Siesmol. Res. Lett. 78 (3): 394 – 399 p.

- Suárez Vidal Francisco, Mendoza Borunda Ramón, Nafarrete Zamarripa Luis M., Rámirez Jorge, Glowacka Ewa. 2008. Shape and dimensions of the Cerro Prieto pull-apart basin, Mexicali, Baja California, Mexico, based on the regional seismic record and surface structures. International Geology Review. Vol. 50, 636 – 649.

- Truesdell A., Terrazas B., Hernández L., Janik C., Quijano L. and Tovar R. 1989. The Response of the Cerro Prieto Reservoir to Exploitation as Indicated by Fluid Geochemistry. Proceedings DOE/CFE.

- Truesdell A., Mañon A., Quijano L., Coplen T. and Lippmann. 1992. Boling and Condensation Process in the Cerro Prieto Beta Reservoir under Exploitation. Proceedings Seventeenth Workshop Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University. Stanford CA.

- Vázquez González R., Ramírez Hernández J., Martín Barajas A., Carreón Diazconti C., García Cueto O. R., Miranda reyes F., Vázquez Hernández S., Benitez Pérez H., Espinoza García S. 1998. Estudio Geohidrólogico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Mexicali, B. C. CICESE – CFE., Contrato No. RGCP-CLS-002/97.

- Vázquez González Rogelio, 1999. Condiciones Geohidrólogicas del Acuífero Somero en la Zona del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Geotermia. 15 (1): 11-18 p.

- Venegas S. S. y Arellano G. J. F. 1992. Alternativas para la reinyección o desalojo de la salmuera residual en Cerro Prieto B. C. Reporte OGL/CP/01-92, CFE.

- Weeks E. P. 1979. Barometric fluctuations in Wells tapping deep unconfined aquifers. Water Resources Research. 15 (5): 1167-1176 p.