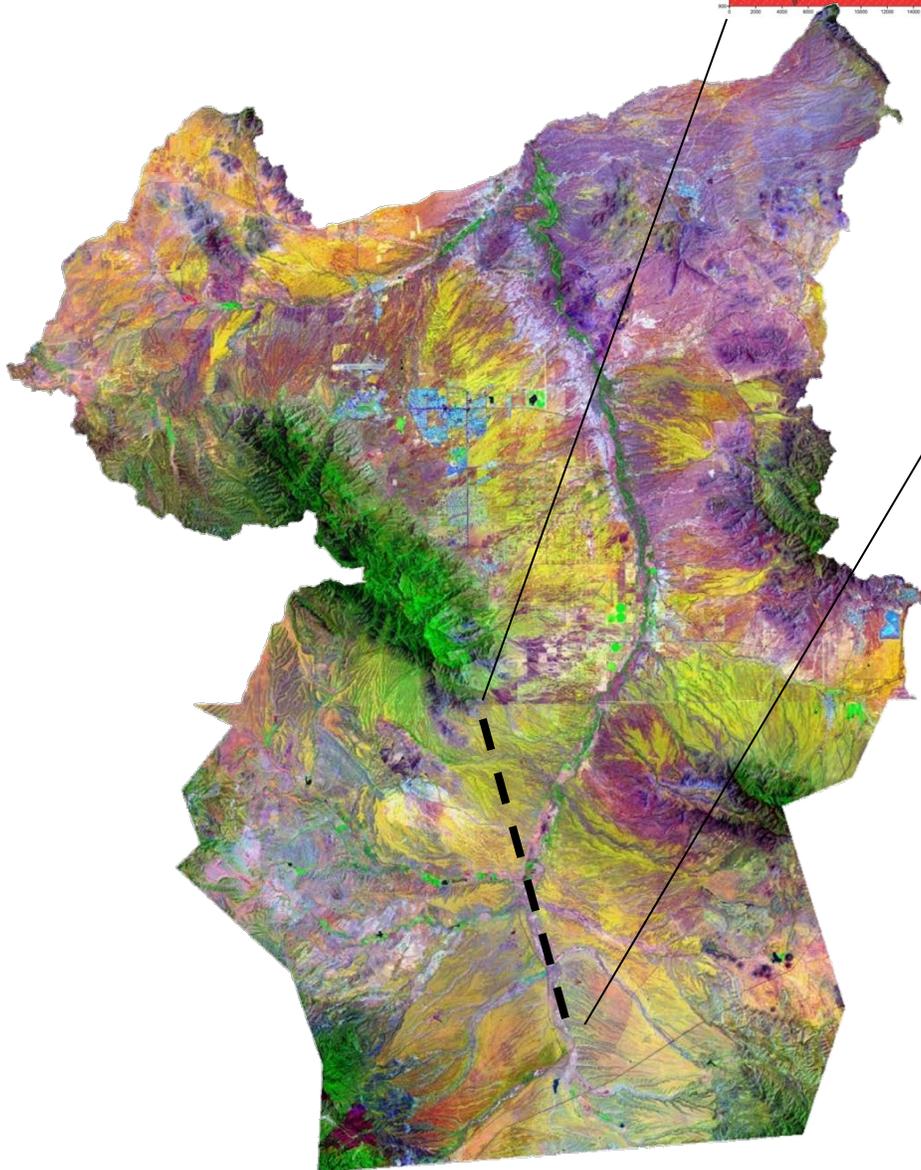
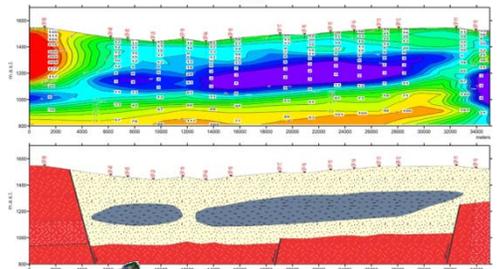




# ESTUDIO BINACIONAL SOBRE EL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO DEL RÍO SAN PEDRO



CONAGUA  
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA



Informe Final 2016



## **AUTORIDAD**

Este estudio se llevó a cabo por México y los Estados Unidos de conformidad con la resolución 6 del Acta 242 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos (CILA), intitulada "Solución Permanente y Definitiva al Problema Internacional de la Salinidad del Río Colorado," con fecha 30 de agosto de 1973; y el "Informe Común de los Ingenieros Principales Referente al Proceso de Cooperación Conjunta México-Estados Unidos para el Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos", de fecha 19 de agosto de 2009.

## **FINANCIAMIENTO**

Este estudio fue financiado por: el Programa de Recursos de Agua Subterránea del Servicio Geológico de los Estados Unidos y el Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos; el Centro de Investigación en Recursos Hídricos, Tecnología y Financiamiento Privado de la Universidad de Arizona; la Comisión Nacional del Agua de México; y la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos.

## **ORGANISMOS PARTICIPANTES**

Comisión Internacional de Límites y Aguas  
entre México y Estados Unidos

Por México:

Comisión Nacional del Agua  
Universidad de Sonora

Por los Estados Unidos:

Servicio Geológico de los Estados Unidos  
Centro de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad de Arizona

**Autores:** J.I. Minjarez Sosa, J.B. Callegary, E.M. Tapia Villaseñor, P. dos Santos, R. Monreal Saavedra, F.J. Grijalva Noriega, A.K. Huth, F. Gray, C.A. Scott, L.A. Oroz Ramos, S.B. Megdal, M. Rangel Medina, J.M. Leenhouts

**Referencia sugerida:** J.B. Callegary, Minjárez Sosa, I., Tapia Villaseñor, E.M., P dos Santos, P., Monreal Saavedra, R., Grijalva Noriega, F.J., Huth, A.K., Gray, F., Scott, C.A., Megdal, S.B., Oroz Ramos, L.A., Rangel Medina, M., Leenhouts, J.M., 2016, Estudio Binacional sobre el Acuífero Transfronterizo del Río San Pedro: Comisión Internacional de Límites y Aguas

## **GRUPO DE ESTUDIO BINACIONAL**

Por la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos:

- Roberto F. Salmón Castelo, Comisionado, Sección Mexicana
- Luis Antonio Rascón Mendoza, Ingeniero Principal, Sección Mexicana
- Manuel Alejandro Morales Galván, Coordinador del Proyecto, Sección Mexicana
- Ramiro Luján Godínez, Coordinador del Proyecto, Sección Mexicana
- Jesús Quintanar Guadarrama, Representante en Nogales, Son., Sección Mexicana
  
- Edward Drusina, Comisionado, Sección Estadounidense
- John L. Merino, Ingeniero Principal, Sección Estadounidense
- José A. Núñez, Ingeniero Principal, Sección Estadounidense
- Gilbert Anaya, Jefe de División, Coordinador del Proyecto, Sección Estadounidense

Por la Comisión Nacional del Agua:

- Rubén Chávez Guillén, Gerente de Aguas Subterráneas
- Roberto Sención Aceves
- Lucas Oroz Ramos
- José Arturo López
- Víctor M. Castañón Arcos

Por la Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora:

- Roberto Molina Acedo
- Alberto Bustamante Juvera

Por la Universidad de Sonora:

- Ismael Minjárez Sosa, Coordinador, Investigador Principal
- Rogelio Monreal Saavedra, Investigador Principal
- Elia María Tapia Villaseñor, Investigador Principal
- Francisco Javier Grijalva Noriega, Investigador Principal
- Miguel Rangel Medina

Por el Servicio Geológico de los Estados Unidos:

- James Leenhouts, Director, Centro de Investigación en Ciencias del Agua de Arizona
- Bruce Gungle, Hidrólogo
- James Callegary, Hidrólogo, Investigador Principal
- Floyd Gray, Geólogo, Investigador Principal

Por el Centro de Investigación de Recursos del Agua de la Universidad de Arizona:

- Sharon Megdal, Directora
- Placido Dos Santos, Coordinador, Investigador Principal
- Christopher Scott, Investigador Principal
- Anne Huth, SIG Investigador

El grupo binacional reconoce la valiosa participación de un gran número de colaboradores técnicos y administrativos quienes de manera directa o indirecta participaron en el desarrollo de este estudio, ya sea a través de supervisión, trabajo de campo, impresión, edición, control administrativo, etc., o a través de valiosas contribuciones con información, ideas y comentarios sobre los resultados del estudio y sus interpretaciones.

## Tabla de Contenidos

LISTA DE ACRÓNIMOS.....	10
INSTITUCIONES .....	10
TÉRMINOS TÉCNICOS CLAVE.....	10
RESUMEN EJECUTIVO.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	18
1.1. Antecedentes .....	18
1.2. Área de Estudio.....	19
1.3. Objetivos del Estudio .....	23
1.4. Estudios Previos.....	23
1.5. Entorno Socioeconómico Binacional.....	24
1.6. Marco Binacional sobre Gestión de Agua .....	25
1.7. Trabajo Técnico Realizado .....	27
1.8. Metodologías y Técnicas Aplicadas.....	28
2. FISIOGRAFÍA .....	30
2.1 Provincia Fisiográfica .....	30
2.2 Hidrografía.....	30
2.3 Región Hidrológica.....	32
2.4 Suelos.....	32
2.5 Vegetación .....	33
3. AGUAS SUPERFICIALES E HIDROMETEOROLOGÍA.....	36
3.1 Análisis Climatológico.....	36
3.2 Precipitación y Evapotranspiración.....	38
3.3 Sistema Hidrológico Superficial .....	46
3.4 Pendientes del Terreno.....	47
3.5 Uso y Cobertura de Suelo .....	47
4. MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL .....	53
4.1 Contexto Geológico Regional.....	53
4.2 Estratigrafía.....	54
4.3 Geología Estructural .....	64
4.4 Geología Tridimensional del subsuelo.....	64
4.5 Profundidad al Basamento y Estructura.....	65
4.6 Características del Relleno Sedimentario.....	69
5. HIDROGEOLOGÍA.....	73
5.1 Basamento Hidrogeológico.....	73
5.2 Unidades Hydroestratigráficas.....	75
5.3 Definición del Sistema del Acuífero .....	76
6. PIEZOMETRÍA Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS.....	78
6.1 Estudio Integral de Pozos.....	78
6.2 Descripción de la Variabilidad Espacial y Temporal de los Niveles de Agua.....	87

6.3	Definición e interpretación de los parámetros hidráulicos de la subsuperficie.....	91
7.	HIDROGEOQUÍMICA.....	97
7.1	Muestreo Hidrogeoquímico .....	97
7.2	Temperatura y pH .....	98
7.3	Calidad del Agua.....	102
7.4	Distribución de los Iones Principales e Identificación de las Familias de Agua.....	107
7.5	Isótopos Estables.....	124
8.	MODELOS CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DE LOS COMPONENTES DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y SU COMPORTAMIENTO .....	126
8.1	El Sistema de Flujo de Agua Subterránea.....	126
8.2	El Comportamiento Hidrodinámico Pre-Desarrollo .....	127
8.3	El Comportamiento Hidrodinámico Post-Desarrollo.....	128
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	134
9.1	Resumen de Conclusiones y Observaciones .....	134
9.2	Resumen de Resultados Técnicos .....	135
9.3	Recomendaciones Técnicas .....	143
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	149
11.	APÉNDICES .....	160
11.1	Estaciones de Aforo.....	160
11.2	Suelos .....	160
11.3	Datos Meteorológicos.....	164
11.4	Clases de vegetación y descripciones .....	173
11.5	Localización de pozos en Sonora y Arizona del levantamiento piezométrico .....	180
11.6	Localización de pozos en Sonora (levantamiento Geoquímico).....	181
11.7	Metadatos del SIG .....	182

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Cuencas Binacionales del Río San Pedro y del Río Santa Cruz .....	19
Figura 1.2 Acuífero Binacional San Pedro .....	21
Figura 2.1 Red de Drenaje Superficial en la Cuenca Binacional San Pedro (CBSP).....	31
Figura 2.2 Distribución de suelos en la Cuenca Binacional San Pedro.....	34
Figura 2.3 Vegetación en la Cuenca Binacional San Pedro (Boykin et al., 2014). .....	35
Figura 3.1 Temperatura Promedio Anual en la Cuenca Binacional San Pedro.....	40
Figura 3.2 Temperatura Máxima en el mes más caluroso en la Cuenca Binacional San Pedro.....	41
Figura 3.3 Temperatura Mínima en el mes más frío en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	42
Figura 3.4 Precipitación Promedio Anual en la Cuenca Binacional San Pedro .....	43
Figura 3.5 Precipitación Promedio en el mes de Agosto en la Cuenca Binacional San Pedro.....	44
Figura 3.6 Precipitación Promedio en el Mes de Enero en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	45
Figura 3.7 Tipos de Drenaje en la Cuenca Binacional San Pedro.....	49
Figura 3.8 Pendientes en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	50
Figura 3.9 Uso y Cobertura de Suelo en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	51
Figura 3.10 Propiedad de Suelo en la Cuenca Binacional San Pedro.....	52
Figura 4.1 Geología de la Cuenca Binacional San Pedro.....	55
Figura 4.2 Mapa de Anomalía de Bouguer para la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro. Los perfiles 3 y 4 son mostrados como secciones modeladas en la Figura 4.4.....	67
Figura 4.3 Perfiles gravimétricos en la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro: A) perfil 4 orientado N-S; B) perfil 3 orientado WSW-ENE. La localización de los perfiles se muestra en la Figura 4.2 .....	69
Figura 4.4 Perfil de Resistividad Oeste-Este mostrando la base y la cima de la zona arcillosa en el subsuelo de la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro.....	70
Figura 4.5 Mapas de resistividad a diferentes elevaciones en el subsuelo de la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro. El mapa base de la geología corresponde al mostrado en la Figura 4.1.....	71
Figura 4.6 Interpretación esquemática de la Cuenca Binacional San Pedro .....	72
Figura 5.1 Perfil de Resistividad N-S (TEM) desarrollado en el límite oriental del lado mexicano de la Cuenca Binacional San Pedro, mostrando la zona de baja resistividad (contornos de color azul oscuro y morado) que podría estar asociada con un basamento fracturado. La localización del perfil se indica con una línea roja en el mapa geológico en la parte inferior de la figura (Ver Figura 4.1 para identificar la geología detallada). Las distancias en el perfil de resistividad y en el mapa están en metros.....	74
Figura 5.2 Distribución propuesta de las Unidades Hidroestratigráficas basado en los perfiles de resistividad (TEM), (y otra información) dentro del límite oriental de la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro. La localización del perfil se indica con una línea roja en el mapa geológico en la parte inferior de la figura (Ver Figura 4.1 para identificar la geología detallada). Las distancias en el perfil de resistividad y en el mapa están en metros.....	77

Figura 6.1 Ubicación de Pozos seleccionados distinguidos por el Uso de Agua en la Cuenca Binacional San Pedro.....	80
Figura 6.2 Pozos identificados para la elaboración de Hidrogramas en la Cuenca Binacional San Pedro. Los Hidrogramas en E.U.A. fueron seleccionados para resaltar los diferentes entornos geográficos y los procesos hidrológicos de interés. Ver texto, apéndices e hidrogramas individuales más abajo en el documento para más detalles, tales como hidrogramas individuales, códigos del USGS para la identificación de los sitios y coordenadas de ubicación. ....	81
Figura 6.3 Profundidad al Nivel Estático del Agua en el 2011 en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	89
Figura 6.4 Elevación del Nivel Estático en el 2011 en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	90
Figura 6.5 Localización de pozos donde se llevaron a cabo pruebas de capacidad específica.....	92
Figura 6.6 Distribución de Transmisividad en la Cuenca Binacional San Pedro (Pool y Dickinson, 2007)....	96
Figura 7.1 Temperatura del Agua Subterránea en la Cuenca Binacional San Pedro.....	100
Figura 7.2 pH del Agua Subterránea en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	101
Figura 7.3 Alcalinidad del Agua Subterránea en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	105
Figura 7.4 Conductividad Eléctrica en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	106
Figura 7.5 (a) Diagrama de Piper para la Cuenca Binacional San Pedro utilizando los datos disponibles del USGS NWIS (2013) y los datos recopilados por la UNISON (2011).....	108
Figura 7.5 (b) Localización de muestras utilizadas en el Diagrama de Piper para la Cuenca Binacional San Pedro.....	109
Figura 7.6 Concentración de Sodio por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro .....	110
Figura 7.7 Variabilidad espacial de las Concentraciones de Sodio en la Cuenca Binacional San Pedro.....	111
Figura 7.8 Concentración de Calcio por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	112
Figura 7.9 Variabilidad Espacial de las Concentraciones de Calcio en la Cuenca Binacional San Pedro. ...	113
Figura 7.10 Concentración de Magnesio por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	114
Figura 7.11 Variabilidad Espacial de las Concentraciones de Magnesio en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	115
Figura 7.12 Concentración de Potasio por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	116
Figura 7.13 Variabilidad espacial de las concentraciones de Potasio en la Cuenca Binacional San Pedro. ...	117
Figura 7.14 Concentración de Cloruro por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	118
Figura 7.15 Variabilidad Espacial de las concentraciones de Cloruro en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	119
Figura 7.16 Concentración de Sulfato en aguas subterráneas y aguas superficiales (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	120
Figura 7.17 Variabilidad Espacial de las Concentraciones de Sulfato en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	121
Figura 7.18 Concentración de Bicarbonato en aguas subterráneas y aguas superficiales (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	122

Figura 7.19 Concentración de Bicarbonato en aguas subterráneas en la Cuenca Binacional San Pedro. ....	123
--	-----

## APÉNDICES

Figura 1. Precipitación Media Mensual, Estación Naco, Período 1962-2007.....	166
Figura 2. Precipitación Acumulada Anual, Estación Naco, Período 1962-2007.....	166
Figura 3. Temperatura Media Mensual, Estación Naco, Período 1962-2007.....	167
Figura 4. Temperatura Media Anual, Estación Naco, Período 1962-2007.....	167
Figura 5. Precipitación Media Mensual, Estación Santa Cruz, Período 1974-2007.....	168
Figura 6. Precipitación Acumulada Anual, Estación Santa Cruz, Período 1974-2007.....	168
Figura 7. Temperatura Media Mensual, Estación Santa Cruz, Período 1974-2007 .....	169
Figura 8. Temperatura Media Anual, Estación Santa Cruz, Período 1974-2007 .....	169
Figura 9. Precipitación Media Mensual, Estación Cananea, Período 1971-2000.....	170
Figura 10. Temperatura Media Mensual, Estación Cananea, Período 1971-2000 .....	170
Figura 11. Precipitación Media Mensual, Estación Coronado National Monument, Período 1960-2010 ...	171
Figura 12. Precipitación Acumulada Anual, Estación Coronado National Monument, Período 1960-2010	171
Figura 13. Temperatura Media Mensual, Estación Coronado National Monument, Período 1960-2010 .....	172
Figura 14. Temperatura Media Anual, Estación Coronado National Monument, Período 1960-2010 .....	172

## Lista de Tablas

Tabla 1.1 Población de las Entidades Principales en la CBSP.....	25
Tabla 6.1 Volumen Anual Concesionado para el acuífero Río San Pedro en México (REPDA, 2012). Las concesiones de agua subterránea se designan por tipo de usuario y se determinan por CONAGUA por período específico.....	87
Tabla 6.2 Parámetros hidráulicos subterráneos para la cuenca alta del Río San Pedro, de Pool y Dickinson (2007) .....	94
Tabla 6.3 Pruebas de bombeo en la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro (Consultores en Agua Subterránea, S.A., 2000, todas las pruebas de bombeo fueron revisadas y aprobadas por la CONAGUA).....	95
Tabla 8. 1 El balance de agua en la CBSP antes del desarrollo (Pool y Dickinson, 2007).....	127

## APÉNDICES

Tabla 11. 1 Estaciones de aforo en la CBSP. Los datos han sido derivados del USGS National Water Information System. ( <a href="http://waterdata.usgs.gov/az/nwis/">http://waterdata.usgs.gov/az/nwis/</a> ). NA indica que los datos no están disponibles al tiempo de publicación.....	160
Tabla 11. 2 Estaciones climáticas analizadas .....	165

## LISTA DE ACRÓNIMOS

### INSTITUCIONES

ADEQ	Departamento de Calidad Ambiental de Arizona
ADWR	Departamento de Recursos de Agua de Arizona
ARS	Servicio de Investigación Agrícola, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
BLM	Oficina de Administración de Tierras, E.U.A.
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical,
CILA	Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal, Mexico
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua, México
FAO	Organización de las Naciones Unidas Para la Agricultura y la Alimentación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
NRCS	Servicio de Conservación de Recursos Naturales
OMM	Organización Meteorológica Mundial
SGM	Servicio Geológico Mexicano
UA WRRC	Centro de Investigación de Recursos de Agua de la Universidad de Arizona
UNISON	Universidad de Sonora
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
USFS	Servicio Forestal de los Estados Unidos
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
USPP	Asociación del Alto San Pedro
WMO	Organización Meteorológica Mundial

### TÉRMINOS TÉCNICOS CLAVE

ABSP	Acuífero Binacional San Pedro
AMA	Área de Gestión Activa
BEHI	Iniciativa de la Salud Ambiental en la Frontera, Servicio Geológico de Estados Unidos
CBSP	Cuenca Binacional San Pedro
CEC	Contaminantes Emergentes
COTAS	Comité Técnico de Aguas Subterráneas, CONAGUA
DOF	Diario Oficial de la Federación, México
EOP	Planta de Operaciones Ambientales, Sierra Vista
Eh	Potencial Redox
ENSO	El Niño Oscilación del Sur
ET	Evapotranspiración
FAOCLIM	Datos Climáticos Mundiales de la FAO
GHCN	Red Global Histórica de Climatología
GWSI	Inventario de Sitios de Agua Subterránea
K	Conductividad Hidráulica
MCL	Niveles Máximos de Contaminantes
NED	Datos Nacionales de Elevación, Servicio Geológico de los Estados Unidos
NOM	Norma Oficial Mexicana
NWIS	Sistema Nacional de Información Sobre el Agua, Servicio Geológico de los Estados Unidos
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico
pH	Potencial de Hidrógeno
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua, CONAGUA
SASPS	Subcuenca Alta San Pedro en Sonora

SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIGMAS	Sistema de Información Geográfica Para el Manejo de Agua Subterránea - CONAGUA
SPRNCA	Área Nacional de Conservación del Río San Pedro, Buró del Manejo de Suelo de EUA
Ss	Almacenamiento Específico
SSVA	Subcuenca de Sierra Vista en Arizona
Sy	Rendimiento Específico
SDT	Sólidos Disueltos Totales
TEM	Sondeo Electromagnético
UTM	Proyección Universal Transversa de Mercator.
Kh/Kv	Anisotropía Vertical
WGS	Sistema Geodésico Mundial

## RESUMEN EJECUTIVO

México y Estados Unidos comparten aguas en varias cuencas hidrológicas y mantos acuíferos que cruzan la frontera internacional. Ambos países reconocen que en una región con escasos recursos hídricos y con una expansión poblacional, contar con un mejor entendimiento científico de estos sistemas acuíferos sería beneficioso. En ese sentido, los Ingenieros Principales de México y Estados Unidos de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) firmaron conjuntamente el “Informe Común de los Ingenieros Principales Referente al Proceso de Cooperación Conjunta México-Estados Unidos para el Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos” el 19 de agosto de 2009 (CILA, 2009). Este “Informe Conjunto” de ambas Secciones de la CILA sirve como marco de referencia para la coordinación y el diálogo entre México y los Estados Unidos para el desarrollo de estudios conjuntos sobre los acuíferos transfronterizos. El documento especifica los detalles acerca del programa, tales como: antecedentes, objetivos, funciones y responsabilidades, financiamiento, relevancia de los tratados internacionales sobre el agua, la comunicación y el uso de la información recopilada o generada como parte del programa. Con base en el Informe Conjunto mencionado fue acordado por las partes involucradas, que incluyeron a la CILA, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y las Universidades de Arizona y Sonora, estudiar dos acuíferos transfronterizos prioritarios para la región de

Sonora-Arizona: la cuenca del Río San Pedro y la cuenca del Río Santa Cruz.

Este Estudio se enfoca en la Cuenca Binacional San Pedro (CBSP). Algunas de las razones para enfocar el interés en este acuífero incluyen: que se trata de un acuífero compartido por ambos países; que el Río San Pedro tiene un alto valor ecológico debido al ecosistema ribereño que sostiene, y que se requieren de los recursos hídricos de la cuenca para sostener al río, a las comunidades aledañas y lograr un desarrollo sustentable. Este estudio describe las características del acuífero en su contexto binacional; sin embargo, en su mayor parte, el trabajo científico ha sido llevado a cabo por muchos años por cada país sin el conocimiento total de las condiciones en el otro lado de la frontera. El objetivo general de este estudio es hacer uso de investigaciones nuevas y de las ya existentes para definir el marco hidrológico general del Acuífero Binacional San Pedro (ABSP), para recopilar datos hidrogeológicos y otra información relevante como preparación para trabajos futuros, tales como el desarrollo de un modelo conceptual actualizado de las aguas subterráneas y el balance hídrico, así como para establecer las bases para el desarrollo de un modelo matemático binacional.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Identificar el estado actual del conocimiento con respecto al clima, geología, suelos, cobertura de suelo, uso de suelo e hidrología del acuífero en su contexto binacional.

- Compilar y crear una base de datos de información científica de ambos países.
- Identificar lagunas en los datos e identificar qué datos serían necesarios para actualizar el modelo hidrológico del sistema acuífero en una fase subsecuente, incluyendo las interacciones de agua superficial y subterránea a un nivel binacional.

La CBSP es una de las cuencas más estudiadas en la región, y se ha compilado una base de datos de publicaciones como parte de este proyecto. Los estudios desarrollados previamente incluyen tópicos que van desde la geofísica e hidrogeología, hasta estudios de biología y sobre el ecosistema. Los motores de la economía en cada lado de la frontera internacional son muy diferentes: en la porción de la cuenca que corresponde a Arizona el turismo y la actividad militar predominan, mientras que en la porción de Sonora la minería es la industria más importante. El manejo de agua también es diferente en los dos países. En México, la responsabilidad del manejo de los recursos hídricos recae en el gobierno federal. En los Estados Unidos, ésta recae en los estados, excepto en los casos en que existan recursos hídricos superficiales interestatales. Las aguas internacionales no se gestionan conjuntamente por los dos países, excepto en aquellos casos donde existe algún tratado negociado entre ambos países, como es el caso de los ríos Bravo y Colorado de conformidad con el Tratado de Aguas Internacionales de 1944. En este sentido, no existe en este momento un

acuerdo de alcance general entre ambos países sobre el manejo de las aguas subterráneas.

Tanto en Sonora como en Arizona se llevaron a cabo una gran cantidad de estudios y actividades técnicas durante el transcurso de este trabajo, en un esfuerzo cooperativo entre instituciones académicas y de gobierno de México y los Estados Unidos. El trabajo técnico fue llevado a cabo por el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora (UNISON), la CONAGUA, el Centro de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad de Arizona (UA WRRC) y el USGS. La CILA coordinó el diálogo científico y el intercambio de información que permitieron el desarrollo de este Estudio Binacional de México y los Estados Unidos. El trabajo técnico desarrollado incluye análisis geofísicos, geológicos, hidrológicos, hidroquímicos, de gobernanza y socioeconómicos.

La CBSP se localiza en la porción oriental de la frontera entre Arizona y Sonora e incluye a las comunidades de Cananea, Sierra Vista, Tombstone, Naco y Bisbee. Se encuentra en una zona transicional entre los Desiertos de Sonora y Chihuahua con altitudes que van desde los 1,100 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en la parte localizada más al norte de la cuenca, a los 2,620 m.s.n.m. al este de Cananea y por arriba de los 2,700 m.s.n.m. en las Montañas Huachuca. Tanto los suelos como la vegetación en la CBSP han sido clasificados usando criterios diferentes en cada lado de la frontera y son, por tanto, difíciles de comparar. El clima varía de árido a semiárido, con veranos cálidos y una temperatura

anual promedio que varía entre 12 y 18°C. Temperaturas por encima de los 38°C ocurren con frecuencia en las áreas bajas durante el verano. En el invierno, la temperatura mínima promedio se acerca a los 0°C. La precipitación ocurre principalmente durante el verano e invierno. Las precipitaciones que se presentan durante el verano son en general de mayor magnitud que las que se presenten en invierno, y los lugares más elevados reciben mayor precipitación que los de baja elevación, alrededor de 33 cm por año en Tombstone y hasta 96 cm por año en los picos altos de las montañas Huachuca. La evaporación potencial promedio anual se estima que varía de 1.5 a 2 metros. Los usos de suelo en la porción de Arizona de la CBSP, llamada la Subcuenca Sierra Vista en Arizona (SSVA), son principalmente domésticos, comerciales, industriales y agrícolas. Casi la totalidad del suelo en la SSVA es propiedad de los gobiernos federal y estatal. El uso de suelo de la cuenca en su porción en Sonora, llamada Subcuenca Alta San Pedro en Sonora (SASPS), es primordialmente para la agricultura, el turismo y la minería.

Las unidades geológicas de la CBSP son el producto de una evolución tectónica compleja. La diversidad de estos eventos tectónicos y las deformaciones ocurridas produjeron una región geológicamente compleja. Dentro de la porción noreste de Sonora y la porción sureste de Arizona, las rocas más antiguas forman un basamento precámbrico, el cual está cubierto de una plataforma de secuencias sedimentarias paleozoicas, principalmente carbonatos. Las rocas

más antiguas del Mesozoico dentro de esta región son representadas por una secuencia sedimentaria volcánica del Jurásico. Rocas del Cretácico-Terciario se encuentran ampliamente distribuidas en ambas porciones de la CBSP. La geología de la región en donde se encuentra localizado el acuífero dentro de la CBSP está representada por rocas intrusivas, metamórficas, volcánico-sedimentarias, sedimentarias y volcánicas. Para simplificar el mapeo y descripción de estas unidades en ambos lados de la frontera, una serie de unidades litoestratigráficas y litodémicas informales fueron propuestas abarcando en general a aquellas que tienen una litología y edad similar.

En el lado estadounidense de la CBSP, una serie de estudios tanto geofísicos como hidrogeológicos han sido realizados, los cuales han presentado secciones transversales y del subsuelo. Es muy poco el trabajo previo que se ha hecho sobre las características subsuperficiales de la SASPS. Un trabajo extenso, sin embargo, fue llevado a cabo en la SASPS para este estudio, incluyendo estudios electromagnéticos, gravimétricos y de modelación. Esta información ha sido integrada para definir la estructura de la cuenca en ambos lados de la frontera. Basado en trabajos previos se había propuesto que la CBSP del lado estadounidense tiene una orientación noroeste-suroeste. Dos subcuencas principales fueron identificadas en el lado oeste del Río San Pedro separadas por un alto basamento rocoso por debajo de Sierra Vista. En la SASPS, se estableció que la profundidad hasta el basamento

es principalmente controlada tectónicamente y es altamente variable, siendo encontradas las partes más profundas cerca de la frontera. El relleno sedimentario dentro de la SSVA fue depositado en vertientes estructurales entre las montañas durante el Plio-Pleistoceno. Aunque existen pocos estudios detallados sobre la estratigrafía de estos sedimentos en la SASPS, las características físicas conocidas sugieren que hay una equivalencia con la geología de los Estados Unidos. Estudios previos identificaron en el subsuelo una zona arcillo-limosa dentro del relleno superior de la cuenca alta localizada principalmente a lo largo del cauce del Río San Pedro. Estudios geofísicos realizados en la SASPS, corroboran este aspecto.

El uso del agua subterránea en la SSVA inició a principios del Siglo XX, y se ha incrementado más o menos consistentemente desde alrededor de 1935. Varios sectores económicos son responsables por la mayoría del bombeo en la CBSP, los cuales incluyen el minero, municipal, agrícola-pecuario, industrial y doméstico. Con respecto al lado mexicano, alrededor del 60% del uso del agua subterránea corresponde al sector pecuario, lo cual representa casi más del doble del uso del sector agrícola, que es el segundo consumidor principal. El levantamiento piezométrico presentado incluyó un estudio de pozos, la mayoría de los cuales se encuentran cerca de y hacia el sur de la ciudad de Sierra Vista. Se incluye una serie de hidrogramas como ejemplo de procesos hidrológicos locales y/o de ámbitos geográficos. Los niveles de agua menos profundos de la CBSP se encuentran típicamente

cerca del Río San Pedro u otros arroyos. Las elevaciones de agua subterránea generalmente van en incremento desde el río hacia las montañas, excepto en los conos de depresión y alrededor de las ciudades de Sierra Vista y Tombstone. Han ocurrido incrementos en los niveles de agua en varias zonas, entre las que se encuentran los pozos afectados por la Planta de Operaciones Ambientales de Sierra Vista (EOP: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Sierra Vista) y lugares cerca del río donde el bombeo agrícola se detuvo a mediados del año 2000. Los parámetros hidráulicos fueron derivados del análisis de muestras de campo y pruebas de bombeo disponibles de varios estudios previos. Se derivó información adicional de trece pruebas de bombeo realizadas en Sonora especialmente para este estudio. Además, se encuentran disponibles valores de modelo calibrado de la conductividad hidráulica saturada, anisotropía vertical y rendimiento específico.

Con base en la integración de estudios previos y en la información reciente que se presenta en este estudio, se propuso una clasificación simple de unidades basada en las diferencias de distribución del tamaño de partículas en el acuífero aluvial. Se identificaron tres unidades hidroestratigráficas:

Unidad Hidroestratigráfica 1: Corresponde a la fracción granular más gruesa del relleno sedimentario que es representado por las gravas y arenas. Corresponde a las porciones de una mayor conductividad hidráulica del relleno de la cuenca alta y baja. Esta unidad

tiene la mayor conductividad hidráulica, aunque probablemente disminuye a mayor profundidad, ya que típicamente existe un mayor grado de compactación y la cementación ocurre a mayores profundidades.

Unidad Hidroestratigráfica 2: Esta unidad incorpora los sedimentos finos con conductividad hidráulica baja que abarcan principalmente el relleno superior de la cuenca. Estos limos y arcillas de baja conductividad hidráulica ocurren principalmente en la porción central de la cuenca. Es posible que sean los responsables de las condiciones de confinamiento encontradas en la Unidad Hidroestratigráfica 1. El alcance de estas condiciones confinadas reflejan la extensión de esta Unidad.

Unidad Hidroestratigráfica 3: Incluidas en esta unidad están las unidades rocosas que pueden aglomerarse como acuíferos de roca fracturada, entre las cuales se encuentran las unidades conglomeráticas de la Formación Báucarit, la unidad Tc (ver capítulo 4), y las rocas volcánicas félsicas del Terciario, las cuales yacen entre éstas, así como también en las porciones fracturadas del basamento que posiblemente podrían contener agua subterránea.

La hidrogeoquímica también es un factor importante para comprender las condiciones hidrológicas de la CBSP. En la Subcuenca de Sierra Vista en Arizona, el Departamento de Recursos de Agua de Arizona (ADWR) y el USGS monitorean un grupo pequeño de pozos

anualmente. Además, existen datos generados por agencias estatales, locales y federales, así como también por organizaciones no gubernamentales (ONGs). En Arizona, la calidad del agua es monitoreada por el Departamento de Calidad del Medio Ambiente de Arizona (ADEQ) en coordinación con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA). Los datos sobre calidad del agua para Sonora fueron recabados durante un estudio del acuífero Río San Pedro, el cual se llevó a cabo por el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Se tomaron 20 muestras de pozos de bombeo y se hicieron mediciones de conductividad eléctrica, pH y temperatura. No se tomaron muestras nuevas para Arizona. El tipo de agua subterránea en el acuífero transfronterizo es bicarbonatada cálcica, generalmente alcalina y de salinidad baja. La distribución geográfica de los iones en el agua subterránea indica la presencia de altas concentraciones de calcio y magnesio cerca de las montañas, y concentraciones altas de sodio y potasio en las muestras tomadas cerca del río. Los sólidos totales disueltos en general alcanzan su pico cerca de la frontera. Los patrones de isótopos estables en la SSVA indican que el agua subterránea en el lado oeste del Río es dominada en su mayor parte por una recarga de precipitación de las zonas elevadas de las Montañas Huachuca. Una porción progresivamente mayor de caudal base del río proviene de agua subterránea entre las zonas de Palominas y Lewis Springs. Río abajo, la proporción de agua subterránea del caudal base disminuye.

El comportamiento hidrodinámico del agua subterránea en la CBSP está determinado por factores clave tales como el clima, la geología y el tiempo. La mayor parte de la precipitación se presenta en las partes altas de la cuenca, y es también aquí donde ocurre la mayoría de recarga por medio de la infiltración y percolación profunda en rocas permeables. Otra fuente significativa de recarga ocurre en arroyos perennes y ríos, así como también en canales efímeros. En los sedimentos aluviales de la cuenca, el agua subterránea fluye hacia áreas de descarga a lo largo de los cauces perennes o intermitentes de los arroyos y ríos, a través de la evapotranspiración por freatofitas, y a cuencas adyacentes cuesta abajo/con pendiente descendente. Los manantiales de montaña ocurren comúnmente en elevaciones bajas, en cañones que intersectan fallas o capas de arenisca o caliza que cubren materiales de permeabilidad baja. Hay también una descarga de agua subterránea dentro de la subcuenca Benson a través de sedimentos aluviales. Como lo demuestra la distribución del nivel estático, la mayoría de los flujos de agua subterránea fluyen hacia afuera del ABSP a través del relleno sedimentario cerca y hacia el Este del cauce del Río San Pedro. El flujo base (descarga de agua subterránea en el canal del río) en las cuatro estaciones a lo largo del Río San Pedro va en declive. No ha habido un consenso claro del porqué de esta disminución, pero trabajos recientes que incluyen modelos numéricos, apuntan a causas múltiples, jugando un rol significativo los ciclos climáticos y el bombeo. A

pesar de que los métodos para el cálculo de las tasas de bombeo por sector difieren en cada país, se estimaron valores en categorías similares para el año 2012. La extracción binacional total estimada fue de alrededor de 39.4 hm<sup>3</sup>. El uso mayor es el industrial con 15.2 hm<sup>3</sup> (38.5%), seguido del municipal/público/agua potable con 13.56 (34.4%), agricultura/irrigación 8.27 hm<sup>3</sup> (21%), doméstico/rural 1.79 hm<sup>3</sup> (4.5%) y ganadería 0.60 hm<sup>3</sup> (1.5%).

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

México y los Estados Unidos comparten aguas en varias cuencas hidrológicas y acuíferos que cruzan el límite internacional. Sin embargo, no existe un tratado de alcance general entre ambos países sobre el manejo del agua subterránea de los acuíferos transfronterizos. Tanto México como los Estados Unidos reconocen que, en una región con escasos recursos de agua y con una población en expansión, tener un mejor entendimiento científico acerca de la calidad y cantidad de agua en estos sistemas acuíferos, sería de gran beneficio para la planeación y el manejo de los recursos hídricos en ambos lados de la frontera.

Ante el interés de instituciones gubernamentales y no gubernamentales de México y los Estados Unidos en conocer las condiciones de ciertos acuíferos a lo largo de la frontera común, los Ingenieros Principales de la CILA firmaron el *“Informe Común Referente al Proceso de Cooperación Conjunta México-Estados Unidos Para El Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos”* el 19 de Agosto de 2009. Este “Informe Común” de la CILA representa el marco para la coordinación y el diálogo entre México y Estados Unidos para desarrollar estudios conjuntos sobre los acuíferos transfronterizos (CILA, 2009). El documento clarifica varios detalles del programa como antecedentes, objetivos, funciones y responsabilidades, financiamiento, relevancia de los tratados internacionales del agua, y el uso de la

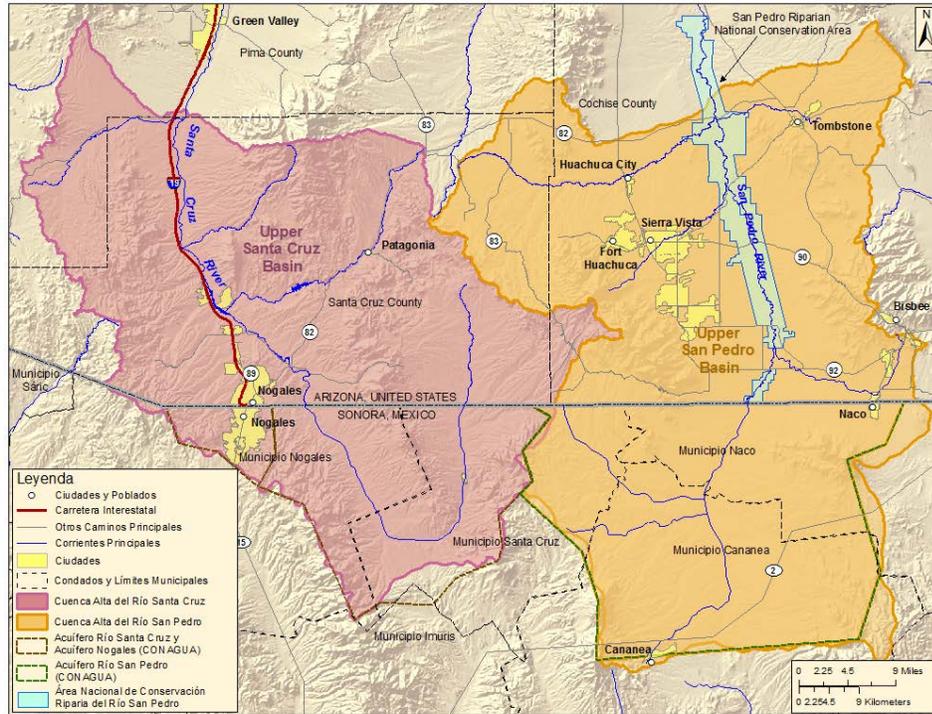
información generada o recopilada como parte del programa.

En la región fronteriza Sonora-Arizona, la CILA, la CONAGUA, el USGS y las Universidades de Arizona y Sonora acordaron llevar a cabo estudios en dos acuíferos prioritarios: uno en la Cuenca del Río San Pedro y el otro en la Cuenca del Río Santa Cruz, los cuales han sido incluidos en los mapas y los reportes sobre acuíferos transfronterizos de la UNESCO (UNESCO, 2007, 2008 y 2010; Figura 1.1). El 15 de octubre de 2010, la Sección mexicana de la CILA firmó dos convenios con la UNISON para su cooperación en la evaluación de los dos acuíferos mencionados. El Departamento de Geología de la UNISON fue el departamento designado por la UNISON para llevar a cabo el trabajo técnico. Las contrapartes académicas de la UNISON en los Estados Unidos para este estudio fueron el Centro de Investigación de Recursos Hídricos (WRRC) y el Centro Udall para Estudios en Políticas Públicas de la Universidad de Arizona (UA). El USGS y la CONAGUA son los co-investigadores principales para este estudio binacional en coordinación y bajo el marco de la CILA.

Por diversas razones, un enfoque en la sustentabilidad del acuífero y del Río San Pedro que lo sostiene, beneficiarían tanto a México como a los Estados Unidos. Estas incluyen el hecho de que el acuífero es transfronterizo; que el Río San Pedro tiene un alto valor ecológico debido al ecosistema ribereño que sostiene; y que los recursos hídricos son necesarios para un

continuo desarrollo. Reconociendo estos objetivos se concretó un acuerdo para integrar datos hidrológicos y otros datos pertinentes de ambos

países y proceder con este estudio binacional conjunto del acuífero transfronterizo del Río San Pedro.



**Figura 1.1 Cuencas Binacionales del Río San Pedro y del Río Santa Cruz**

## 1.2. Área de Estudio

La Cuenca del Río San Pedro (y el acuífero asociado) se encuentra ubicada entre los estados de Arizona y Sonora (Figura 1.2), en una zona de transición entre los Desiertos de Sonora y Chihuahua. Limita al suroeste con la Sierra Mariquita, al sureste con la Sierra Los Ajos y al sur con una cadena montañosa de baja elevación que divide el límite sur de la cuenca. Limita al oeste con las Cuencas de los ríos Cuitaca y Santa Cruz, al este con la Cuenca Douglas-Agua Prieta y al norte con la subcuenca Benson del Río San Pedro. El límite sur de la cuenca se encuentra aproximadamente a 50 km al sur de la frontera

entre México y Estados Unidos en la Sierra los Ajos y la Sierra la Elenita. De norte a sur, a lo largo del límite oriental, está la Sierra San José, las montañas Mule y la porción meridional de las montañas Drought. Al oeste está la Sierra La Mariquita, las Montañas Huachuca y Mustang. El límite septentrional del acuífero está aproximadamente a 43 km al norte del límite internacional, y cruza el Río San Pedro cerca del poblado de Fairbank, Arizona (Coes and Pool, 2005). Los afluentes que están más hacia el sur se originan en Sonora en la Sierra Los Ajos, Sierra la Elenita, y cerca de la Ciudad de Cananea.

La cuenca binacional cuenta con un área de superficie mayor a los 5,000 km<sup>2</sup>. La SASPS cuenta con un área aproximada de 2,892 km<sup>2</sup> (CONAGUA, 2009) y el lado estadounidense cuenta con un área de 2,460 km<sup>2</sup> (Coes and Pool, 2005) (Figura 1.2). Este estudio describe las características del acuífero en su contexto binacional; sin embargo, en su mayor parte el trabajo científico se ha llevado a cabo por muchos años en cada país sin el conocimiento total de las condiciones al otro lado de la frontera. La integración completa binacional de los trabajos previos está más allá del alcance del presente estudio, por lo tanto, fue necesario explicar o describir varios aspectos o tópicos relacionados al acuífero, unilateralmente. Por esta razón, este reporte hace uso de las siguientes cuatro distinciones:

- (1) El área binacional– “Cuenca Binacional San Pedro” (CBSP)
- (2) El acuífero binacional – “Acuífero Binacional San Pedro” (ABSP)
- (3) La porción mexicana – la “Subcuenca Alta San Pedro en Sonora” (SASPS); y
- (4) La porción de E.U.A. – la “Subcuenca Sierra Vista en Arizona” (SSVA)

La frase “Subcuenca Sierra Vista en Arizona” ya ha sido empleada por el ADWR para describir una porción mayor de la Cuenca Alta del Río San Pedro (Putnam et al, 1988). Sin embargo, usaremos la frase “Subcuenca Sierra Vista en Arizona” o “SSVA”, para describir el área en Arizona que está incluida en el Programa de evaluación de acuíferos transfronterizos México-

EE.UU (TAAP) (Alley, 2013; Upper San Pedro Partnership, varias fechas; Pool and Coes, 1999). Los límites del área de estudio utilizados en este reporte reflejan en lo general los parteaguas de la cuenca superficial. Sin embargo, el acuífero binacional es el conjunto de formaciones geológicas permeables o capas que permiten la circulación de agua subterránea en sus poros o fracturas en el subsuelo. La porción mexicana del acuífero Río San Pedro, identificada con el código 2616 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, está localizado en el borde extremo noreste del estado de Sonora, delimitado por los siguientes límites oficialmente delineados (CONAGUA, 2009): en el norte por la frontera México-EE.UU., en el oeste por los límites de los acuíferos de los ríos Santa Cruz y Cuitaca, en el este por el límite del acuífero del Río Agua Prieta y al sur por el límite del acuífero del Río Bacoachi (CONAGUA, 2009). La porción estadounidense del acuífero está delimitada en el oeste por el acuífero Santa Cruz, en el este por el acuífero Willcox, y en el norte por el acuífero inferior SanPedro. En su mayor parte, estos límites de acuífero están delimitados por rocas impermeables o de baja permeabilidad que minimizan las conexiones subterráneas con los acuíferos adyacentes. Porciones más pequeñas de los límites del acuífero están delimitadas por divisiones de agua subterránea o áreas de descarga de agua subterránea (tales como en el límite septentrional del área de estudio).

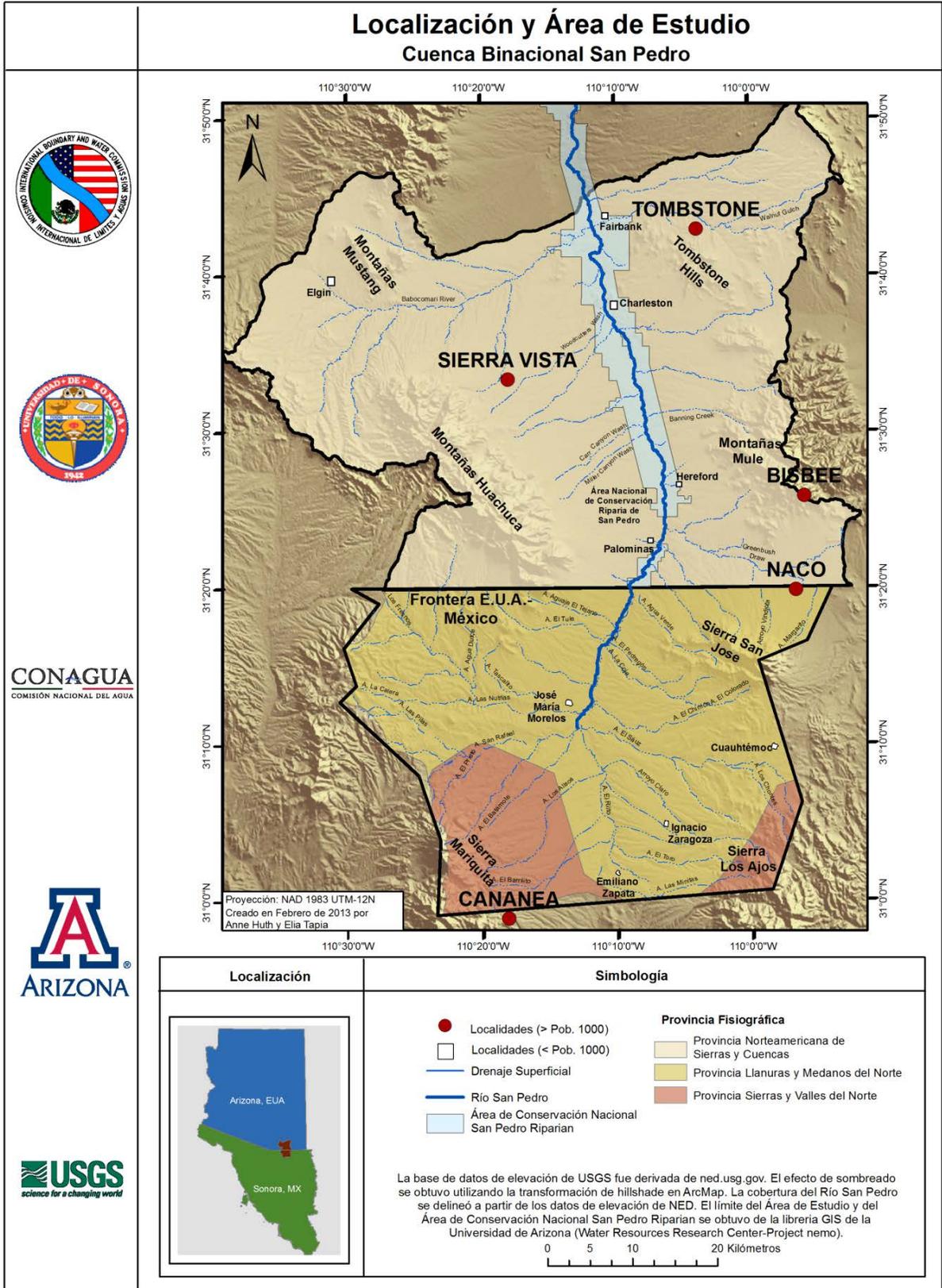


Figura 1.2 Acuífero Binacional San Pedro

### 1.3. Objetivos del Estudio

El objetivo general de este estudio es definir el marco general hidrogeológico del Acuífero del río San Pedro, reunir datos hidrogeológicos y otros que sean relevantes para su evaluación subsecuente a través de un balance de aguas subterráneas y establecer las bases para un modelo matemático binacional del sistema de flujo de agua subterránea.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Recopilar información científica de ambos países con la finalidad de establecer el entorno actual del conocimiento del clima, geología, suelos, cobertura de suelo, uso de suelo e hidrología del acuífero en su contexto binacional.
- Identificar lagunas de información e identificar los datos necesarios para actualizar en fases subsecuentes: el modelo matemático del sistema de flujo de agua subterránea, incluyendo las interacciones de agua superficial y subterránea a un nivel binacional.

### 1.4. Estudios Previos

En el lado mexicano de la cuenca del Río San Pedro, se analizaron estudios previos a fin de analizar el conocimiento sobre diversos tópicos del estudio tales como estratigrafía, geología, economía, geología estructural, hidrogeología, y geología ambiental. Se incluyen estudios de calidad de agua (Gómez-Álvarez, 1997), un estudio de Contreras-Montijo (1986) acerca del funcionamiento del acuífero cerca de Cananea, que representa uno de los primeros estudios publicados en México sobre el acuífero del San

Pedro, así como información más general acerca de las características del acuífero y monitoreo de agua subterránea derivado del Atlas de Agua Subterránea del Estado de Sonora (Rangel et al., 2005) elaborado por la Universidad of Sonora (Rangel et al, 2005) para la CONAGUA. Debido a la naturaleza extensiva de estos estudios, sus datos están incluidos en el Apéndice 11.1. Otro estudio importante es el intitolado *Actualización del Estudio Geohidrológico de las Cuencas del Río San Pedro y Norte del Río Sonora en Cananea, Sonora*, elaborado en el año 2000 por Consultores en Agua Subterránea para el Grupo México, Mexicana de Cananea, S.A de C.V., cuyos resultados se utilizaron para determinar la disponibilidad de agua subterránea para este acuífero, y fueron publicados en la Gaceta Oficial de la Federación Mexicana (DOF) el 13 de agosto del 2007. Un estudio preparado en el 2011 por la UNISON para la Sección mexicana de la CILA incluye evaluaciones climatológicas, geológicas, geomorfológicas, y geoquímicas, así como también sondeo, pruebas de bombeo, actividades piezométricas e hidrométricas, produciendo resultados que forman las bases para la preparación de este estudio (Minjárez et al., 2011).

En el Estado de Arizona la Subcuenca Sierra Vista es uno de los sistemas hidrológicos más estudiados. La lista de estudios hidrológicos realizados en esta región es demasiado extensa como para enumerarlos todos en este reporte, pero existen bibliografías disponibles en la Universidad de Arizona (Sustentabilidad de la Hidrología semi-Árida y Áreas ribereñas - SAHRA),

2010:[http://web.sahra.arizona.edu/publications/documents/SAHRA\\_FinalReport.pdf](http://web.sahra.arizona.edu/publications/documents/SAHRA_FinalReport.pdf)), incluyendo una base de datos bilingüe de publicaciones la cual ha sido desarrollada como parte de este proyecto (<https://wrrc.arizona.edu/TAAP>). Uno de los primeros estudios que considera el agua subterránea fue elaborado por Lee (1905). A éste le siguieron otros estudios con varios niveles de enfoque en el área de estudio, tales como: Bryan, Kirk, y Waring (San Pedro Valley; 1934), Heindl (Upper San Pedro Basin; 1952), Davidson y White (San Pedro Valley; 1963), Hollyday (Tombstone; 1963), and Brown et al (Fort Huachuca; 1966). En 1973, los científicos del USGS Roeske y Werrell publicaron un estudio de las condiciones hidrológicas en el Valle San Pedro, con una discusión sobre la calidad del agua, agua superficial, y recursos de agua subterránea y los efectos en el desarrollo. El vínculo entre el clima y el funcionamiento hidrológico de la cuenca ha sido investigado por un número de investigadores incluyendo a Serrat-Capdevila et al (global circulation models, climate change scenarios, and uncertainty; 2007), Hanson et al (groundwater response to climate cycles; 2006), Thomas y Pool (trends in streamflow and precipitation; 2006), y Dickinson et al (inferring climate-driven recharge rates from groundwater levels; 2004). Por décadas, los estudios hidrogeológicos han sido enfocados en el Área de Conservación Nacional Riverena San Pedro (SPRNCA), establecida por decreto del Congreso de los Estados Unidos en 1988 (Leenhouts, Stromberg and Scott, 2006). Además, una serie de reportes han sido publicados

monitoreando el progreso hacia la sustentabilidad del Río San Pedro. Estos incluyen los reportes anuales elaborados por la Asociación Alto San Pedro (Upper San Pedro Partnership, USPP) sobre el manejo de agua del acuífero regional.

El primer modelo de flujo de agua subterránea a nivel binacional del acuífero fue publicado por Pool y Dickinson (2007). Este modelo matemático incorpora información de muchos esfuerzos previos incluyendo, del lado mexicano los llevados a cabo por la UNISON (Esparza, 2002: modelo de agua subterránea; y Aguinaga, 2002: modelo de agua subterránea), y el trabajo de Coes y Pool (zona insaturada; 2005), Dickinson et al (recarga; 2004), Goode and Maddock (modelo de agua subterránea; 2000), Gettings and Houser (modelación de profundidad y estructuras por gravedad; 2000), Pool y Coes (SVSA hidrogeología; 1999), Coes (restricciones geoquímicas en el flujo de agua subterránea; 1997), Correll et al (modelación de agua subterránea; 1996), Anderson et al (hidrogeología en las cuencas del sur de Arizona y Nuevo México; 1992), Vionnet y Maddock (modelación de aguas subterránea; 1992), Konieczki (condiciones de agua subterránea en la cuenca del San Pedro; 1980), Freethey (análisis hidrológico SVSA; 1982), y Drewes (geología; 1980). Estos y otros estudios se resumirán y discutirán en los subsecuentes capítulos del estudio.

### **1.5. Entorno Socioeconómico Binacional**

La mayoría de los habitantes en la cuenca transfronteriza viven en las ciudades de Sierra

Vista, Arizona y Cananea, Sonora (Tabla 1.1). Cananea y Naco, Sonora son los centros administrativos de los dos municipios con el mismo nombre, los cuales en conjunto cubren la mayor parte del área de estudio en Sonora. Bisbee, Arizona es la cabecera del Condado de Cochise, el cual abarca la mayor parte del área de estudio por el lado de Arizona. La industria minera ha sido y continúa siendo una actividad económica muy importante para la región. En Sonora, Cananea tiene reservas de mineral que incluyen uno de los depósitos de cobre más grandes del mundo y la actividad minera se ha mantenido en ese lugar por más de un siglo (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, 2014). La explotación de plata en Tombstone y la de cobre en Bisbee, Arizona se realizó a gran escala por cerca de un siglo, pero sus operaciones han parado casi por completo (Hollyday, 1963; Pool and Dickinson, 2007; Graeme, 2014). De cualquier manera, la historia minera de la región continúa

sirviendo como una atracción turística. La base militar de los Estados Unidos en Fort Huachuca es la fuente más grande de empleo en esta región de Arizona. La base se localiza adyacente a la ciudad de Sierra Vista y al pueblo de Ciudad Huachuca. Debido a que toda la base de Fort Huachuca ha sido considerada dentro de Sierra Vista, la población en Sierra Vista de alrededor de 44,000 (Oficina de Censos de E.U., Census Bureau, 2010), también incluye a la población de Fort Huachuca. La producción agrícola no es intensiva en la Cuenca Transfronteriza.

Después de establecer el SPRNCA en 1980, alrededor de 800 hectáreas fueron sacadas de producción como parte de un programa federal de los Estados Unidos para proteger el río (ADWR, 2005). En general, la producción agrícola no representa una fuerza económica significativa en la cuenca a un nivel binacional.

Comunidad	Número de residentes estimado (2010)
Sierra Vista, Arizona (incluyendo Fort Huachuca y Ciudad Huachuca)	44,000
Cananea, Sonora	32,000
Naco, Sonora	6,000
Bisbee, Arizona	5,600
Tombstone, Arizona	1,400
Naco, Arizona	1,000

**Tabla 1.1 Población de las Entidades Principales en la CBSP**  
(Datos de población del INEGI, censo del año 2010, y de la Oficina de Censo de E.U.A., 2010)

### 1.6. Marco Binacional sobre Gestión de Agua

Las diferencias significativas en la manera en que los dos países manejan el agua en esta región

de la frontera fueron analizadas en un estudio realizado por la Universidad de Arizona (Megdal and Scott, 2011). Resulta extremadamente importante reconocer estas diferencias

binacionales como parte de la evaluación cooperativa entre ambos países de las aguas transfronterizas, y con este conocimiento, obtener información científica que pueda ayudar en la toma de decisiones acerca del manejo del agua a largo plazo dentro de cada país. El acuífero del Río San Pedro en Sonora pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa II, Noroeste y está sujeto a las disposiciones de los decretos de veda tipo II, donde la capacidad del acuífero sólo permite las extracciones para uso doméstico “*Conservación de los mantos acuíferos del estado de Sonora, en la parte oeste del Meridiano 110° de Greenwich*”, y “*Diversos Municipios del estado de Sonora*”, los cuales incluyen a Naco y Agua Prieta, publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978 y el 24 de septiembre de 1984, respectivamente; en el cual se establece que: “*Excepto cuando se trate de extracciones para usos doméstico y de abrevadero que se realicen por medios manuales, desde la vigencia de este decreto, nadie podrá efectuar obras de alumbramiento de aguas del subsuelo dentro de la zona vedada, sin contar previamente con el correspondiente permiso de construcción otorgado por la Autoridad del Agua, ni extraer o aprovechar las aguas mencionadas, sin la concesión o asignación que expida*”; adicionalmente, dispone que: “*... concederá permiso de construcción para obras, únicamente en los casos en que de los estudios relativos se concluya que no se causarán los perjuicios que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse.*”

De acuerdo a la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2012), el Municipio de Cananea se localiza en zona de disponibilidad 4, Santa Cruz en zona 6, y Naco en zona 7. Los usuarios de agua subterránea más grandes son los industriales (la mina de Cananea) y el público-urbano (proporcionando agua para las comunidades de la región). El acuífero no se encuentra localizado en alguna zona de irrigación o distrito, ni tampoco se le ha establecido un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). De acuerdo con la Ley de los Estados Unidos, los estados son la autoridad principal para el manejo de agua subterránea.

El ADWR regula el uso de agua subterránea de acuerdo con las leyes del estado. Existen cinco áreas del estado designadas como Áreas de Manejo Activa (AMAs) donde el uso de agua subterránea está sujeto a leyes y regulaciones específicas. La agencia estatal ADWR publicó análisis en 1988 y 2005 para determinar si la Subcuenca Sierra Vista calificaba para ser designada como una AMA (ADWR, 2005; Putman et al, 1988). El estudio del 2005 concluyó que el área no califica para la designación de AMA por el gobierno del estado. Una de las regulaciones del Estado de Arizona, que es de mucha relevancia para esta región, es el requisito de llevar a cabo un estudio sobre la disponibilidad de agua por un lapso de 100 años antes de que cualquier desarrollo (de determinado tamaño y densidad) sea aprobado. Si, después de culminar este estudio hidrológico, económico y legal, no puede demostrarse que existe suficiente abastecimiento de agua para 100 años, el

individuo que está vendiendo la propiedad tiene la obligación de revelar los hallazgos del estudio a su comprador antes de cerrar el trato. Sin embargo, la autoridad local, la administración del Condado Cochise, ha aprobado una regulación que prohíbe cualquier desarrollo si el suministro de agua requerido no puede demostrarse que existe y garantizarse por 100 años.

Aunque el estado de Arizona no ha designado a esta área como una AMA para el manejo de agua subterránea, la región tiene un historial de tomar medidas proactivas hacia la sustentabilidad del agua. En 1998 se formó la USPP con 21 organizaciones miembros, incluyendo agencias municipales, estatales, federales y organizaciones no gubernamentales que trabajan conjuntamente para lograr el uso sostenible de agua, así como los siguientes objetivos:

(1) preservar el SPRNCA.

(2) garantizar la viabilidad a largo plazo de la base militar Fort Huachuca.

La coordinación a través de esta Asociación (USPP) ha llevado a la culminación de diversos y amplios proyectos, y a la implementación de políticas por los participantes, tanto individual como conjuntamente. Ellos incluyen la construcción de proyectos de recarga, tratamiento de aguas residuales, programas de conservación, difusión pública, y proyectos para proteger áreas ambientales prioritarias.

## **1.7. Trabajo Técnico Realizado**

Ambas secciones de la CILA coordinaron el diálogo científico y el intercambio de información a fin de hacer posible la preparación de este Estudio Binacional de México y Estados Unidos. Durante 2007-2009, se compiló una base de datos bibliográfica (Vandervoet, 2009), y se llevaron a cabo varias reuniones y estudios de campo en Arizona y Sonora para involucrar a los usuarios de agua y para solicitar comentarios y sugerencias del público en relación al marco de referencia y al programa técnico a implementar en los próximos años (Callegary et al, 2013). La Universidad de Sonora fue contratada por la CILA para realizar un estudio técnico en el acuífero San Pedro en Sonora (Minjárez et al., 2011). El estudio de la porción mexicana del acuífero llevado a cabo por la UNISON en el año 2011, se convirtió en la base de este estudio binacional. Los trabajos de campo fueron realizados durante los meses de febrero a marzo y de mayo a agosto de 2011. Inicialmente, se llevó a cabo un levantamiento de aprovechamientos de agua subterránea, recabando información acerca de un número de pozos existentes y de su localización en coordenadas UTM usando datum WGS 84, el tipo de pozo, su uso, estado operativo (si se encuentra operando, o no), características del equipo, tipo de salida, mecanismos de funcionamiento y aforo. Se hicieron mediciones de los niveles estáticos de agua subterránea (sin bombeo), parámetros físicos y químicos tales como conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (SDT), temperatura, potencial de hidrogeno (pH), potencial redox(Eh),

y salinidad, entre otros parámetros. Inicialmente, se realizaron diez pruebas de bombeo por un periodo corto (entre 6-8 horas); siete de ellos en la batería de pozos de Cananea y tres en otros pozos. Dentro de la SSVA, el USGS ha medido y modelado la escorrentía de ríos efímeros (arroyos) en el área de Fort Huachuca-Sierra Vista y estimado la recarga local (Stewart et al., 2012; Stewart et al., 2014). Junto con estos se ha hecho un análisis de vulnerabilidad de agua subterránea usando el modelo DRASTIC de la USEPA (Lincicome, 2011; Lincicome-Noriega et al., 2011). Este modelo considera variables relacionadas a la infiltración y a la capacidad para la recarga. También fueron compilados datos geológicos, geofísicos e hidrológicos de estudios previos. Toda esta información reunida en ambos lados de la frontera ha sido comparada binacionalmente e integrada toda vez que ha sido posible, con el objetivo de lograr un mejor entendimiento del sistema acuífero que cubre ambos lados de la frontera dentro de la cuenca binacional San Pedro.

### **1.8. Metodologías y Técnicas Aplicadas**

Inicialmente, se recabaron los datos ya existentes de estudios hidrogeológicos, geológicos y geofísicos, y se analizaron una serie de mapas, planos y artículos relacionados al área de estudio. Para preparar un mapa base y los mapas relacionados que han sido incorporados dentro del presente estudio, se usaron mapas topográficos a escala 1:50,000 y modelos digitales de elevación, editados por el Instituto Nacional de Estadística

Geografía e Informática (INEGI), y mapas geológico-mineros a escala 1:250,000, editados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM). De manera similar, fueron compilados datos del USGS y de trabajos realizados bajo el programa binacional conocido como Iniciativa de Salud Ambiental en la Zona Fronteriza entre México y Estados Unidos (BEHI), los cuales fueron incorporados donde fue posible. Ese programa inicio en el año 2004 a manera de colaboración entre el INEGI y el USGS, a fin de poner a disposición del público conjuntos de datos binacionales, lo mejor armonizado posible, y para permitir el acceso a múltiples Sistemas de Información Geográfica (SIG) que se desarrollaron bajo el programa binacional BEHI (Norman et al., 2010). Un GPS de mano Garmin, modelo GPSMAP 60CSx, fue utilizado para el trabajo de campo, así como sondas de 200 m para medir los niveles piezométricos y equipo portátil para medir los parámetros físicos y químicos del agua. También se tomaron muestras para análisis fisicoquímicos, de acuerdo al protocolo descrito en el Capítulo 7: Hidrogeoquímica. En los capítulos 4 y 5 se describe el procedimiento que se siguió para el estudio de datos geofísicos. La hidrología subterránea del acuífero, los resultados del estudio de los pozos, hidrometría, comportamiento piezométrico, y pruebas de bombeo se incluyen como archivos adjuntos. De igual forma, se discute el comportamiento del acuífero, definiendo sus unidades hidroestratigráficas principales, la geometría del sistema y comportamiento, rasgos indicadores y

redes de flujo. Finalmente, se presentan una serie de conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros, junto con las referencias bibliográficas y una serie de apéndices incluyendo información detallada de suelo y clasificación de la vegetación, datos meteorológicos, y ubicación de estaciones de aforo y pozos utilizados para elaborar mapas de los niveles de agua y la geoquímica. Las pruebas de bombeo en Sonora fueron supervisadas y revisadas siguiendo los protocolos de la CONAGUA.

## 2. FISIOGRAFÍA

### 2.1 Provincia Fisiográfica

La CBSP se encuentra localizada en la provincia Norteamericana de Sierras y Cuencas (Fenneman, 1931). Esta provincia está formada principalmente por cadenas montañosas separadas por amplios valles paralelos orientados de norte a sur, con acuíferos localizados en valles delimitados por estas sierras. La altitud de la cuenca en el lado de Sonora varía entre los 1,100 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) en la parte más al norte de la cuenca, y los 2,620 m.s.n.m. al este de Cananea. En el lado de Arizona, en las Montañas Huachuca, la altitud excede a los 2,700 ms.n.m. (Figura 2.1). El INEGI (2005) usa una nomenclatura distinta para la porción mexicana del área de estudio, identificando las provincias fisiográficas como *Llanuras y Médanos del Norte* (Northern Plains and Dunes) y *Sierras y Valles del Norte* (Northern Sierras and Valleys), haciendo referencia a montañas y valles como fueron descritos por Fenneman (1931). Las rocas volcánicas, ácidas y sedimentarias dominan en las montañas; mientras que en los valles abundan materiales sedimentarios continentales (conglomerado del Terciario y aluviones Terciarios y Cuaternarios).

### 2.2 Hidrografía

En la CBSP, los canales efímeros (temporales) y corrientes tributarias son más numerosos y cuentan con una longitud total mayor a la de los canales intermitentes o perennes. El cuerpo

principal de las aguas superficiales en el área de estudio es el Río San Pedro, el cual se origina al norte de Cananea como arroyo El Barrilito que desciende de las montañas Mariquita, y como Las Minitas en la sierra Los Ajos. El Río San Pedro sale de la zona de estudio justo al norte de Fairbank, Arizona en su confluencia con el Río Babocomari y el afluente efímero Walnut Gulch. El Río San Pedro desemboca en el Río Gila en Winkelman, Arizona, el cual hoy en día sólo fluye como corriente efímera al Río Colorado en Yuma, Arizona. El Río Colorado cruza la frontera y desemboca en el Golfo de California en México. Los afluentes principales del Río San Pedro son los arroyos Agua Verde, El Pedregón, La Coja y el Chirrión Colorado, que provienen de la sierra San José. Los arroyos en la Sierra Los Ajos son: Los Patos, El Riecito, El Toro, Las Minitas, y El Claro. En el lado oeste los arroyos principales son: El Barrilito, El Piojo, El Batamote, El Tapiro, La Calera, El Tascalito, El Nogalar, El Tule, Aguaje, y El Tejano, entre otros, provenientes de las montañas de Cananea, La Mariquita y El Tule. La mayoría de los arroyos son intermitentes con excepción del San Rafael y Las Nutrias. En el lado de los Estados Unidos, los afluentes principales en el lado oeste son los arroyos Coyote, Woodcutter's, Graveyard, Garden, Huachuca, y el Río Babocomari. En el lado este, los arroyos Greenbush Draw, Banning Creek, y Walnut Gulch. Todos ellos son efímeros con excepción del intermitente en tramos Río Babocomari.

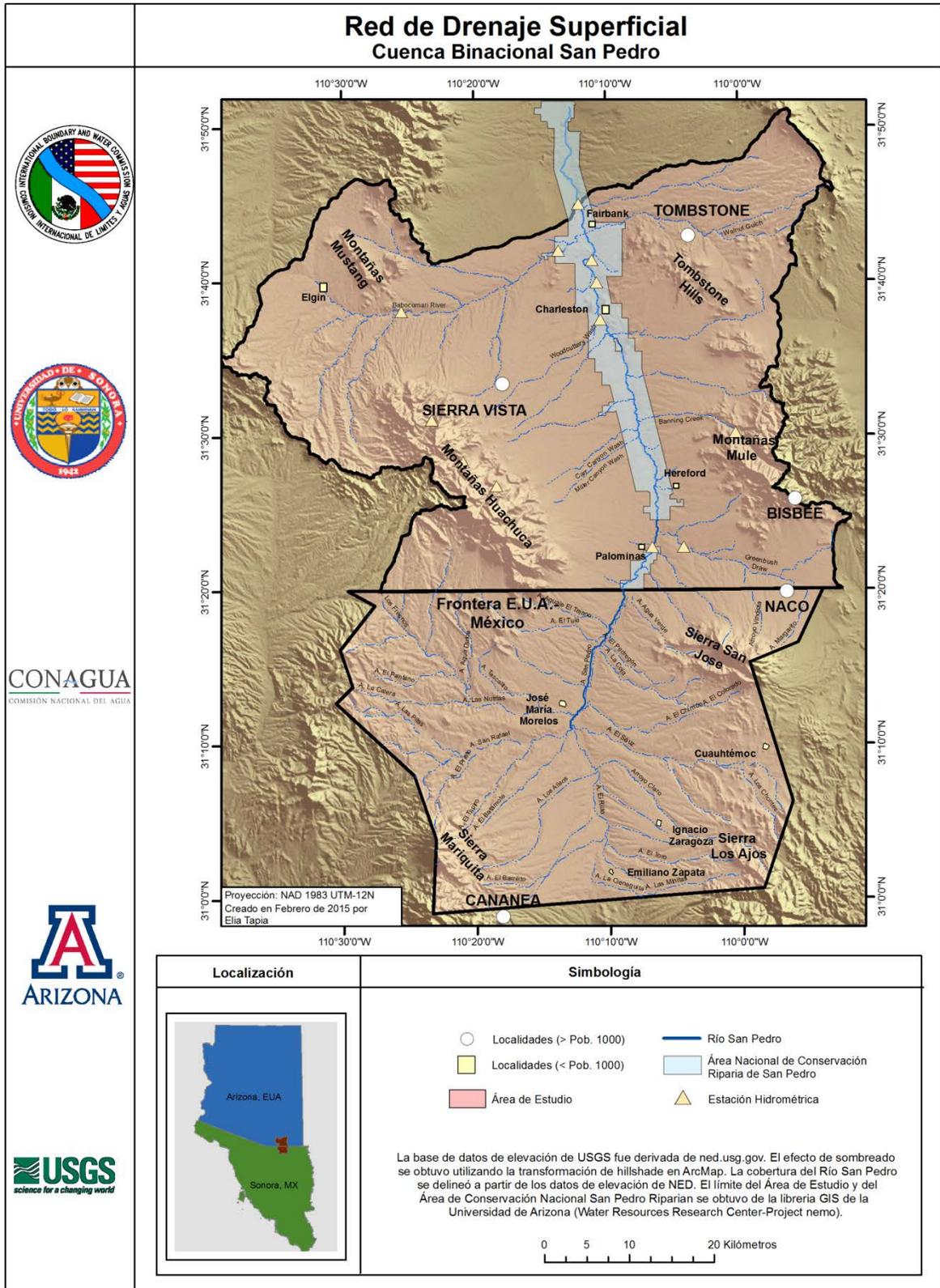


Figura 2.1 Red de Drenaje Superficial en la Cuenca Binacional San Pedro (CBSP).

### 2.3 Región Hidrológica

En total, la CBSP cubre casi 5,000 km<sup>2</sup>. En Sonora, el área de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológica RH7, Río Colorado, de acuerdo a las clasificaciones de la CONAGUA. En su mayor parte, el área de estudio cae dentro de la cuenca de los ríos Gila y San Pedro. Sin embargo, una porción de la cuenca oficialmente reconocida en México se encuentra en otras cuencas, ya que el límite oficial no sigue exactamente al límite de la cuenca. La SASPS tiene un área aproximada de 2,892 km<sup>2</sup>. El acuífero del Río San Pedro ocupa el 99% de la subcuenca que lleva el mismo nombre; el porcentaje restante corresponde al Río Sonora-Arízpe hacia el sur, al arroyo Cocóspera hacia el oeste, y al Río Agua Prieta hacia el este. La SSVA tiene un área aproximada de 2,460 km<sup>2</sup>.

### 2.4 Suelos

La información sobre la distribución espacial de suelos es importante para el entendimiento de los procesos hidrológicos tales como la infiltración, la recarga, y la evapotranspiración. En la CBSP, la mayoría de los suelos proceden de rocas ígneas y sedimentarias. Normalmente, los suelos que fueron depositados en pendientes empinadas y en las elevaciones más altas son poco profundos y de naturaleza gravosa, y algunos incluyen afloramientos de roca. Los suelos depositados en las planicies y en las áreas de inundación son generalmente más profundos y de textura más fina.

Es importante notar que las clasificaciones de suelo empleadas para las porciones del acuífero en

los EE.UU. y México son diferentes, ya que no existe una clasificación unificada (Figura 2.2). En el lado mexicano, se ha usado el sistema de clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (OAA). En el lado de EE.UU., el sistema de clasificación fue derivado de la digitalización del Mapa General de Suelos de Arizona del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) (Kepner et al, 2003). Existen otras bases de datos disponibles con mayor resolución tales como las bases de datos geográficas *State Soil Geographic Database* (STATSGO) y *Soil Survey Geographic Database* (SSURGO) (Soil Survey Staff, 2014), pero con el fin de mantener una resolución comparable en ambos lados de la frontera, estas clasificaciones no se utilizaron. A fin de armonizar la clasificación de suelo en ambas porciones de la frontera, tendrían que llevarse a cabo levantamientos binacionales en base a acuerdos que establezcan la resolución espacial (escala) y los métodos de muestreo, mapeo y análisis. El tiempo requerido para el trabajo de campo dependería de los métodos usados y de la resolución del mapa.

Son cinco los factores más importantes que se consideran en la formación y el desarrollo de suelos: clima, organismos, roca madre, topografía y el tiempo, siendo el clima el más importante (Departamento de Pesca y Acuicultura de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1987). Basado en el sistema de clasificación de suelo de la OAA, la superficie del acuífero Río San Pedro en el lado de

Sonora está compuesta de ocho tipos de suelo, conocidos como Cambisol, Feozem, Litosol, Luvisol, Planosol, Regosol, y Xerosol; cada uno combinado con subunidades de tipo crómico, háplico, eútrico, calcárico y cálcico. La clasificación del suelo en el lado mexicano está basada en las propiedades físicas y químicas de los horizontes del suelo de la zona.

En la SSVA, los suelos se clasificaron por el Natural Resources Conservation Service (NRCS; Hendricks et al., 1985), que es una agencia perteneciente a USDA. Los suelos se clasificaron en grupos o asociaciones de tipos de suelo. Hay 8 diferentes tipos de suelos (asociaciones) en la SVSA que varían dependiendo de la topografía, apariencia, precipitación, temperatura, vegetación, roca fuente, y otros factores- Estos tipos son: la asociación Casto-Martínez-Canelo, la asociación Haplustoll lítico Argiustoll – afloramiento rocoso, la asociación Torrifluvent, la asociación Tubac-Sonoita-Grabe, la asociación White House-Bernardino-Hathaway, la asociación Torriorhents lítica-Haplustoll lítica-afloramiento rocoso, la asociación Latene-Nickel-Pinaleno, y la asociación Nickel-Latene-Cave. Se presenta una descripción de las unidades de suelo y sus subtipos en los apéndices.

## 2.5 Vegetación

La evapotranspiración (ET) es uno de los controles principales en hidrología en climas áridos y semiáridos (Tillman et al., 2012). Los

controles sobre la variabilidad interanual en la ET y el uso de fuentes de agua subterráneas poco profundas y de temporal versus fuentes profundas y estables son complejos y dependen de la configuración topográfica y los conjuntos de vegetación (Scott et al., 2014). Al igual que con los suelos, la vegetación en la CBSP se clasifica de manera diferente en ambos lados de la frontera. Sin embargo, existen similitudes, incluyendo bosques de roble y pino y bosque siempre verde, praderas y matorrales. Varios conjuntos de datos de alta resolución los cuales son actualizados regularmente, se encuentran disponibles en los EE.UU., como la base de datos *National Land Cover Dataset* con 30 m de resolución (Homer et al., 2012) y *CropScape* del USDA el cual se enfoca en cambios anuales en tierras de cultivo y tiene una resolución de 30 a 56 m (Han et al., 2012). Además, la Agencia Espacial Europea promovió un consorcio de agencias para publicar *GlobCover*, una base de datos global de la cobertura de suelo que cuenta con 300 m de resolución, la cual se basa en mediciones de alta resolución (tomadas en el 2009) del Satélite MERIS (Bontemps et al., 2011). Recientemente, la USEPA ha publicado un mapa de la vegetación binacional, específico para el estudio, el cual cuenta con 31 clases (Figura 2.3; Boykin et al., 2014, y Southwest Regional Gap Analysis Project, 2004; Ver apéndice).

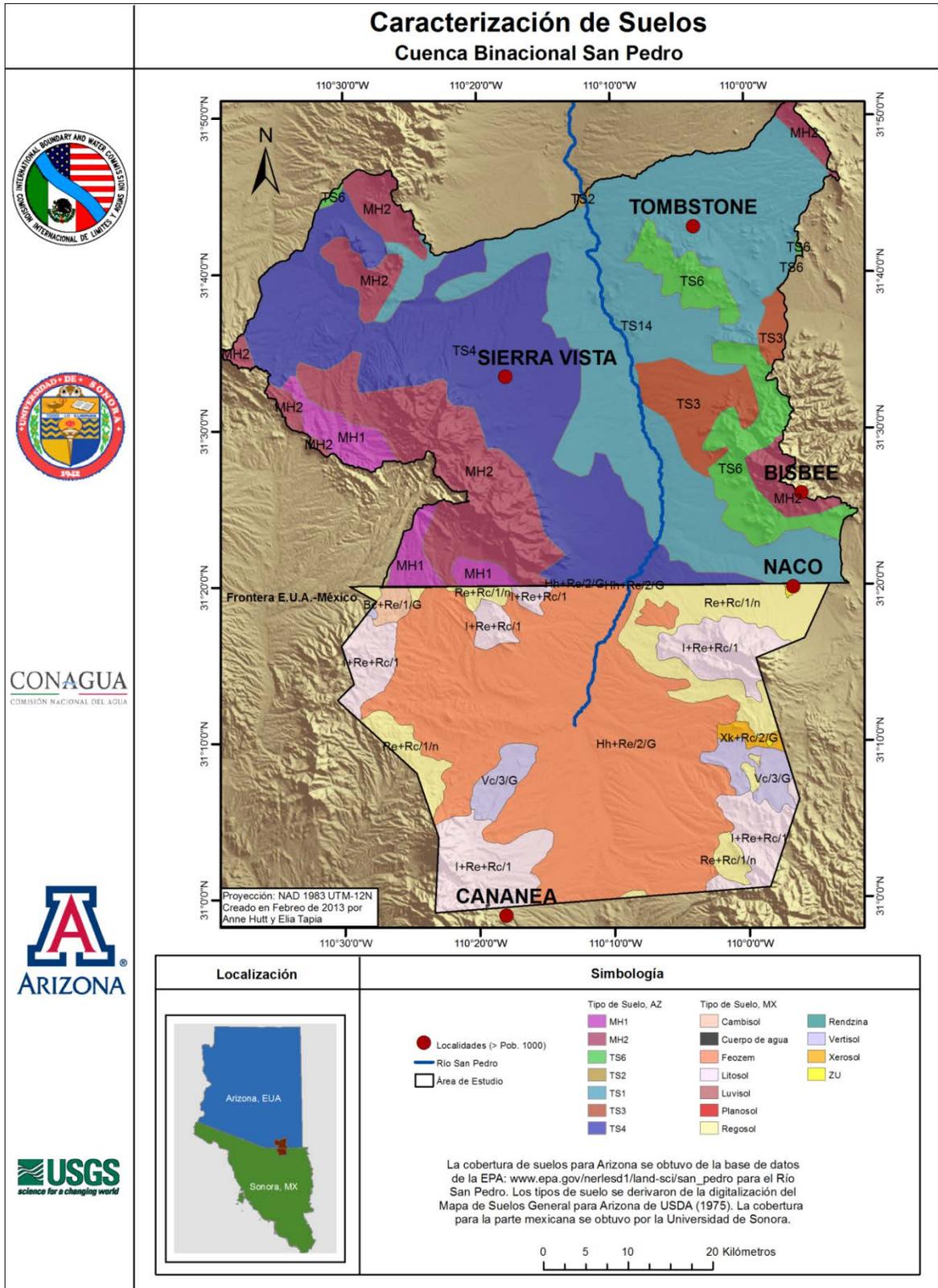


Figura 2.2 Distribución de suelos en la Cuenca Binacional San Pedro.

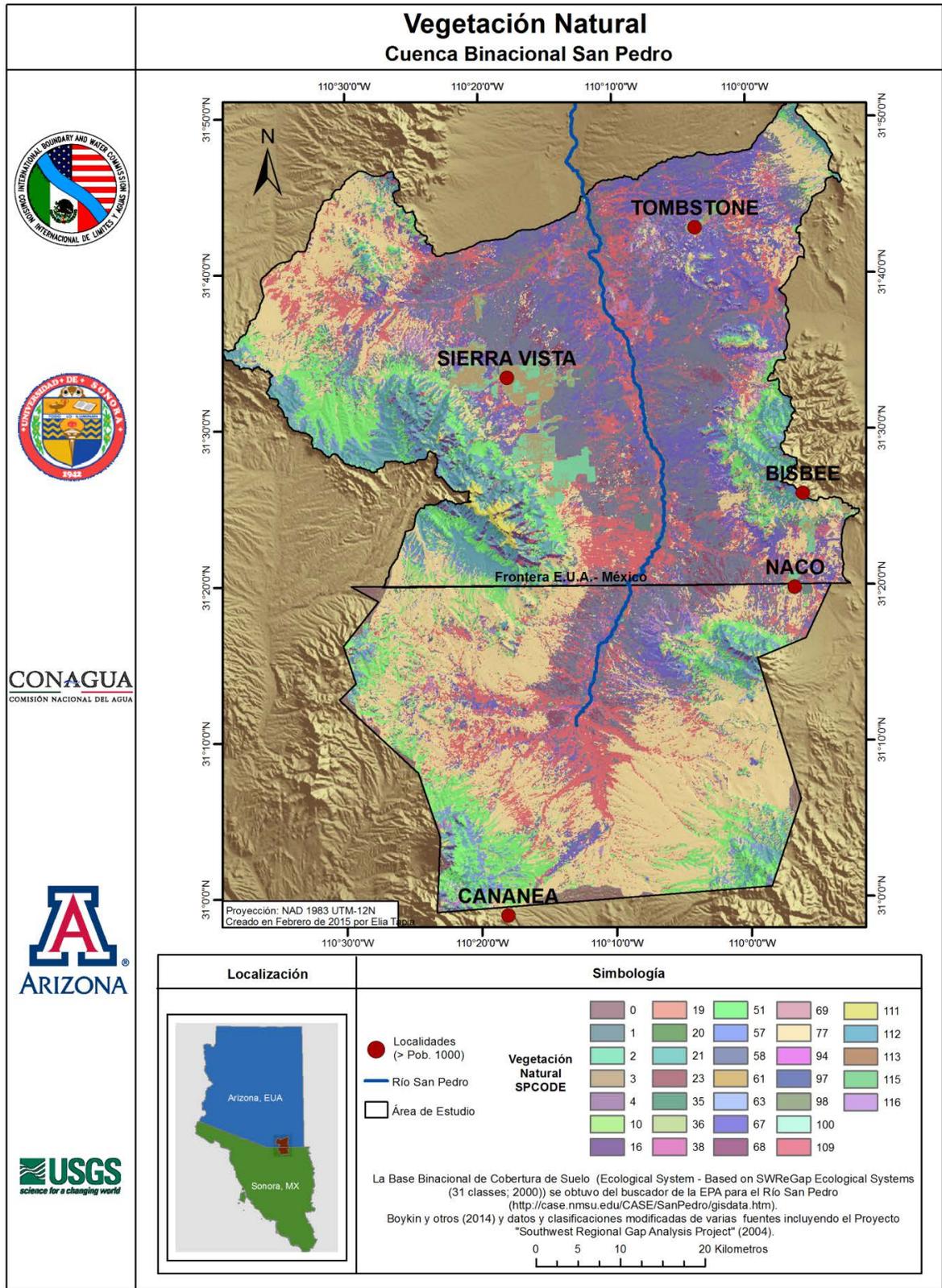


Figura 2.3 Vegetación en la Cuenca Binacional San Pedro (Boykin et al., 2014).

### 3. AGUAS SUPERFICIALES E HIDROMETEOROLOGÍA

#### 3.1 Análisis Climatológico

De acuerdo con la clasificación climática de INEGI (1980, Mapas de Clima 1:1.000,000), así como el Western Regional Climate Center de Estados Unidos (2010), en la mayor parte de la cuenca predomina un clima semiárido, con una asignación en la clasificación de Koppen de clima mediterráneo cálido de verano, para la parte mexicana, y de clima cálido o frío semiárido, para la parte norteamericana (Figura 3.1). Las estaciones climatológicas están dispersas, con la mayoría ubicadas en la parte norteamericana, sin embargo sus datos han sido interpolados a ambos lados de la frontera, para analizar precipitación, temperatura e intensidad de lluvia, entre otros aspectos. La precipitación varía con la altitud (Anderson y otros, 1992) y el período de mayor probabilidad, intensidad y volumen de lluvia coincide con el período que va desde la mitad del mes de junio a octubre (alrededor del 65% de la lluvia total, en promedio). La precipitación de invierno promedia el 20% del volumen total anual (Pool y Coes, 1999). Se considera que el área es templada con veranos cálidos y, como ya fue previamente planteado, con una temperatura anual que varía entre 12° y 18° C con un período de registro entre 1960-2011 (Minjárez y otros, 2011). Entre los meses de junio a septiembre, la temperatura promedio máxima se encuentra entre 29° y 34° C. Durante el verano, la temperatura alcanza los 38° C en las zonas de elevaciones bajas, pero esto es raro que ocurra en las zonas

altas. En invierno, la temperatura mínima promedio es cercana a los 0° C. En junio de 1960, Cananea registró una temperatura máxima de 45° C, mientras que su temperatura mínima registrada de -26° C, ocurrió en febrero de 2011. Las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3, muestran la temperatura promedio anual para la Cuenca Binacional, la temperatura máxima en el mes más caluroso, y la mínima en el más frío. La matriz interpolada con datos climatológicos para la CBSP se obtuvo usando la base de datos *WorldClim* ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)), y se generó mediante la integración de datos de temperatura mensual y precipitación de las estaciones climatológicas de diferentes fuentes, incluyendo la Red Global de Climatología Histórica (*GHCN - Global Historical Climatology Network*), la Organización Mundial Meteorológica (World Meteorological Organization), la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*FAOCLIM - Food and Agriculture Organization of the United Nations World Climate Data*), el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y otras bases de datos regionales (Hijmans et al., 2005). Los datos fueron comparados con estudios anteriores, incluyendo al Grupo Climático PRISM (*PRISM Climate Group, 2013*) y Daymet (Laboratorio Nacional Oak Ridge de los EE.UU. - *Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, 2013*) para evaluar su precisión. La Figura 2.2, Climatología, muestra las estaciones utilizadas en el lado estadounidense del área de estudio; para la porción mexicana, existe información de las estaciones 26057 Naco y

26315 de CONAGUA. Las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6 muestran la precipitación promedio anual para el área del Acuífero Transfronterizo San Pedro, y la precipitación mensual promedio durante los meses mencionados ha sido categorizada como más lluviosa o menos lluviosa (agosto o enero).

Las tendencias climáticas pasadas y pronosticadas en el suroeste de los Estados Unidos han sido resumidas y discutidas en Garfin y otros (2013). Algunos de los hallazgos relevantes de dicho estudio se resumen aquí. Entre 1910 y 2010, las temperaturas diarias máximas en una estación del Condado de Cochise aumentaron entre 2.0 y 3.6°C. Más aún, el período transcurrido desde 1950 ha sido el más caluroso que cualquier otro período de duración similar en los últimos 600 años y posiblemente más (Garfin et al., 2013). La sequía que se presentó del 2000 al 2010 fue la segunda más larga en el último siglo, pero ha habido sequías aún más severas durante los últimos 2000 años (Garfin et al., 2013). En el mismo trabajo se resumen diversos puntos claves sobre el futuro cambio climático regional: Ellos incluyen la proyección de que las trayectorias de clima dependerán en mayor medida de las emisiones de dióxido de carbono. Se prevé que las olas de calor serán de mayor duración y más calientes. Las olas de frío serán menos comunes, pero no menos severas. La precipitación promedio disminuirá con reducciones consecuentes en escurrimiento y en humedad del suelo. Se predice que las sequías serán más calientes, más severas y más comunes. Los cambios en la cobertura del suelo serán significativos debido a cambios en

precipitación, temperatura, almacenamiento de los acuíferos, humedad del suelo, incendios forestales y brotes de plagas en la vegetación. Todo esto causará cambios en la evapotranspiración y contribuirá a cambios en la escorrentía y la calidad del agua.

El vínculo entre el funcionamiento climático y el hidrológico de la cuenca ha sido estudiado por varios investigadores. Price et al. (2005) modelaron la respuesta de la vegetación y la escorrentía en respuesta a escenarios de cambio climático. Específicamente, estos investigadores usaron el modelo de precipitación-escorrentía para estudiar los efectos de cuatro escenarios climáticos distintos, los cuales van de “cálido” a “cálido y seco”, y “cálido y muy húmedo”. Su modelo no concordó con los escurrimientos de verano, pero obtuvieron un resultado razonable con los flujos de invierno. Estos investigadores encontraron que la disminución en la precipitación de invierno y los incrementos en temperatura tenían un efecto mucho mayor en los caudales que los incrementos de temperatura por sí mismos. Cuando la disminución en la precipitación de invierno cayó a un 50% de lo normal, las inundaciones de invierno cesaron. Dickinson et al. (2004) infirieron cambios en la tasa de recarga derivados del clima a partir de los niveles de agua subterránea y Hanson et al. (2006) investigaron la respuesta de variables hidrológicas (niveles de agua subterránea, anillos de crecimiento de los árboles, escurrimientos y precipitación) a ciclos climáticos. En la Cuenca Alta San Pedro, Hanson et al. (2006) encontraron que el grado de influencia que un forzamiento de

clima particular tiene sobre la hidrología probablemente varía a través del tiempo, así como la ubicación en la cuenca (por ejemplo, cerca del frente de la montaña o cerca del Río San Pedro). También encontraron que, en promedio, la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) explica alrededor del 46% de la variabilidad en los datos hidrológicos con un retraso en el efecto entre 9 y 13 meses. Se encontró también que el segundo índice de clima más influyente es El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), el cual explica alrededor del 40% de la variabilidad promedio en todos los tipos de datos y el 59% en los datos de agua subterránea con los retrasos más cortos en los impactos y la correlación más alta en los pozos más cercanos al frente de la montaña. Este efecto de retardo y correlación fue el opuesto al que se encontró con el PDO (Hanson et al., 2006). Serrat-Capdevila et al. (2007) usaron un modelo en 3D de agua superficial-agua subterránea, un conjunto de 17 modelos de circulación global con la precipitación reducida en escala, y 4 escenarios de cambio climático para estudiar la recarga distribuida espacialmente y caudales por el periodo del 2000 al 2010. Manteniendo un bombeo de agua subterránea constante, los investigadores encontraron un decremento en la recarga del 17-30%, una disminución del 31% en la evapotranspiración y una disminución del 50% en el flujo de base.

### **3.2 Precipitación y Evapotranspiración**

La precipitación ocurre principalmente durante el verano y el invierno. Los eventos de

precipitación de verano son por lo general de mayor magnitud que los de invierno. Durante los meses de julio a septiembre, la precipitación promedio es de alrededor de 21 cm in Tombstone y 27 cm en Coronado National Memorial, localizado al sur de las Montañas Huachuca, cerca de la frontera internacional. Durante los meses que van de octubre a marzo, la precipitación en estas dos estaciones cae a 12 y 23 cm, respectivamente (Pool y Dickinson, 2007). La precipitación promedio anual estimada para la Cuenca del Río San Pedro en Sonora es de alrededor de 55 cm (CONAGUA, 2009). Las estaciones situadas en zonas topográficamente más altas reciben más precipitación que las situadas en las planicies (Figura 3.4). La precipitación promedio anual para la Subcuenca Sierra Vista en Arizona durante el periodo de 1989-2012 de cuatro estaciones meteorológicas fue alrededor de 38 cm (Gungle et al., *bajo revisión*).

Las variaciones en precipitación a una escala interanual son también evidentes. Durante los periodos de El Niño se cuenta con una precipitación mayor en el invierno en esta región (Pool, 2005). Variaciones a una escala de década incluyen una mayor precipitación de invierno durante los años 40s y en el período comprendido entre 1956-1997. Hanson et al. (2006) encontraron que la variabilidad en la precipitación (junto con el caudal y el agua subterránea) siguió a la disminución en los PDO en los 40s, pero mostraron desviaciones de los PDO durante el periodo de 1947-1977 que pudo haber sido influido por otros forzamientos climáticos. Las

lluvias de invierno y la escorrentía asociada han disminuido en general durante la segunda mitad del siglo pasado.

Basado en datos de evaporímetros, la evaporación potencial promedio anual estimada para esta región de Sonora es de 2,117 mm (CONAGUA, 2009). De manera similar, la evaporación potencial anual estimada para la región en Arizona es alrededor de 1,651 mm (Universidad del Estado de Arizona, 1975). Tillman y otros (2012) utilizando datos del satélite MODIS estimaron que la descarga anual promedio de agua subterránea (ET) por la vegetación en la Subcuenca Sierra Vista en Arizona para el periodo 2000-2007 es de 200 mm yr<sup>-1</sup>. Scott et al. (2008) estimaron la ET por tres tipos de vegetación ribereña durante el periodo 2003-2005. Ellos reportaron en sitios específicos tasas de

evapotranspiración por descarga de agua subterránea de 490 mm (bosques), 381 mm (montes), y 368 mm (praderas).

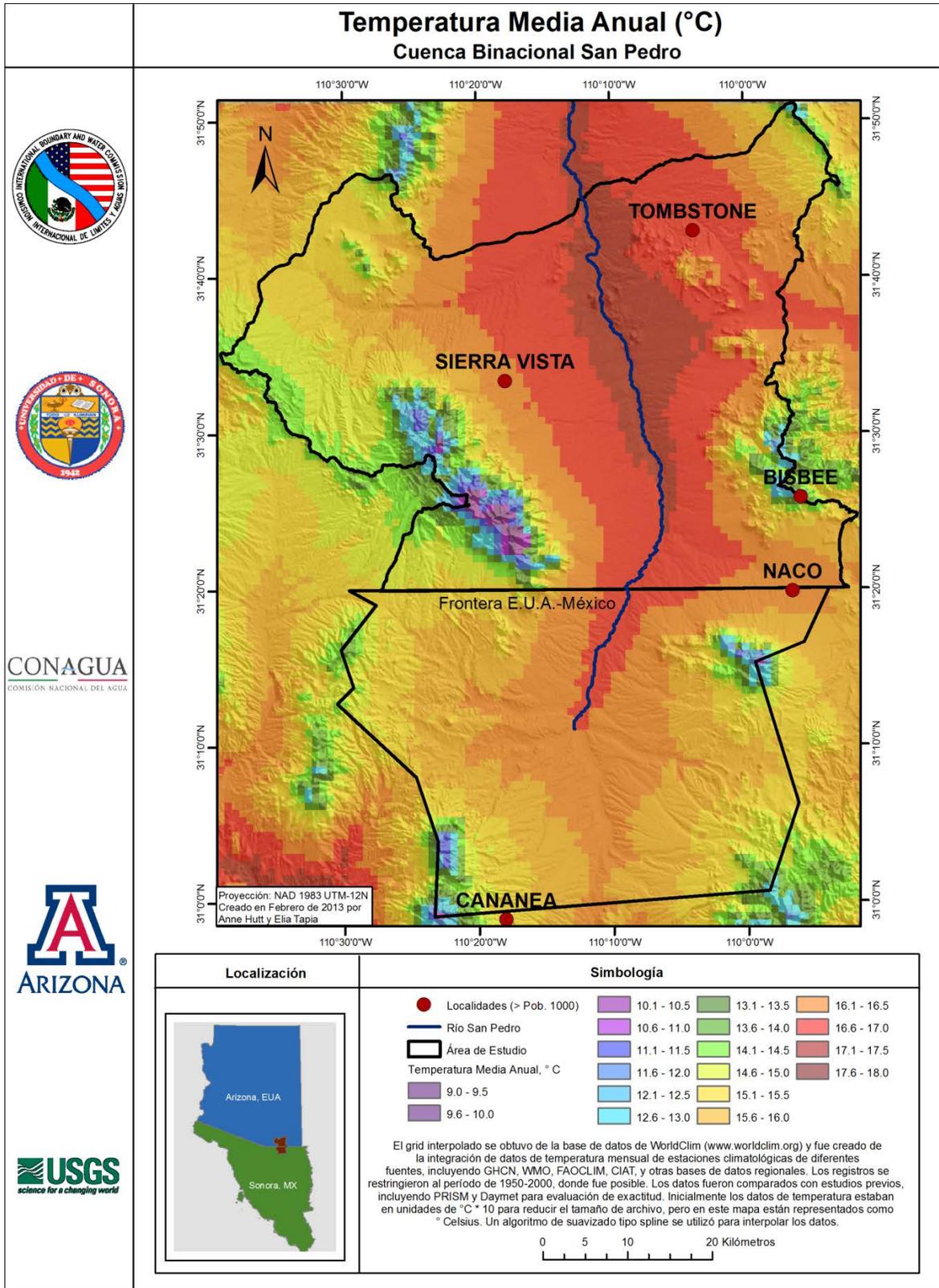


Figura 3.1 Temperatura Promedio Anual en la Cuenca Binacional San Pedro.

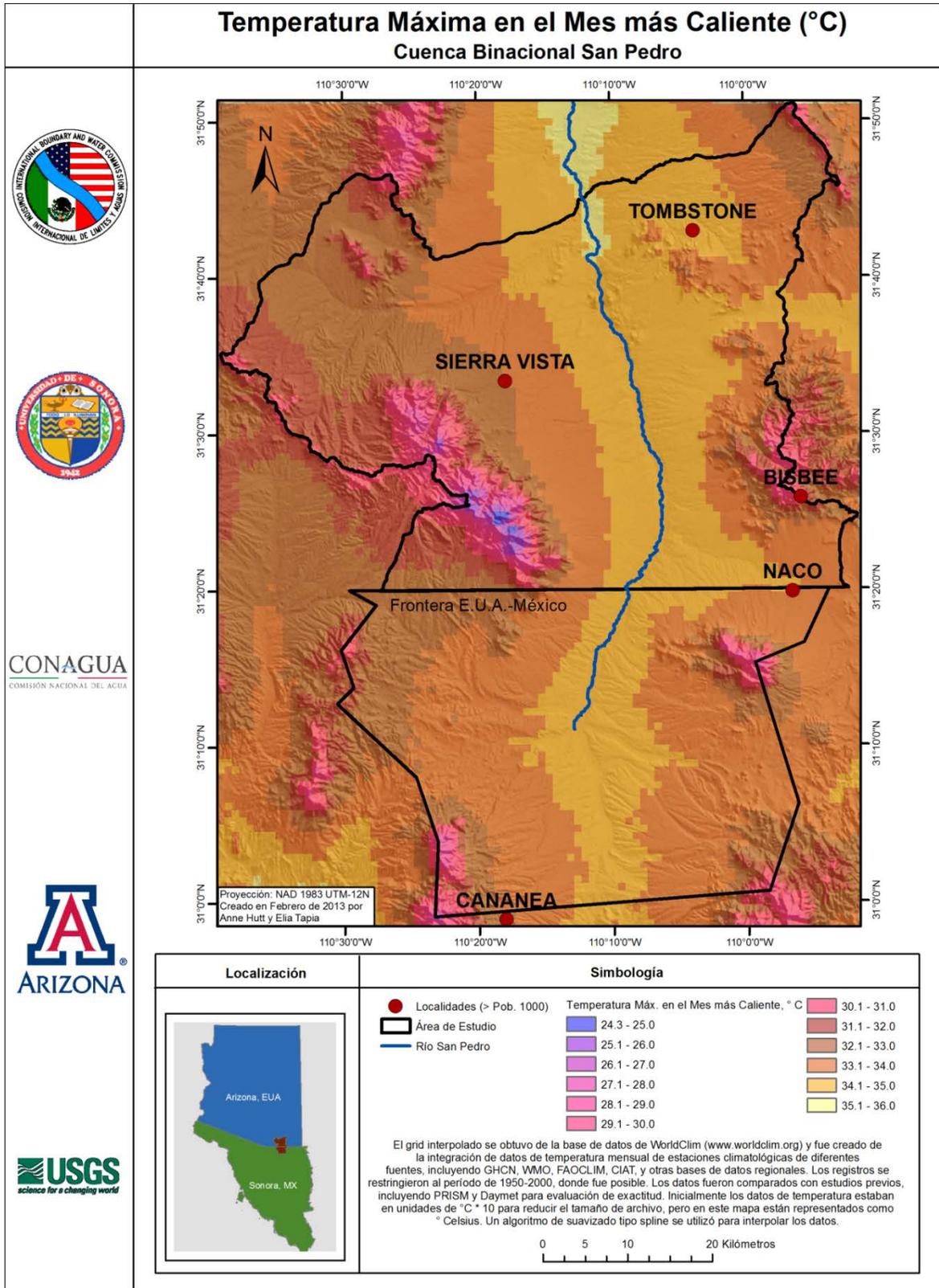


Figura 3.2 Temperatura Máxima en el mes más caluroso en la Cuenca Binacional San Pedro.

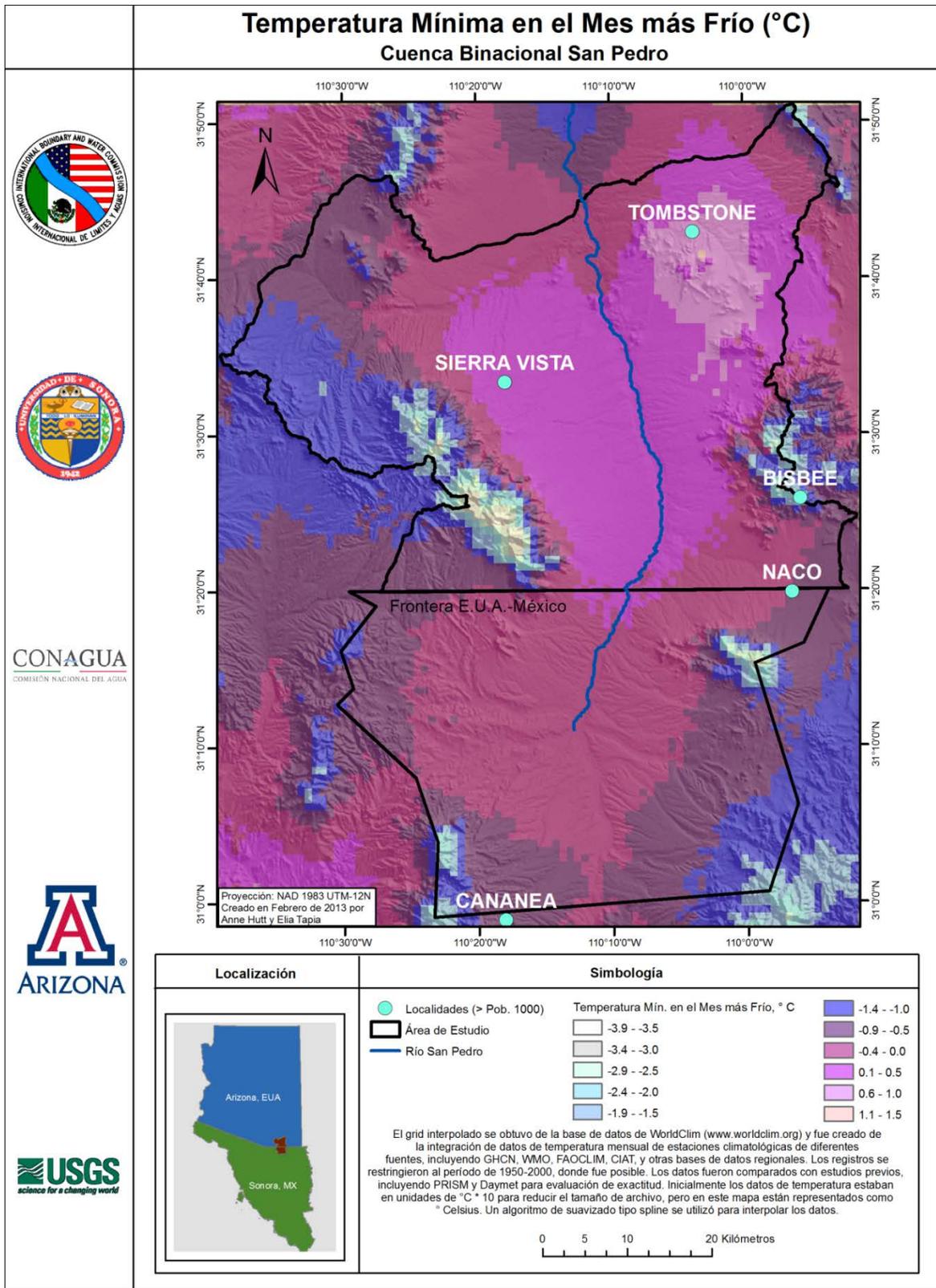


Figura 3.3 Temperatura Mínima en el mes más frío en la Cuenca Binacional San Pedro.

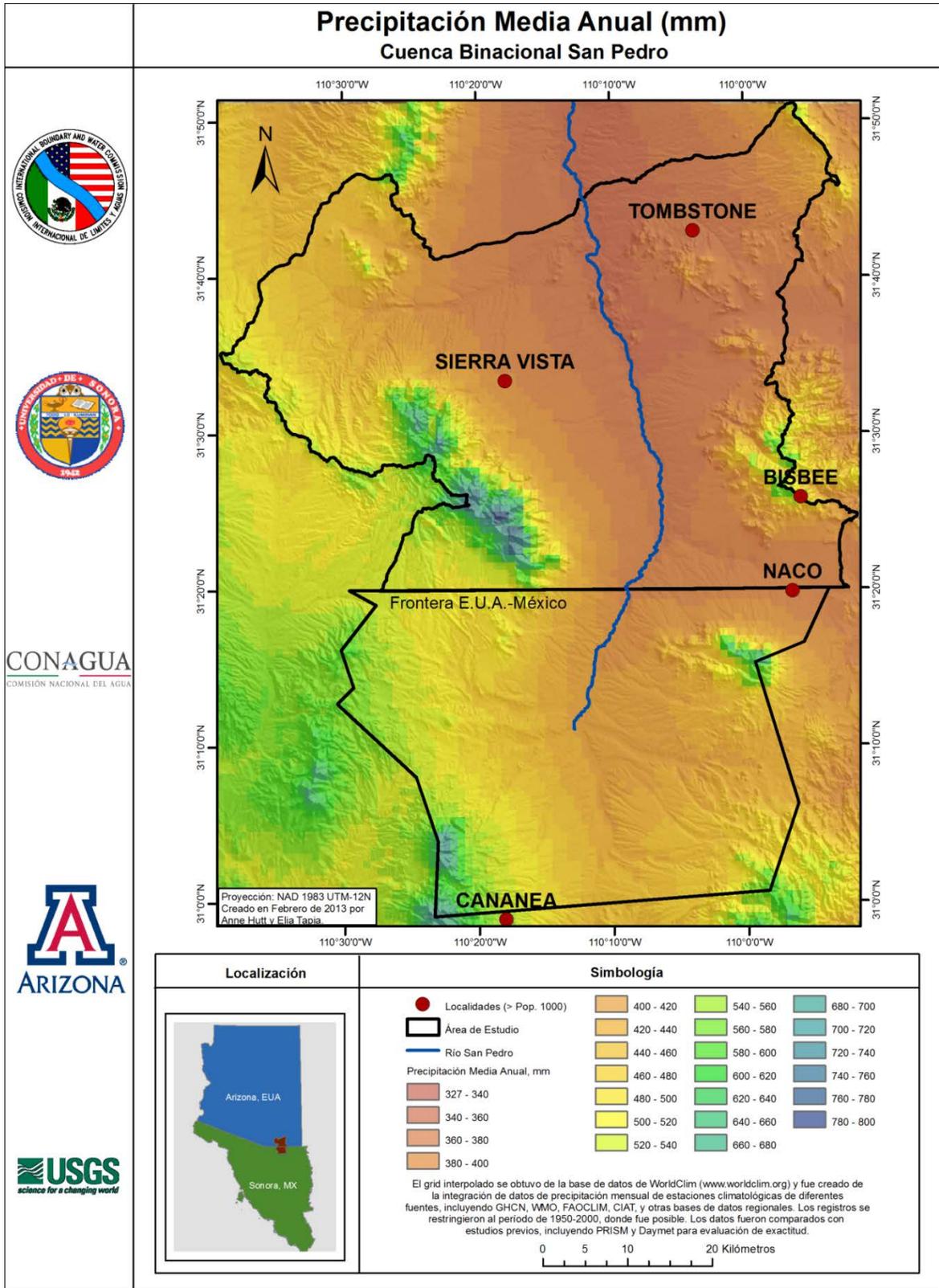


Figura 3.4 Precipitación Promedio Anual en la Cuenca Binacional San Pedro

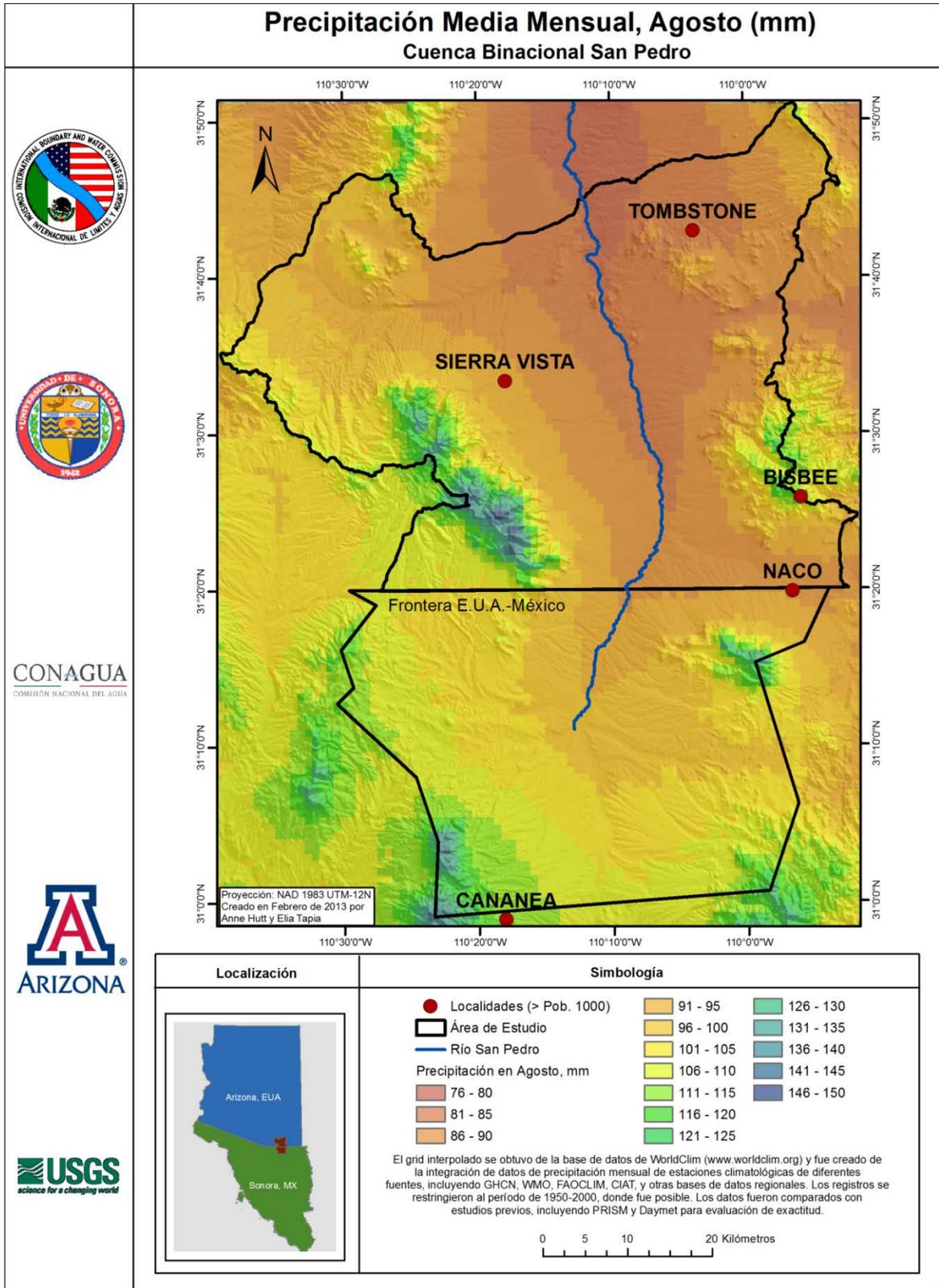


Figura 3.5 Precipitación Promedio en el mes de Agosto en la Cuenca Binacional San Pedro.

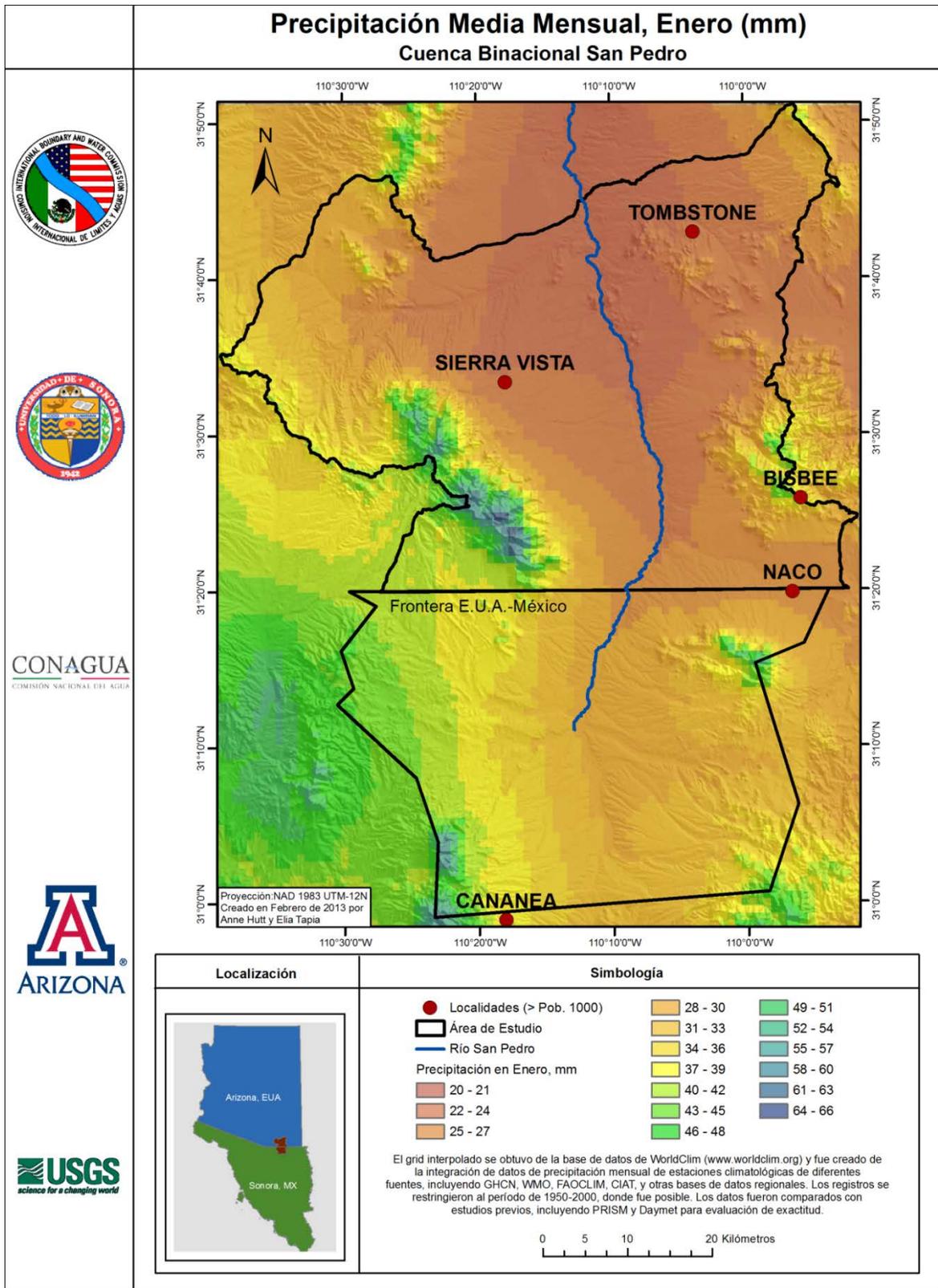


Figura 3.6 Precipitación Promedio en el Mes de Enero en la Cuenca Binacional San Pedro.

### 3.3 Sistema Hidrológico Superficial

Varias secciones del Río San Pedro dentro del área de estudio son perenes. La longitud total del río que comprende al área de estudio es de 62 km en Arizona y 44 km en Sonora (TNC, 2010). La parte alta del Río San Pedro es intermitente, pero, dependiendo de la ubicación, se pueden encontrar tramos individuales perenes, intermitentes o efímeros.

No existen estaciones de aforo de caudal en el lado mexicano de la CBSP; sin embargo, en los Estados Unidos se tienen registros obtenidos de varias de ellas. La estación Palominas (09470500) se localiza a cinco kilómetros de la frontera internacional (31°22'48" Latitud Norte y 110°06'38" Longitud Oeste), donde se ha registrado una escorrentía promedio anual de 0.84 metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s) para el periodo comprendido entre 1951-2010. También existen otras estaciones de aforo las cuales cuentan con registros que van desde unos pocos años a cien años, la de mayor registro es la ubicada en el Río San Pedro en Charleston (09471000) con mediciones que datan desde a principios de 1904. Como resultado de este largo y casi continuo registro, muchos de los estudios llevados a cabo en esta región utilizan la estación de Charleston a fin de estudiar variaciones regionales e históricas. Esta estación se localiza a 14 km al sur del punto donde el Río San Pedro sale del área de estudio; el área de drenaje río arriba de ella es de aproximadamente 3,200 km<sup>2</sup>, 56% del cual es territorio mexicano y 44% es estadounidense (Pool y Coes, 1999).

Registros adicionales de estaciones de aforo se encuentran disponibles para arroyos en las Montañas Mule y Huachuca y en varios de los más grandes afluentes al Río San Pedro de poca elevación tales como Walnut Gulch (Stone et al., 2008) y el Río Babocomari (USGS 09471400 y 09471380). Río abajo, al norte de la estación Charleston se encuentran las confluencias del Río Babocomari y Walnut Gulch con el Río San Pedro. El nacimiento del Río Babocomari se encuentran al lado noroeste del área de estudio en las Montañas Huachuca, cerca de la comunidad de Canelo, Arizona. Walnut Gulch es un arroyo efímero que drena el lado norte de las Montañas Mule y se encuentra localizado cerca del pueblo de Tombstone, Arizona.

Los datos históricos más completos en la cuenca son los de la estación de aforo de Charleston que se ha mantenido en operación desde 1904, aunque ésta fue movida reubicada varias veces antes de 1942 (Pool y Coes, 1999). Thomas y Pool (2006) compararon los datos de la estación de aforo de Charleston con varios factores de la Subcuenca Sierra Vista después de considerar las tendencias de precipitación a fin de explicar la disminución en un 50% en el flujo anual medido durante el siglo XX. Los investigadores concluyeron que un incremento en la vegetación en las tierras altas y ribereñas en la subcuenca era probablemente un factor importante que afecta la disminución del flujo. El bombeo de agua subterránea tuvo una influencia mixta sobre las tendencias en Charleston, la cual fue definida por la ubicación y la cantidad de agua subterránea

bombeada (Thomas y Pool, 2006). Kennedy y Gungle (2010) analizaron el caudal base en la estación de aforo de Tombstone (09471550). La mediana del caudal base durante el período 1997-2009 encontrada fue de 3.55 hm<sup>3</sup> y determinaron que el caudal base se deriva de los acuíferos regionales y aluviales los cuales en su mayoría corren durante los meses de noviembre a mayo. El río se seca en otras épocas del año cuando la evapotranspiración excede a la descarga de agua subterránea. El caudal base se encontró fuertemente correlacionado con el flujo medio diario durante el mes de octubre previo y la precipitación en diciembre y enero. Todas las medidas calculadas indican que existe una disminución en el caudal base durante el periodo de registro (caudal total, fechas de inicio y fin, el número de días del flujo de base, el percentil 25 para el promedio de flujo diario, y el número de días de flujo cero). Gungle y otros (*bajo revisión*) llevaron a cabo un análisis de flujo de base en cuatro estaciones de aforo: Palominas (09470500), Charleston (09471000), Babocomari inferior (094714000), y Tombstone (09471550). Ellos encontraron una disminución en el caudal base en las cuatro estaciones de aforo.

De acuerdo al sistema de clasificación de Strahler (Strahler, 1957), la mayoría de los principales tributarios del Río San Pedro son de orden 4-7. El río en sí oscila de 4-6. En el tramo principal transfronterizo es de orden 6. Alcanza un flujo máximo de orden 7 en el tramo entre la confluencia del Río Babocomari y el límite norte del área de estudio (Figura 3.7).

### **3.4 Pendientes del Terreno**

A fin de determinar las pendientes en la CBSP, se utilizó la base de datos NED del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y los instrumentos de Análisis Espacial en ArcMap 10.0 para determinar el porcentaje de pendientes en el área, las cuales varían de 0 a 65°. Las pendientes más empinadas se encuentran al este de Cananea en la Sierra Los Ajos y en las Montañas Huachuca, en Arizona (Figura 3.8).

### **3.5 Uso y Cobertura de Suelo**

Los principales usos del suelo en la SSVA son doméstico, comercial, industrial y agrícola. La mayor parte de la tierra en la SSVA pertenece a los gobiernos federal y estatal (ADWR, 2009). La base militar Fort Huachuca cubre casi 30,000 hectáreas, principalmente a través de contratos de arrendamiento, y se tiene acceso a 12,000 hectáreas adicionales para sus operaciones. El Servicio Forestal de Estados Unidos (USFS) maneja terrenos muy extensos en las montañas y zonas adyacentes, donde los usos incluyen la recreación, la ganadería y la producción de madera. Otra agencia federal, la Buró de Administración de Tierras (BLM), también controla un porcentaje significativo de la región de Arizona, incluyendo el SPRNCA, la cual cubre alrededor de 23,000 hectáreas. El gobierno del estado también controla un alto porcentaje de las tierras en el lado de Arizona. Aunque estas áreas de Arizona se destinan principalmente para ganadería privada, ellas forman parte de un fideicomiso estatal cuyos beneficios económicos

se utilizan para apoyar a las escuelas públicas. Boykin et al. (2008) crearon un mapa actualizado de cobertura y uso de suelo en la Cuenca del Río San Pedro (Fig. 3.9). El uso de suelo en Sonora se destina principalmente para la agricultura, el turismo y la minería. Algunas de las porciones de la esquina sureste de la cuenca caen dentro de la Reserva Forestal Ajos-Bavispe y Reserva Silvestre. La figura 3.10 muestra los datos de propiedad de suelo en la cuenca binacional. La propiedad del suelo en la porción de Arizona es principalmente estatal, privada, o federal (reserva militar Fort Huachuca, bosque nacional o BLM).

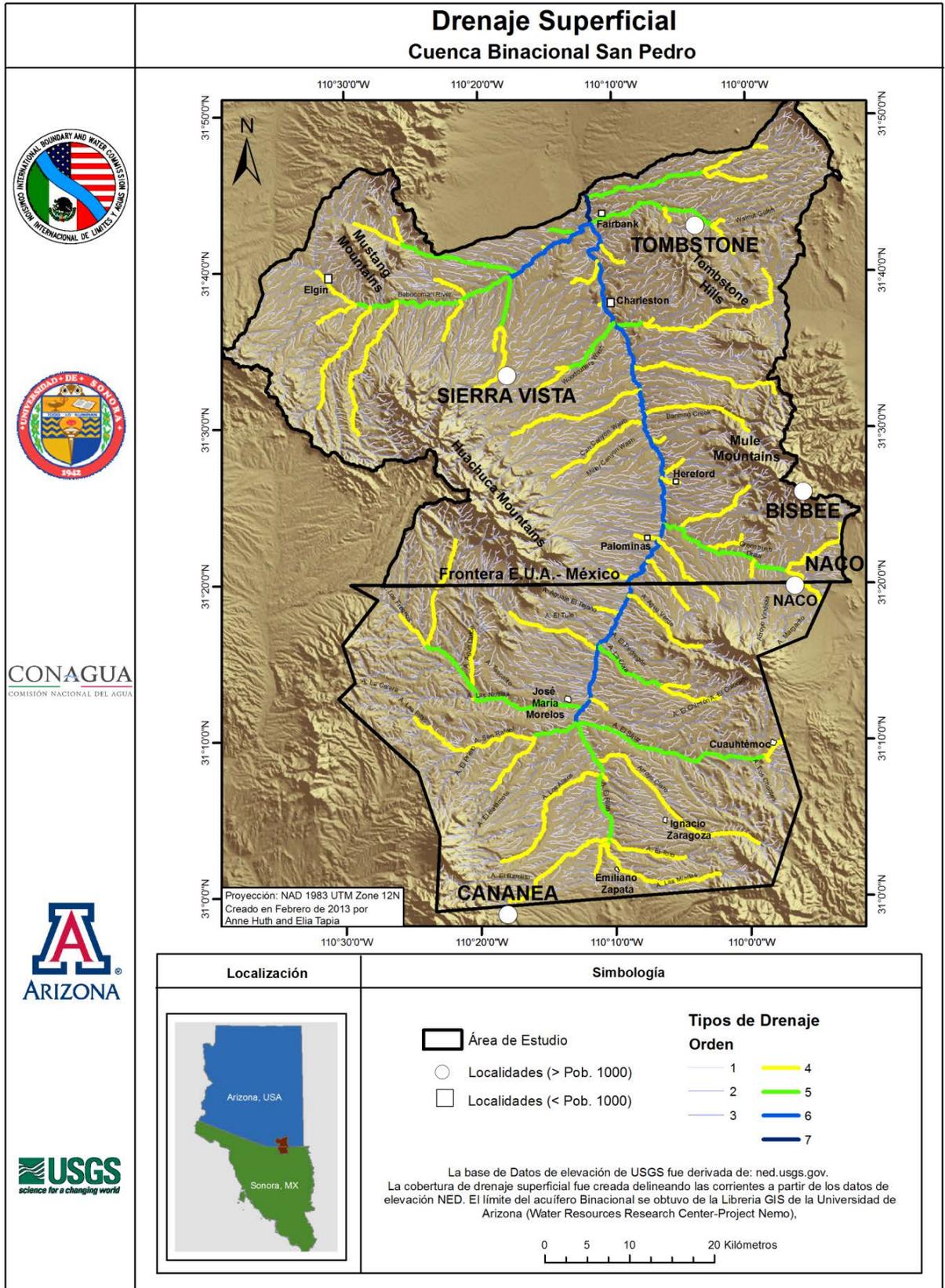


Figura 3.7 Tipos de Drenaje en la Cuenca Binacional San Pedro.

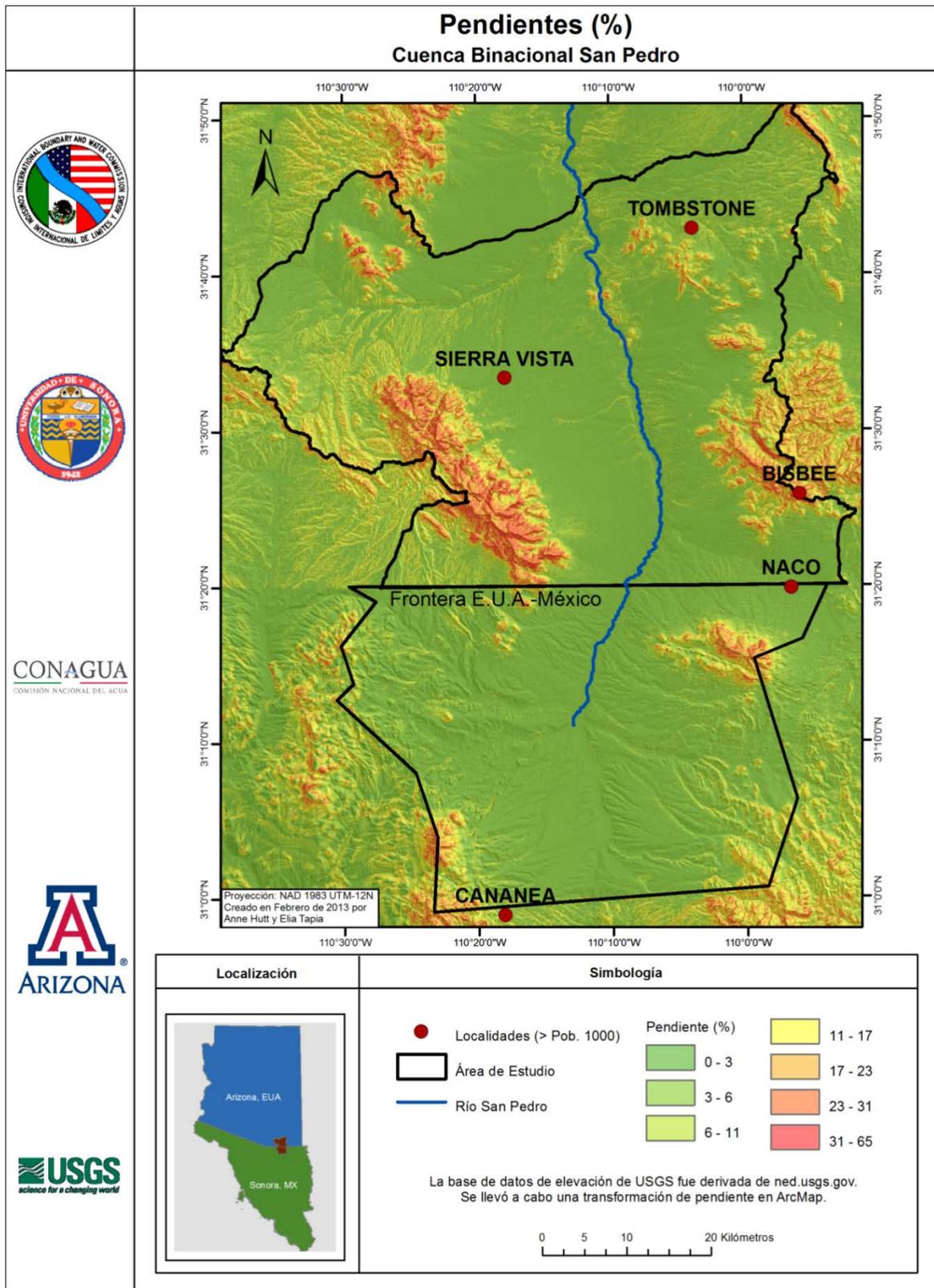


Figura 3.8 Pendientes en la Cuenca Binacional San Pedro.

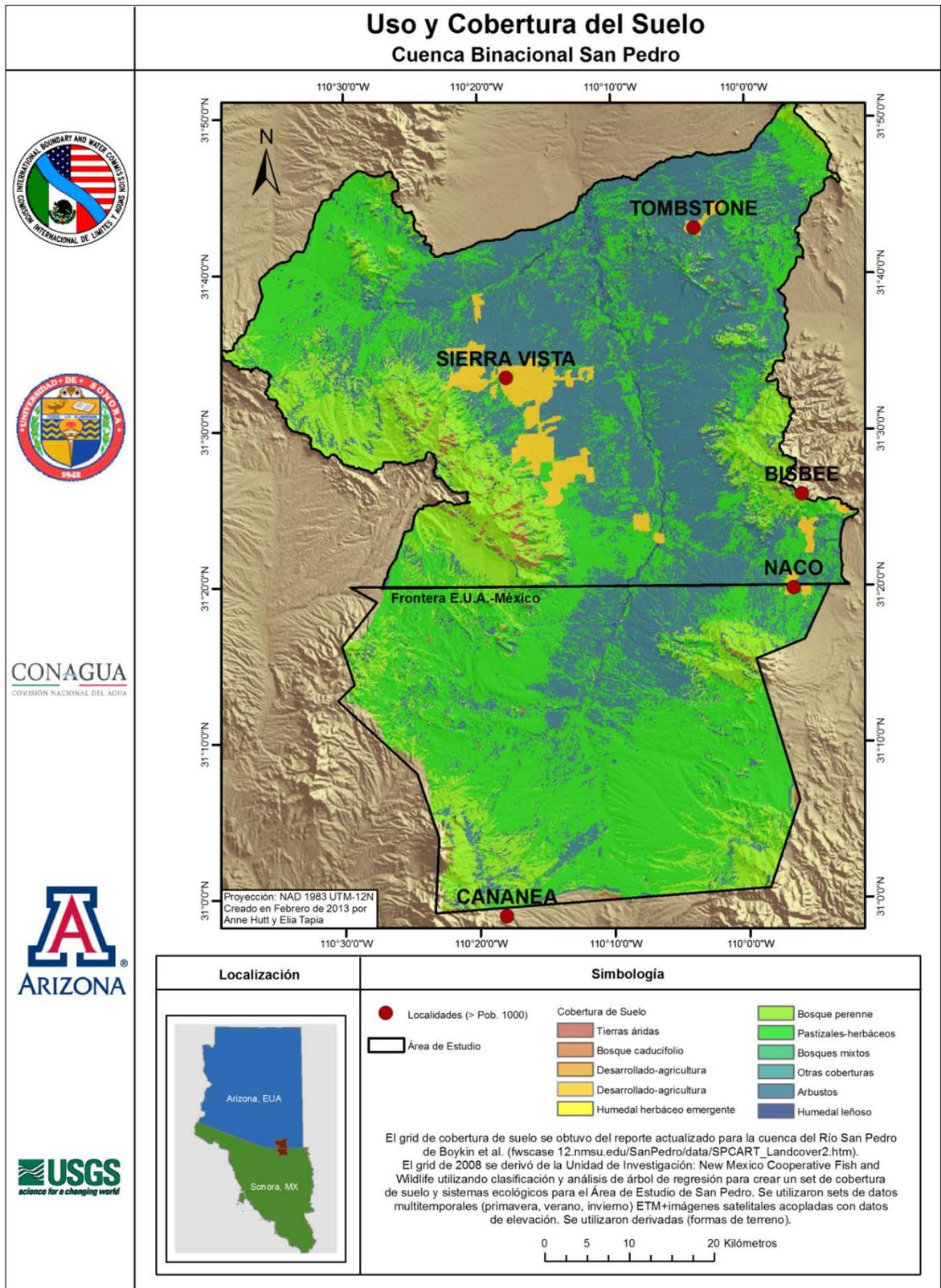


Figura 3.9 Uso y Cobertura de Suelo en la Cuenca Binacional San Pedro.

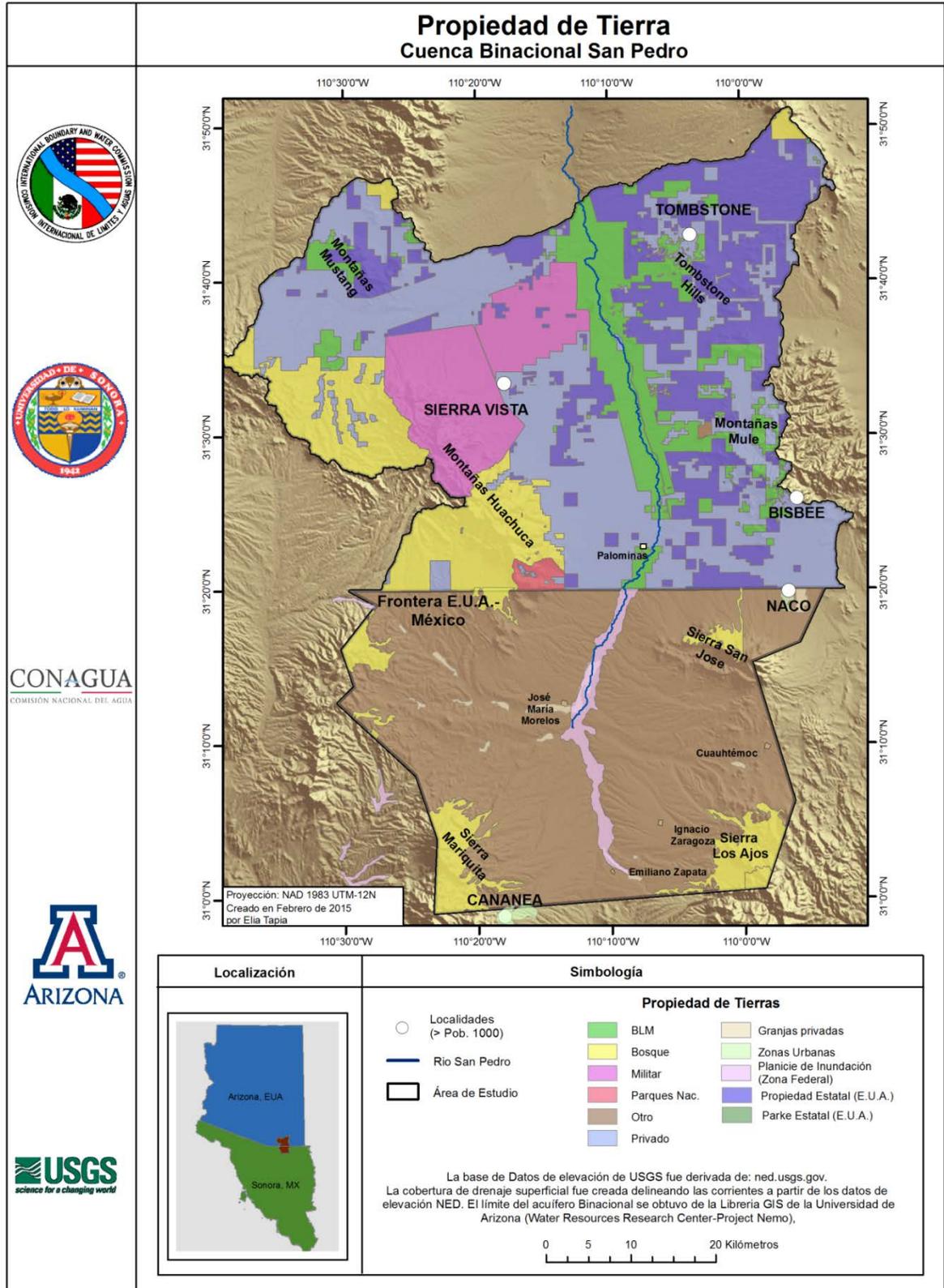


Figura 3.10 Propiedad de Suelo en la Cuenca Binacional San Pedro.

## 4. MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL

### 4.1 Contexto Geológico Regional

Las unidades geológicas que existen en la CBSP son producto de una evolución tectónica muy compleja, cuya diversidad de eventos tectónicos y deformaciones dan como resultado una gran complejidad geológica de la región.

Dentro de la porción NE de Sonora y SE de Arizona, las rocas más antiguas conforman un basamento precámbrico caracterizado por el Esquistos Pinal (1680 Ma) e intrusiones graníticas mesoproterozoicas, cubierto por secuencias sedimentarias de plataforma, principalmente carbonatada y depositadas prácticamente durante todo el Paleozoico. Estas rocas precámbrico-paleozoicas fueron consideradas inicialmente como parte del basamento del Terreno Pinal por Haxel et al. (1980).

Las rocas más antiguas del Mesozoico dentro de esta misma región están representadas por una secuencia vulcanosedimentaria de edad jurásica, que aflora principalmente en las sierras Huachuca en Arizona y Mariquita en Sonora. La secuencia está dominada por riolitas y lahares riolíticos que se intercalan con capas de arenisca de cuarzo. Tectónicamente estas rocas representan el desarrollo de un arco volcánico continental con el depósito de dunas de arena durante el Jurásico (Riggs y Haxel, 1990); además, corresponden al bloque Pápago definido por Haxel, et al (1980) como una región que se extiende desde el centro-sur de Arizona, hasta la porción centro-norte de Sonora, donde las rocas volcánicas e intrusivas

forman parte de este arco magmático continental jurásico.

Las rocas del Cretácico-Terciario se encuentran ampliamente distribuidas en ambas porciones de la CBSP y representan el producto de una serie de procesos geológicos que se llevaron a cabo durante este tiempo. La apertura del Golfo de México en el marco de la evolución de un punto triple (Rueda-Gaxiola, 2004) y el desarrollo de cuencas intra-arco a finales del Jurásico (Busby et al., 2005), permitieron que éstas últimas fueran alcanzadas por la gran transgresión marina del Cretácico temprano, generando la sedimentación que representan las rocas detrítico-carbonatadas del Grupo Bisbee (Ransome, 1904; Dickinson, et al., 1986; González-León et al., 2008). Durante el Cretácico tardío, esta secuencia es afectada por la Orogenia Laramide desarrollando pliegues amplios con ejes orientados NW-SE y una serie de cabalgamientos. En este mismo tiempo se generan las cuencas dentro de las cuales fueron depositados el Grupo Cabullona (Taliaferro, 1933) y la Formación Fort Crittenden (Epis, 1956), representados por una secuencia vulcanosedimentaria predominantemente detrítica, depositada en ambientes continentales fluvio-lacustres (González-León y Lawson, 1995). De manera sincrónica con el depósito del Grupo Cabullona, más hacia el oeste se desarrolla un arco magmático continental, conocido también como “Arco Laramide”, que en la región se representa por una serie de intrusiones de composición granítico-granodiorítica que afectan a las rocas pre-terciarias, incluyendo a su cobertura volcánica

andesítico-dacítica, denominada Formación Mesa en Sonora (Valentine, 1936; Valencia et al., 2006); esta asociación litológica también aflora en la Sierra Huachuca en Arizona (Drewes, 1980).

El producto principal de la migración del arco magmático mencionado en el párrafo anterior hacia el interior del continente, con su retorno subsecuente a la trinchera, fue el volcanismo de la Sierra Madre Occidental durante el Oligoceno y el Mioceno Temprano. Este patrón de migración también fue reconocido para la parte suroeste de la cordillera de Norteamérica entre el Cretácico Tardío y el presente (Damon et al., 1983). En la región de estudio, estos productos se encuentran principalmente representados por el emplazamiento de intrusivos riolíticos (?) y rocas volcánicas predominantemente ignimbríticas (?).

La actividad tectónica más importante a la que ha estado sujeta esta región del NNE de Sonora y SSE de Arizona durante el Terciario medio y hasta el Holoceno, es la extensión intraplaca. Los productos más importantes que generó este evento extensional son una serie de cuencas continentales limitadas por fallas normales, cuyo relleno sedimentario, para aquellas desarrolladas en

Sonora está representado por las secuencias conglomeráticas que incluyen actividad volcánica sincrónica dentro de éstas (Formación Báucarit). A finales del Mioceno, después de los 12 Ma, una reactivación de la extensión provoca el basculamiento de las rocas del relleno sedimentario antes mencionado, así como la actividad volcánica dentro de las cuencas (Ferrari et al., 2005; Henry y Aranda-Gómez, 2000).

#### **4.2 Estratigrafía**

La geología de la región en la que se encuentra el acuífero en estudio dentro de la CBSP, está representada por rocas intrusivas, metamórficas, vulcanosedimentarias, sedimentarias y volcánicas, cuyo registro estratigráfico comprende del Mesoproterozoico hasta el Cuaternario. Con el propósito de simplificar la cartografía y descripción de estas unidades en ambos lados de la frontera, se proponen una serie de unidades litoestratigráficas y litodémicas informales que engloban de manera general aquellas que presentan afinidad en litología y edad (Figura 4.1).

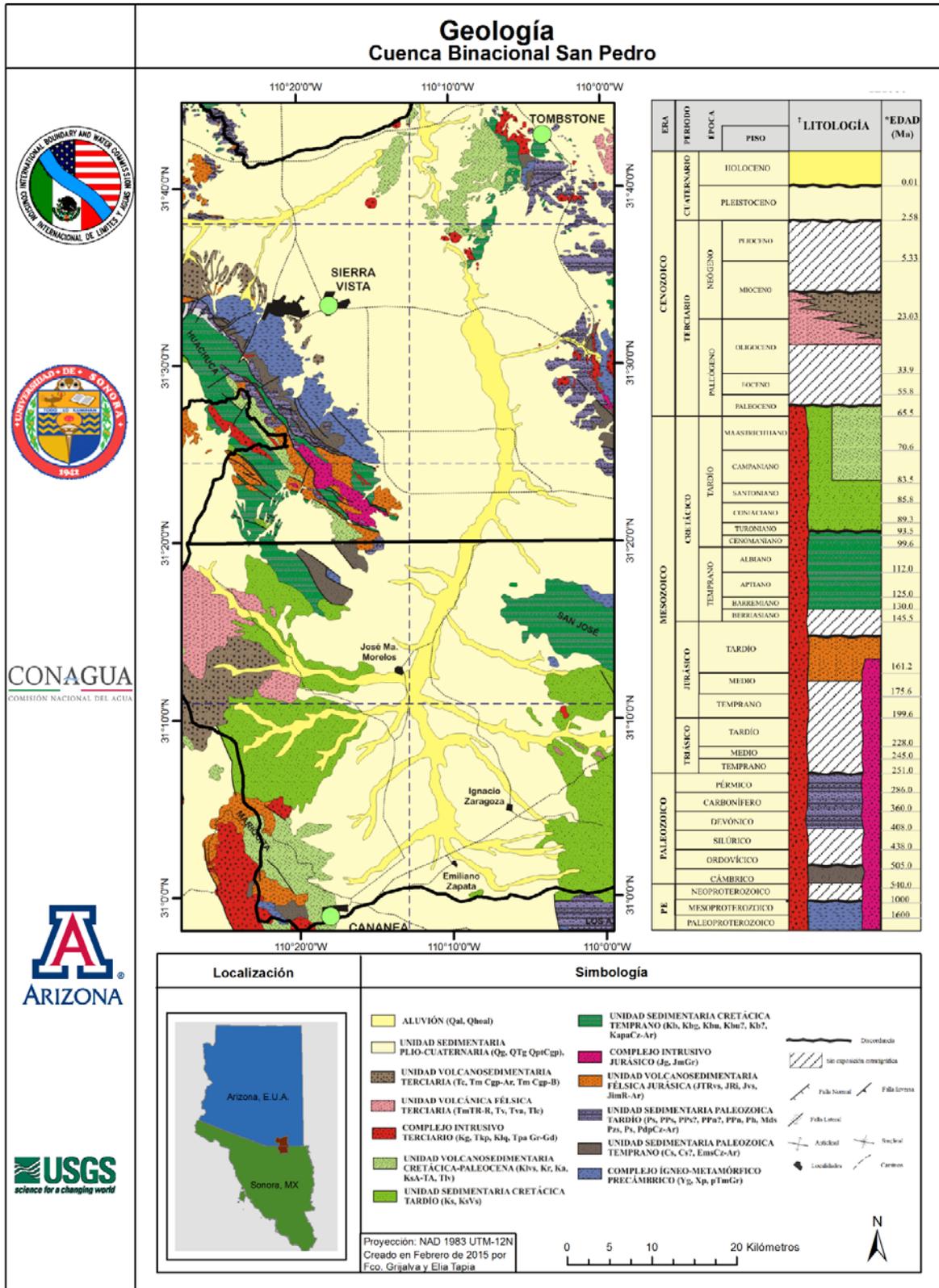


Figura 4.1 Geología de la Cuenca Binacional San Pedro.

### ***Complejo Ígneo-Metamórfico Precámbrico (TmGr, Yg, Xp)***

Esta unidad se propone para incluir todos aquellos afloramientos de rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrica que se encuentran dentro de la CBSP.

Para la porción mexicana se incluye un intrusivo (**TmGr**) cuyos afloramientos se presentan en el flanco noreste del cerro El Caloso, al oeste de la ciudad de Cananea, al noroeste de la Sierra de Los Ajos y la porción norte de la Sierra San José, así como un afloramiento aislado en la parte sur de esta última localidad. Este intrusivo, llamado también Granito Cananea por Emmons (1910) y Valentine (1936), se caracteriza por presentar una coloración de intemperismo de gris claro a rosado con textura fanerítica y composición mineral dominada por cuarzo, feldespato, biotita, muscovita, hornblenda y óxidos de hierro, con cristales de feldespato que pueden llegar a ser mayores a 1 cm de diámetro. Localmente presenta alteración hidrotermal como silicificación-sericitización y está cortado por diques andesíticos y vetillas de cuarzo (sierra San José). De manera general, se considera que este granito forma parte de la serie de intrusiones precámbricas anorogénicas de granito a granodiorita, que se extienden por el suroeste de Arizona y norte de Sonora, con un intervalo de edades entre 1425-1475 Ma (Anderson y Silver, 1977).

Para la porción norteamericana de la cuenca, los afloramientos de esta unidad están representados por dos litologías dominantes. La

primera es una granodiorita de hornblenda-biotita con textura fanerítica (**Yg**) que aflora en los cerros Tombstone y más ampliamente en la porción oriental de las Montañas Huachuaca; se correlaciona con la Granodiorita Johnny Lyon del Mesoproterozoico de las Montañas Little Dragoon que se localizan más al norte de la cuenca. La segunda es una secuencia de esquistos y pizarras (**Xp**) de la Formación Esquisto Pinal definida en el sureste de Arizona; tiene como protolito grauvacas, lutitas, limolitas y lentes de conglomerado, además de flujos riolíticos, lentes de anfibolitas y esquistos de clorita, derivados de rocas volcánicas básicas. Esta última litología aflora en la porción norte de las Montañas Huachuca y en los alrededores de Tombstone.

### ***Unidad Sedimentaria Paleozoico Temprano (EmsCz-Ar, Cs)***

Se propone esta unidad informal para caracterizar una secuencia de rocas detrítico-carbonatadas del Cámbrico que afloran muy localmente dentro de la porción mexicana de la cuenca (González-León, 1986), así como una secuencia detrítica que aflora en la parte norteamericana.

Los afloramientos en el lado mexicano se encuentran al oeste de la ciudad de Cananea y al este del cerro El Tejano en la Sierra del Tule. En estas localidades, la unidad consiste de areniscas de grano medio con granos subredondeados a redondeados de cuarzo cementados por sílice, con estratificación de delgada a media y estratificación cruzada (**EmsCz-Ar**). El mayor espesor de esta secuencia está representado por una caliza de color

marrón a gris con limolitas intercaladas; muestra una estratificación delgada a muy delgada, contiene grietas de desecación y fósiles de trilobites (*Arapahoia* sp.). También tiene una caliza oolítica gris con una estratificación que va de media a gruesa, y otra de color gris claro con intercalaciones y lentes de limolita en capas muy delgadas y con restos de trilobites (*Tricrepicephalus* sp., *Llanoaspis* sp., *Coosella* sp., y *Coosia* sp.). Basado en esta fauna, esta unidad ha sido asignada al Cámbrico medio-tardío, y se correlaciona con la Caliza Abrigo del sureste de Arizona (González-León, 1986).

Para la porción norteamericana de la cuenca, los afloramientos de esta unidad están representados por las litologías de la Cuarcita Bolsa del Cámbrico medio (Cs), que se ubican principalmente en la porción oriental de las Montañas Huachuca, al sur de las Montañas Mule, así como en las inmediaciones de Tombstone. A esta unidad la constituye una arenisca de cuarzo de color gris claro con intercalación local de capas de un conglomerado de color rojizo claro a gris morado, así como de lutitas y calizas.

***Unidad Sedimentaria Paleozoico Tardío (PdpCz-Ar, Ps, PPs, PPs?, PPn, PPn?, Ph, Mds)***

Esta unidad se incluye para agrupar secuencias de rocas sedimentarias, principalmente caliza y arenisca del Devónico-Pérmico que afloran en los principales elementos topográficos altos que delimitan la CBSP.

Dentro de la porción mexicana de la cuenca, los afloramientos principales se encuentran en los cerros El Caloso y El Tejano de la Sierra del Tule

(González-León, 1986), muy cerca de la frontera entre Sonora y Arizona, así como también en el límite sureste de la cuenca, representando los afloramientos más septentrionales en la Sierra Los Ajos. La secuencia basal está caracterizada por calizas fosilíferas de estratificación delgada a mediana que contienen abundantes estromatopóridos (*Amphipora* sp., y *Actinostroma* sp.), briozoos, corales y braquiópodos silicificados del Devónico Tardío.

Discordantemente sobre la secuencia anterior se presentan rocas carbonatadas de estratificación delgada a gruesa con fauna de braquiópodos y corales de edad Tournasiana (Misissípico), y estratos masivos intercalados con capas delgadas que contienen abundantes fusulínidos pensilvánicos (**PdpCz-Ar**). La parte superior de esta unidad Paleozoica es una secuencia pérmica incompleta compuesta de areniscas y lutitas de color marrón rojizo, las cuales contienen varios fósiles tales como gasterópodos, braquiópodos y foraminíferos, incluyendo fusulínidos. Estas secuencias sedimentarias se correlacionan con las formaciones Martin, Escabrosa, Horquilla y Earp, respectivamente, las cuales aparecen en varias partes del sureste de Arizona (González-León, 1986).

En la porción estadounidense de la cuenca, esta unidad se encuentra representada por afloramientos de varias unidades litoestratigráficas del Paleozoico que están distribuidas en las montañas que delimitan la cuenca. En la parte norte de las Montañas Huachuca y Mule y en gran parte de las Montañas Mustang, hay afloramientos

de formaciones pérmicas (Rainvalley, Scherrer, y Concha) que consisten generalmente de calizas dolomíticas y pedernal, dolomías, areniscas masivas y limolitas rojizas (**Ps**). En estas localidades también afloran unidades detrítico-carbonatadas del Pensilvánico-Pérmico (**PPs**, **PPs?**), incluyendo dolomías intercaladas con areniscas y lutitas rojizas (Dolomía Epitaph), calizas negras intercaladas con areniscas y lutitas (Caliza Colina), calizas y dolomías en capas delgadas y masivas que intemperizan a un color rojizo o naranja (Formación Earp). En la porción sur de las Montañas Huachuca, también se encuentran afloramientos detrítico-carbonatados (**PPn**, **PPn?**) que incluyen secuencias de las Formaciones Rainvalley, Scherrer, Concha y Epitaph.

Tanto en los Cerros Tombstone como en la porción norte de las Montañas Huachuca, se encuentran afloramientos de la Formación Horquilla del Pensilvánico, la cual incluye una caliza gris azul intercalada con capas delgadas de lutitas rojizas (**Ph**). En las partes altas al este de las Montañas Huachuca y en la parte norte de las Montañas Mule, afloran las rocas más antiguas de esta unidad, las cuales caracterizan a formaciones del Devónico-Mississípico (**Mds**), que de manera general, tienen una litología representada por caliza gris oscura y lutita calcárea de color gris rosáceo (Caliza Martin), así como caliza gris claro de grano grueso con abundantes fragmentos de crinoideos (Caliza Escabrosa).

*Unidad Vulcanosedimentaria Félsica  
Jurásica (Jim R-Ar, JRvs)*

En esta unidad se propone incluir una secuencia interestratificada de rocas volcánicas, areniscas, aglomerados, flujos basálticos, sills y domos de composición intermedia de edad jurásica.

Dentro de la porción mexicana de la cuenca, los afloramientos principales de esta unidad se encuentran en la sierra La Mariquita, así como algunos otros locales en al norte del área (Valentine, 1936). En estas localidades existe una secuencia vulcanosedimentaria calcoalcalina que consiste de flujos y tobas riolíticas, interestratificada con aglomerados, andesitas y dacitas (**Jim R-Ar**); si bien es cierto que no se tienen edades radiométricas dentro de esta secuencia, Wodzicki (2001) la considera del Jurásico medio al tardío (165 a 150 Ma).

Los afloramientos en la porción norteamericana de la cuenca incluyen una secuencia de tobas y flujos de composición riolítica que se intercalan con areniscas eólicas, flujos andesíticos y algunas capas rojas continentales (**JRvs**), se localizan en gran parte de los Cerros Canelo y en la región sur de las Montañas Huachuca, así como también de manera amplia en las Montañas Mustang, al norte de la cuenca.

#### *Complejo Intrusivo Jurásico (JRI, Jg)*

Esta unidad se propone para agrupar una serie de cuerpos intrusivos e hipabisales que afloran principalmente en la porción norteamericana; sin embargo, varios intrusivos de una escala no-mapeable pueden ser considerados dentro de esta unidad, aparecen en la sierra San José como

diques y sills, así como también en la base del lado poniente de la sierra Los Ajos.

En las Montañas Huachuca, muy cerca de la frontera, se presenta un cuerpo intrusivo de composición granítica (**Jg**) que afecta a las secuencias paleozoicas, precámbricas y jurásicas. Por otra parte, en la porción sur de los Cerros Canelo, afloran plutones, diques y sills de composición granítica (**JRi**), afectando a la secuencia vulcanosedimentaria jurásica.

***Unidad Sedimentaria Jurásico tardío - Cretácico temprano (KapaCz-Ar, Kb, Kb?, Jbg, Kbu, Kbu?)***

En esta unidad se pretende incluir rocas sedimentarias del Jurásico superior - Cretácico inferior, que en ambos lados de la frontera están representadas por las formaciones del Grupo Bisbee (Dumble, 1902; Ransome, 1904).

Los afloramientos de esta unidad dentro de la porción mexicana de la cuenca se encuentran hacia el noreste y representan un área importante de la sierra San José, donde predominantemente se exhiben las Formaciones Morita y Mural (**KapaCz-Ar**). En esta localidad se tiene expuesta una secuencia detrítico-carbonatada constituida por una alternancia de calizas, areniscas, limolitas y lutitas. Las calizas son de color gris con estratificación mediana a gruesa, con bioturbación y un contenido fosilífero dominado por pelecípodos, ostras, gasterópodos, rudistas, corales, equinodermos, algas y microfauna (*dictyoconus sp.*, *Textularia sp.*, *miliólidos*, *Orbitolina sp* y foraminíferos planctónicos), asociación faunística típica del Aptiano-Albiano

(Araujo-Mendieta y Estavillo-González, 1987). También se presenta como calizas arcillosas de color gris oscuro con estratificación delgada. La arenisca es de color café rojizo a morado rojizo, de grano fino a medio y con estratificación mediana. La limolita es calcárea, de color café claro con laminaciones y la lutita es de color café rojizo con variaciones a verde claro y con estratificación delgada.

En el lado estadounidense de la cuenca, los afloramientos de esta unidad se tienen principalmente en las Montañas Huachuca y en los Cerros Tombstone. En la primera localidad, la litología dominante representa afloramientos del Conglomerado Glance (**Jbg**), los cuales tienen una composición de clastos que puede incluir calizas y areniscas del Paleozoico, esquisto y granitos del Precámbrico, y rocas volcánicas del Jurásico; además, hay una secuencia sedimentaria que, aunque no diferenciadas litológicamente, es equivalente a las unidades superiores del Grupo Bisbee (**Kbu, Kbu?**). En los Cerros Tombstone hay afloramientos de lutitas y limolitas intercaladas con areniscas, conglomerados y calizas (**Kb, Kb?**), los cuales también son considerados como parte de esta unidad.

***Unidad Sedimentaria Cretácico Tardío (KsVs, Ks)***

Esta unidad se propone para incluir todos aquellos afloramientos dominados por secuencias sedimentarias del Cretácico Tardío que ocurren dentro de la CBSP.

En el lado mexicano de la cuenca, esta unidad se extiende ampliamente dominando los

afloramientos situados al oeste y al este del gran valle fluvial desarrollado en la porción central por el Río San Pedro, con los afloramientos más representativos en las inmediaciones del Ejido Cuauhtémoc. La unidad litoestratigráfica representativa es el Grupo Cabullona (**KsVs**), y en general consiste de una arenisca de color marrón claro y gris claro a verde, de grano fino a medio y localmente de grano grueso, con estratificación delgada a media y mineralógicamente dominada por cuarzo, feldespato, mica, y óxidos de hierro cementados por calcita; en algunas áreas se presenta como una arenisca tobácea. También ocurren dentro de la secuencia: 1) lutitas de color marrón oscuro que intemperizan a un marrón amarillento y gris claro, y una riolita blanquizca, pseudoestratificada, ligeramente caolinizada, y con capas de ceniza volcánica verde; 2) limolitas marrones que intemperizan a un marrón amarillento, con estratificación media; 3) conglomerados marrón claro y marrón rojizo, con clastos de riolita, granito, toba y caliza subredondeados y redondeados en una matriz arenosa; y 4) andesita de color gris claro que se intercala con la arenisca tobácea y el conglomerado. Basado en estudios paleontológicos, el Grupo Cabullona se ha asignado al Campaniano-Maastrichtiano tardío (Lucas et al., 1995).

Afloramientos de esta unidad en la porción estadounidense de la Cuenca se restringen a la parte oeste de las Montañas Huachuca, donde están principalmente representados por rocas sedimentarias detríticas (**Ks**). Eventualmente,

estos afloramientos pueden corresponder a la Formación Fort Crittenden en Arizona.

#### ***Unidad Vulcanosedimentaria Cretácica-Paleocena (KsA-TA, Klvs, Kr, Ka, Tlv)***

Esta unidad se propone con el objetivo de incluir una serie de secuencias predominantemente vulcanosedimentarias de composición intermedia, las cuales incluyen rocas clásticas y volcánicas riolíticas intercaladas.

En la parte mexicana de la cuenca, esta unidad está representada por la Formación Mesa (**KsA-TA**), la cual se encuentra expuesta principalmente en la porción suroeste de las montañas Mariquita y en los alrededores de Cananea (Valentine, 1936). En estos afloramientos, la andesita es de un color gris verdoso, con textura de porfírica a afanítica y una composición mineralógica dominada por oligoclasa-andesina, mica, apatito, óxidos de hierro y minerales de alteración como epidota, minerales arcillosos, sericita, clorita, hematita y calcita; en algunas localidades se presentan facies de latita. La toba andesítica es de color gris verdoso y gris claro con tonos morados, textura afanítica-porfírica, estratificación media a gruesa e intercalada con areniscas tobáceas y aglomerados. El aglomerado andesítico es de color gris verdoso, con clastos de varios centímetros de diámetro de rocas de composición intermedia en una matriz de tobácea. El conglomerado polimíctico presenta un color gris a marrón verdoso, con clastos subangulosos y subredondeados de caliza gris claro, tobas andesíticas, andesitas y riolitas porfídicas, en una matriz arenosa, y que varían en tamaño desde gravas a bloques. La arenisca, la

cual se encuentra en capas medias intercaladas con las rocas previamente descritas, es de grano medio, bien clasificada, de color gris violeta y marrón amarillento con tonos verdosos. La secuencia completa muestra efectos de alteración hidrotermal tales como propilítica, argílica, oxidación y sericítica. Se asigna al Cretácico Tardío-Paleoceno a partir de una datación radiométrica de  $69 \pm 0.2$  Ma (Wodzicki, 1995).

Los afloramientos de esta unidad en el lado estadounidense de la cuenca tienen una orientación principalmente NW-SE en las Montañas Huachuca, y al suroeste de los Cerros Canelo. En estos lugares la litología dominante son rocas volcánicas andesíticas a riolíticas que están intercaladas con conglomerados y areniscas (**Klvs**). Otros afloramientos importantes de esta unidad se encuentran en la parte este de los Cerros Tombstone, caracterizados por tobas del Cretácico predominantemente riódacíticas (**Kr**); en el mismo lugar, también se incluyen una serie de brechas volcánicas andesítico-dacíticas (**Ka**), así como afloramientos aislados de una intercalación de flujos riolíticos a andesíticos, rocas piroclásticas y algunas rocas clásticas (**Tlv**), las cuales han sido fechadas en 57 Ma (Drewes, 1980).

#### ***Complejo Intrusivo Cretácico-Terciario (KsTpaGr-Gd, TeMz-qMz, Kg, TKp, Klq)***

Se propone esta unidad para incluir una serie de cuerpos intrusivos félsicos del Cretácico Tardío al Eoceno (?) que aparecen en ambos lados de la CBSP.

Cerca de la ciudad de Cananea, principalmente en la Sierra Mariquita, se presentan

afloramientos de una serie de intrusiones batolíticas de composición granítico-granodiorítica (**KsTpaGr-Gd**). El batolito varía en color de gris-blanco claro a un gris-verde y rosa; la textura es fanerítica de grano medio y porfídica, que consiste de feldespato potásico, albita-oligoclasa, cuarzo, biotita, y minerales de alteración como sericita, clorita y hematita. Este batolito, también conocido como “Batolito Laramide” ha sido fechado por varios investigadores, dando edades de 64 Ma usando los métodos U-Pb, Rb-Sr y Sm-Nd (Wodzicki, 1995), y  $64 \pm 3$  y  $69 \pm 1$  Ma por U-Pb en afloramientos de la región de Cuitaca (Anderson y Silver, 1977).

Dentro de esta unidad se agrupa una serie de intrusiones monzoníticas y porfídicas de composición cuarzomonzonítica (**TeMz-qMz**), que afloran ampliamente en los alrededores de la sierra Mariquita. La cuarzomonzonita se presenta como apófisis pequeñas que intrusionan a las rocas batolíticas laramídicas y volcánicas del Jurásico-Cretácico; generalmente está alterada por lo que es difícil observar su mineralogía, sin embargo tiene una composición de cuarzomonzonita a granito, que consiste de cuarzo, feldespato y biotita en una matriz afanítica de cuarzo y ortoclasa. Los pórfidos cuarzomonzoníticos que afloran en el área de Cananea presentan una edad K-Ar en flogopita de  $59.9 \pm 2$  Ma (Damon et al., 1983). Otros cuerpos sub-volcánicos riolíticos que se incluyen dentro de esta unidad tienen una edad de  $54.2 \pm 2$  Ma, fechado cerca de Cananea por el método K-Ar en sericita (Steiger y Jäger, 1977).

Estas rocas están asociadas con la mineralización de pórfido de cobre de los depósitos María, Mariquita y Milpillás, entre otros, los cuales tienen zonas importantes de alteración hidrotermal como sericitización, argilización, silicificación, oxidación y propilitización.

En la porción norteamericana de la cuenca, principalmente hacia el límite oriental, se presenta una serie de stocks de rocas graníticas que intrusionan a las secuencias pre-cenozoicas. Estos intrusivos (**Kg**) se caracterizan por ser rocas de color gris, de grano medio y localmente porfídicas. Hacia el límite oriental, en las inmediaciones del poblado de Tombstone, se presentan afloramientos de un intrusivo en forma de pequeños stocks, cuya composición varía de monzonita a granodiorita (**Tlq**) y localmente incluye cuarzdiorita, así como mineralización asociada; las edades reportadas para estos intrusivos varían entre 70 y 76 Ma. También en esta porción de la cuenca existen afloramientos de rocas porfídicas y aplíticas (**TKp**), principalmente en los márgenes de las Montañas Mule.

***Unidad Volcánica Félsica Terciaria (TmTR-R, Tv, Tva, Tlc)***

Esta unidad se propone para incluir afloramientos riolíticos que se presentan en la porción centro-oeste de la cuenca, principalmente en las inmediaciones del rancho Los Fresnos, en la parte mexicana; así como otros de composición riodacítica a andesítica que aparecen al este de Tombstone, Arizona.

En el lado mexicano, la unidad está representada por una toba riolítica de color gris claro con tonos crema, presenta una pseudoestratificación y contiene cuarzo, feldespato, plagioclasa, cristales de biotita, y fragmentos líticos volcánicos en una matriz vítrea cristalina. Localmente, muestra intercalaciones de toba brechoide y aglomerática. También incluye una riolita gris con textura fluidal, la cual tiene cuarzo, vidrio, feldespato y óxidos de hierro en una matriz vítreo-esferulítica (**TmTR-R**). La edad que se ha obtenido de esta secuencia volcánica es de 28 Ma (Floyd Gray, USGS, comunicación personal, 2012, datos no publicados) y su posición cronoestratigráfica sugiere que corresponde entre el Oligoceno Tardío al Mioceno Medio.

En el lado estadounidense de la CBSP, y específicamente al este de Tombstone, hay una serie de afloramientos caracterizados por flujos piroclásticos y rocas de composición riolítica a riodacítica, de color rosa a gris claro, datado entre 23 y 27 Ma (**Tv**); también se encuentran flujos y rocas piroclásticas de composición andesítico-dacítica, y pórfidos de la misma composición que conjuntamente presentan edades entre 24 and 39 Ma (**Tva**) (Drewes, 1980). Asociado con la litología volcánica en esta misma localidad, se presenta un conglomerado rojizo con clastos no volcánicos bien redondeados (**Tlc**), los cuales eventualmente se incluyen en la base de esta unidad debido a su posición estratigráfica (Gettings and Houser, 2000).

***Unidad Vulcanosedimentaria Terciaria (TmCgp-Ar, Tc)***

Esta unidad se propone para incluir una secuencia de rocas continentales dominadas por conglomerados que presentan intercalaciones de arenisca y toba, cuyos afloramientos están predominantemente asociados a los altos topográficos que delimitan la margen occidental de la CBSP.

En la parte mexicana de la cuenca, esta unidad está representada por afloramientos de la Formación Báucarit (Dumble, 1902; King, 1939), caracterizados por un conglomerado polimíctico marrón claro a rojizo, con estratificación gruesa y clastos subangulosos y subredondeados que varían en tamaño y cuya composición dominante es riolita, granito, andesita y toba andesítica (**TmCgp-Ar**), incluidos éstos en una matriz arenosa. Estos conglomerados se intercalan con estratos de areniscas de grano grueso de la misma coloración, las cuales en algunas localidades llegan a ser tobáceas; así mismo, estas rocas pueden incluir basaltos y andesitas basálticas interestratificadas.

En la porción estadounidense, los principales afloramientos de esta unidad se encuentran inmediatamente adyacentes a la Sierra Huachuca (Drewes, 1980; Brown et al, 1966), y están representados por un conglomerado bien a moderadamente consolidado con clastos subredondeados (**Tc**), que incluyen localmente algunos depósitos de deslizamiento y cuerpos de tobas y andesitas porfídicas. En Arizona, la Formación Pantano es considerada por algunos investigadores como correlativos a esta unidad (Pool and Dickinson, 2007; and Gettings and

Houser, 2000). En general, esta unidad corresponde a depósitos de abanicos aluviales a coluviales, y basado en varias dataciones radiométricas en ambos países, la edad de la secuencia se considera del Mioceno Temprano al Mioceno Medio.

#### *Unidad Sedimentaria Plio-Cuaternaria (QptCgp, Qg, Qtg)*

Esta unidad se incluye para caracterizar una secuencia de sedimentos gruesos, gravas y arenas, cuyos afloramientos se presentan ampliamente distribuidos dentro de la porción central de la CBSP.

En el lado mexicano de la cuenca, son sedimentos continentales de naturaleza litológica variable, que granulométricamente consisten de grava, arena y limo, se presentan generalmente en estratos gruesos (**QptCgp**). Estos sedimentos se ubican en planicies de inundación y en zonas de piedemonte.

En el lado estadounidense esta unidad se representa por gravas, arenas, limos y arcilla de depósitos aluviales, coluviales y suelos; son de un color gris y tienen clastos mal redondeados de origen local (**Qg**). También se incluyen algunas capas de gravas bien clasificadas y redondeadas (**Qtg**). En esta porción de la cuenca, estos sedimentos son incluidos como parte de la Unidad de Relleno Superior de la Cuenca (*Upper Basin Fill Unit*), una unidad informal litoestratigráfica muy conocida (Coes and Pool, 1999). En general, esta unidad cubre discordantemente las rocas más antiguas, y debido a su posición estratigráfica se considera del Plioceno hasta el Holoceno.

### **4.3 Geología Estructural**

La historia tectónica de la región ha sido compleja durante todo el Fanerozoico. Las estructuras compresionales (cabalgaduras y pliegues) generadas durante el Fanerozoico temprano y medio (Drewes, 1980), así como las subsecuentes fallas normales fueron afectadas posteriormente por discontinuidades estratigráficas regionales. Las estructuras extensionales dentro de la CBSP aparecen como un conjunto de fallas normales que pueden agruparse en dos orientaciones preferenciales, el primero es un sistema NNW-SSE (Page et al., 2010) y el segundo presenta una orientación NE-SW. Localmente, en la parte mexicana (Sierra La Mariquita), algunas fallas normales se encuentran orientadas aproximadamente ENE-WSW. Las fallas normales del primer conjunto presentan lineamientos más continuos con extensiones de hasta 20 km cerca de las Montañas Huachuca (falla Nicksville) (Wynn, 2006; Drewes, 1980), y de 15 km en el flanco oeste de la Sierra Mariquita. En ambos lados de la CBSP, donde se depositaron los sedimentos que alojan las unidades de los acuíferos granulares, se tienen como límites estas estructuras.

### **4.4 Geología Tridimensional del subsuelo**

Uno de los elementos principales de un estudio hidrogeológico es la definición de un modelo conceptual de la geología del subsuelo. Para desarrollar este modelo, se requiere información directa de los pozos perforados dentro

del área de estudio, así como también información indirecta generada por métodos geofísicos, ya sean aéreos o terrestres. La interpretación de los datos obtenidos permite entender los elementos fundamentales para desarrollar el modelo conceptual, que incluyen: 1) la geometría de la cuenca, extensión y límites, la definición de las unidades hidrogeológicas que lo componen y de las estructuras que lo afectan; y 2) las características del relleno sedimentario de la cuenca, así como los sistemas de depósito que representan, los cuales deben incluir espesor, tamaño de grano y las variaciones laterales, propiedades hidráulicas, las barreras y límites del flujo subterráneo, y el basamento hidrogeológico.

En la CBSP se han publicado una serie de estudios geofísicos con el objetivo de ayudar a determinar la estructura de la cuenca, entre éstos se tienen estudios electromagnéticos (Bultman et al., 1999; Wynn, Gray, et al., 2003; Wynn, Mars, et al., 2003; Gray et al., 2005; Wynn, 2006; Bultman et al., 2006; Bultman y Gray, 2011), gravimétricos (Gettings y Houser, 2000; Gray et al., 2004), y magnetométricos (Bultman et al., 1999; Wynn, Gray, et al., 2003; Wynn, Mars, et al., 2003; Gray et al., 2004; Wynn, 2006), así como estudios hidrogeológicos que incluyen secciones transversales y modelos de subsuelo (Brown et al., 1966; Bultman et al., 1999; Pool y Coes, 1999; Gray et al., 2005; Pool y Dickinson, 2007).

Por otra parte, los trabajos que se ha hecho sobre las características del subsuelo de la parte mexicana de la cuenca son pocos, a excepción de los dos estudios de Gray et al. Anteriormente

mencionados (2004 y 2007), que incluyen análisis de información de un estudio desarrollado para la mina de Cananea, en el cual se discuten algunas propiedades hidrogeológicas del acuífero granular dentro de la cuenca (Consultores en Agua Subterránea, S.A., 2000). Lo relevante de este trabajo es la conclusión de que se cuenta con una serie de sub-cuencas someras, cuyos espesores alcanzan desde 100 m en las cercanías de Cananea, hasta 500 m cerca de la línea divisoria. Esta información fue integrada con datos y análisis de la porción estadounidense de la cuenca, con el propósito de ayudar a definir binacionalmente la estructura del subsuelo de la CBSP.

#### **4.5 Profundidad al Basamento y Estructura**

La secuencia conglomerática Terciaria (**Tc**) en el territorio de Estados Unidos y Formación Báucarit en el lado mexicano fueron depositadas durante el Oligoceno Medio al Mioceno Medio. Para el propósito de este trabajo, estas unidades se consideran como parte del basamento rocoso, pues fueron litificadas y basculadas por un evento extensional tardío y se encuentran cubiertas por sedimentos no consolidados que componen el acuífero aluvial regional de la CBSP.

Con base en datos de gravimetría y magnetometría, Gettings y Houser (2000) proponen que el lado estadounidense de la CBSP está orientado hacia el noroeste-sureste. Mediante el análisis y la interpretación de estos datos para obtener la profundidad a la roca madre, identificaron dos sub-cuencas principales en el

lado oeste del Río San Pedro separadas por la elevación del sustrato rocoso bajo Sierra Vista. Una de estas sub-cuencas se encuentra al norte de esta ciudad, con una profundidad al basamento superior a 800 m, y la otra se identificó más hacia el sur a la altura de la comunidad de Palominas, donde la profundidad al basamento es superior a 1000 m. Es importante señalar que estos autores identifican la base de la secuencia conglomerática (**Tc**) como el basamento profundo. Adicionalmente, una tercer sub-cuenca fue interpretada al noreste de Tombstone, para la cual se sugiere una profundidad superior a 1100 m. Pool y Coes (1999) utilizaron pruebas sísmicas, resistividad y registros de muestras de pozos para ampliar esta información a otras partes de la cuenca.

Dentro de la SASPS, el levantamiento gravimétrico consistió de un total de 96 estaciones espaciadas entre 1 y 2 km, tomadas con un gravímetro Scintrex CG-5. Se aplicaron métodos convencionales a cada una de las lecturas con el fin de hacer correcciones por latitud, mareas, desviación instrumental (equipo) y aire libre, y así calcular la anomalía de Bouguer simple. Una vez obtenida esta anomalía, la base de datos fue importada al software Geosystem WingLink® para la interpretación y modelización gravimétrica. El objetivo principal de este levantamiento gravimétrico fue desarrollar una visión general de la geometría del basamento. Cuando se lleva a cabo una interpretación gravimétrica, el interés principal es analizar el efecto de las masas más superficiales (anomalía

residual), minimizando el efecto producido por masas más profundas; por esta razón, el primer paso de este modelado consistió en llevar a cabo la separación de las anomalías regional-residual. Una de las técnicas más comunes para hacer esta separación es el ajuste polinomial, donde las

anomalías locales se dejan como residuo de dicho ajuste (Camacho et al., 1996). En el caso de la CBSP, esta separación se obtuvo aplicando el filtro del polinomio de grado 2 a los datos de la anomalía de Bouguer.

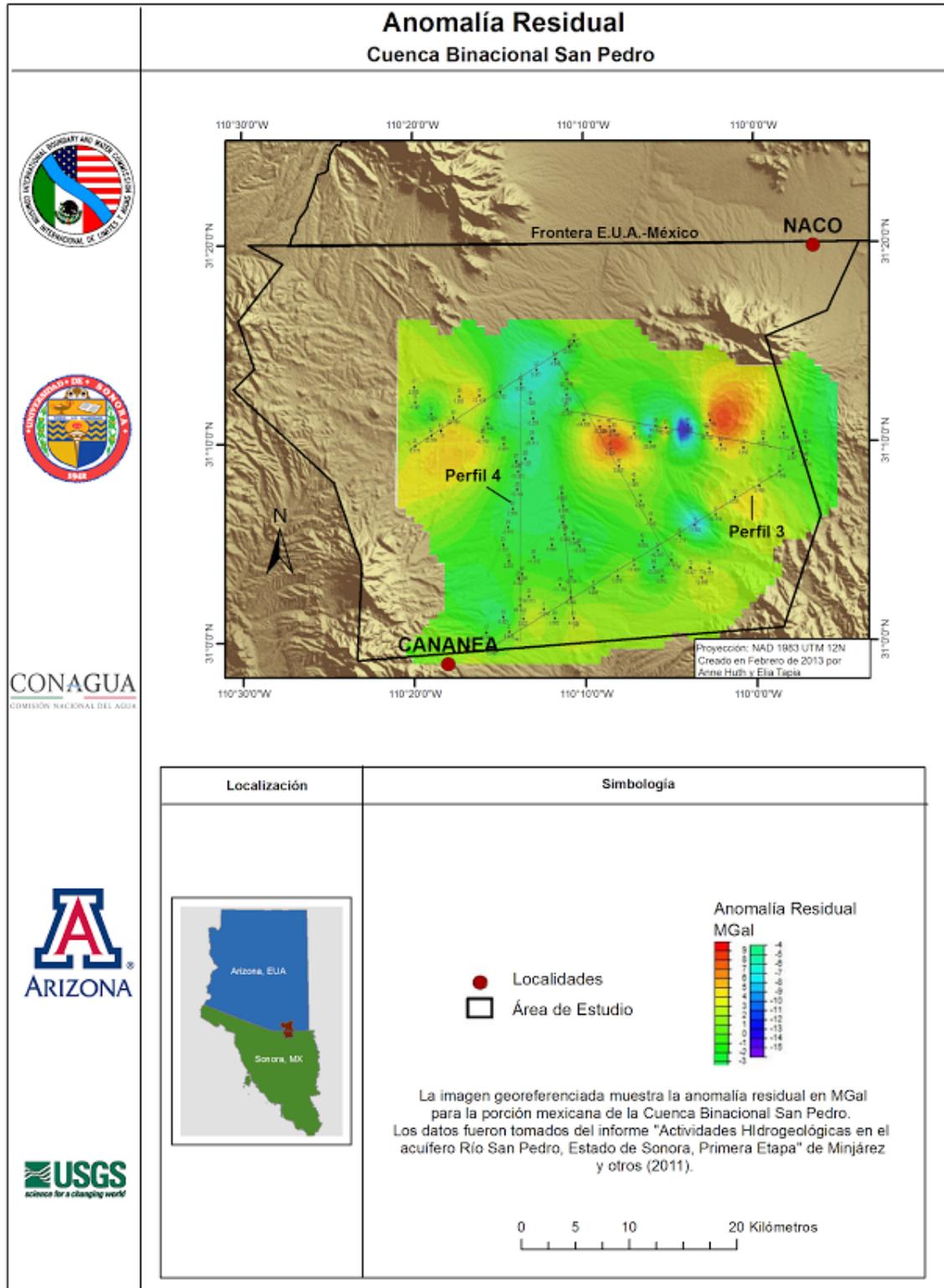


Figura 4.2 Mapa de Anomalía de Bouguer para la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro. Los perfiles 3 y 4 son mostrados como secciones modeladas en la Figura 4.4

La configuración que se muestra en el mapa de anomalía de Bouguer (Figura 4.2) hace posible identificar zonas con anomalías gravimétricas negativas significativas (bajos gravimétricos), las cuales son aquí interpretadas como depresiones del basamento. La primera de estas depresiones está hacia la parte occidental de la SASPS, orientada nornoroeste-sursuroeste, y tiene anomalías entre -6 y -9 mGals. La otra se encuentra en el cuadrante noreste, donde a pesar de que la extensión espacial de la zona que cubren las anomalías no es amplia, es el área con los valores más bajos de hasta -15 mGals. Un tercer bajo gravimétrico localmente confinado se encuentra al sur de esta última zona, definido con valores entre -7 y -10 mGals. Las densidades utilizadas para las litologías que conforman el basamento rocoso en el modelado de los perfiles gravimétricos se tomaron de Gettings y Houser (2000): basamento granítico =  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , basamento vulcanosedimentaria =  $2.55 \text{ g/cm}^3$ , y para el relleno sedimentario de la cuenca se utilizó una densidad de  $2.00 \text{ g/cm}^3$ . Es importante señalar que para la última densidad se tomó arbitrariamente de la tabla de valores promedio presentada por Telford et al. (1984). Para la interpretación de la profundidad al basamento en la parte mexicana de la cuenca, la parte superior de lo que en este apartado se identificó como basamento vulcanosedimentaria incluye, además de las secuencias sedimentaria y volcánicas más antiguas, la Formación Báucarit, equivalente a la unidad Oligo-Mioceno (Tc) para la parte de Estados Unidos. Se hace notar que esta es una

diferencia de la interpretación hecha por Gettings y Houser (2000), descrita al inicio de esta sección.

El modelado de algunos perfiles gravimétricos permitió interpretar la profundidad del basamento en cada una de las estaciones; a partir de dos de estos perfiles (Figura 4.3) se puede establecer que la profundidad al basamento es altamente variable, y que las profundidades mayores interpretadas, entre 430 y 510 m, se encuentran en el límite norte entre las estaciones 32 y 34 (Perfil 4), cerca del poblado José María Morelos. Además, el basamento tiene la geometría de fosas tectónicas limitadas por altos estructurales, donde la elevación más importante está entre las estaciones 11 y 13 (perfil 3) situados hacia la parte sur de la cuenca a lo largo de la carretera federal No.2. En las inmediaciones de Cananea, en la frontera sur de la cuenca, la información de pozos perforados proporcionan evidencia de una sub-cuenca de relleno aluvial delimitada hacia al este y al oeste por conglomerado y un basamento cristalino (Pool et al, 2005; Consultores en Agua Subterránea S.A., 2000). Es probable que esta sub-cuenca tenga más de 500 m de profundidad.

En general, y con base en la información presentada en los párrafos anteriores, se puede concluir que las cuencas en el subsuelo están limitadas al oeste por fallas normales nornoroeste-sursureste que presentan un ángulo alto de echado hacia el estenoreste, y que para el límite oriental, se tiene una serie de fallas normales sepultadas con la misma orientación y echados al WNW (Wynn, 2006; Drewes, 1980; Floyd Gray comunicación personal). Se sospecha que las

fallas normales regionales mapeadas en la Montañas Huachuca y en la porción norte de México (Cerros El Tule), pueden extenderse hasta la Sierra San José, y coinciden con el alto estructural que se tiene hacia la frontera México-EUA.

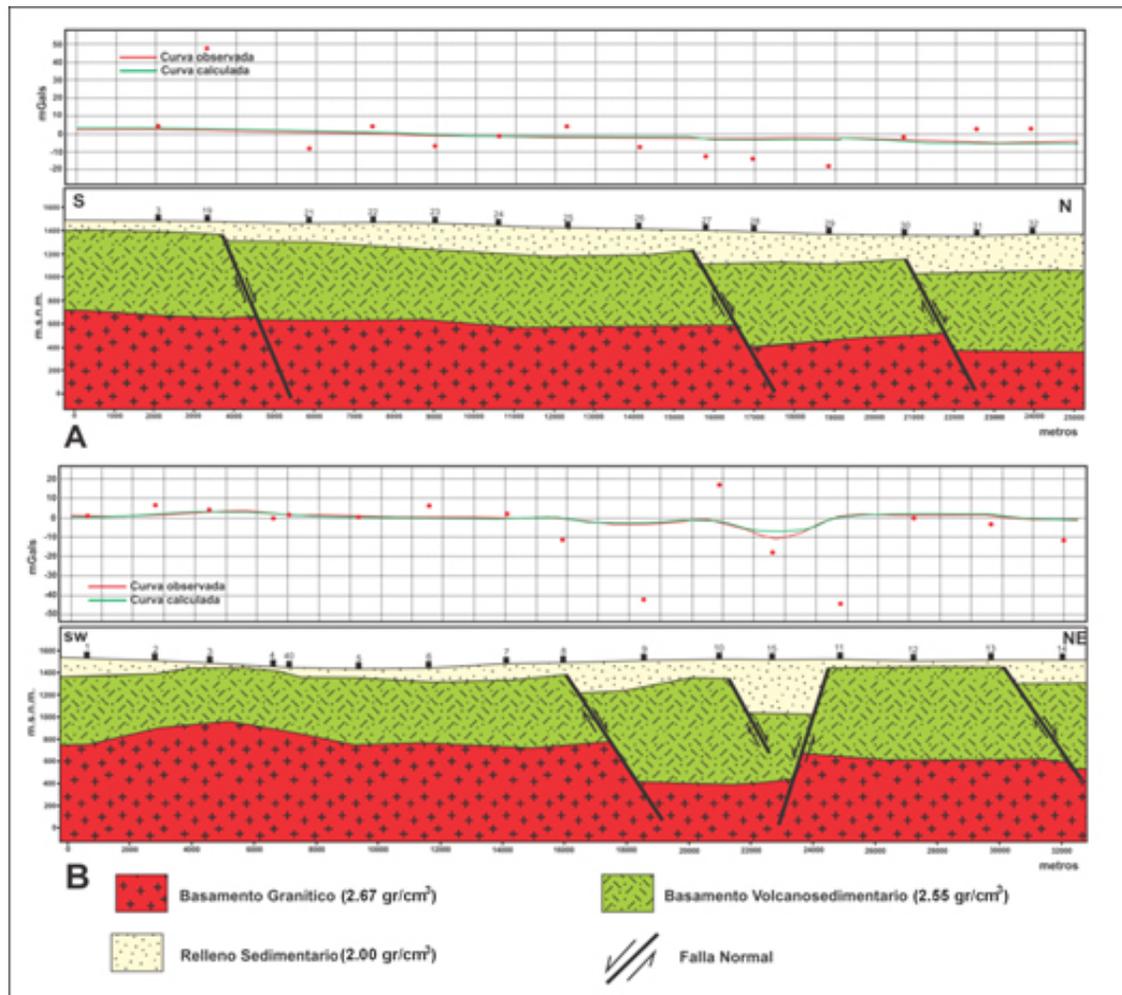


Figura 4.3 Perfiles gravimétricos en la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro: A) perfil 4 orientado N-S; B) perfil 3 orientado WSW-ENE. La localización de los perfiles se muestra en la Figura 4.2

#### 4.6 Características del Relleno Sedimentario

El relleno sedimentario dentro de la parte estadounidense de la CBSP ha sido dividido en dos unidades informales denominadas Relleno

Inferior de la Cuenca (*lower basin fill*) y Relleno Superior de la Cuenca (*upper basin fill*) (Brown et al., 1966), las cuales fueron depositadas en cuencas extensionales durante el Mioceno Tardío al Pleistoceno. Aunque en la parte mexicana de la

cuenca no existen estudios detallados sobre la estratigrafía de estos sedimentos, que también representan el principal acuífero aluvial regional, las características físicas obtenidas a partir de las descripciones litológicas de los pozos (Consultores en Agua Subterránea, SA, 2000) sugieren una equivalencia con la división que se presenta en los Estados Unidos.

Con los datos obtenidos a partir de la descripción litológica de los pozos, sondeos eléctricos verticales y otros métodos geofísicos (Pool y Coes, 1999; Consultores en Agua Subterránea S.A., 2000; Fleming y Pool, 2002; Condor Consulting, 2001, 2003), Pool y Dickinson (2007) delimitaron superficies continuas que determinan la parte alta y baja de una zona limo-arcillosa dentro del Relleno Superior. Estos autores estimaron un espesor de entre 10 y 300 m, y lateralmente las limitaron a unos pocos kilómetros del cauce del Río San Pedro. Con base en esta información, se establece que las elevaciones que determinan esta zona arcillosa están entre los 1,400 y 1,100 msnm.

Dentro de la porción mexicana de la cuenca se realizaron sesenta y cinco sondeos electromagnéticos transitorios (TEM), tratando de obtener una imagen, lo más real posible, de las condiciones de resistividad del subsuelo, y estos datos fueron correlacionados con las características granulométricas del relleno de la

cuenca y su basamento. Particularmente en este estudio, la técnica TEM consistió en utilizar una bobina en forma de caja que fue construida con un cable de 110 alambres de fabricación canadiense, y con dimensiones de 150 x 150 m (área de la bobina 22, 500 m<sup>2</sup>), en un arreglo denominado "*Matching Loop*"; este arreglo utiliza una bobina que actúa como un transmisor de la señal en ciertos momentos de tiempo y en otros está recibiendo, con una resistencia de 2.1 Ohms en el circuito. Estas características del arreglo alcanzaron una intensidad de corriente que varía entre 7 y 8 amperios, para ajustarse a los 600 m de profundidad de observación. El análisis de los perfiles modelados a partir de los datos de estos TEM, hacen posible corroborar la presencia de esta zona limosa-arcillosa, ya que las características de resistividad de la arcilla (<12 Ohm-m) son claramente detectadas en varios de los perfiles. El perfil de resistividad WE-10, orientado W-E en el límite sur de la porción mexicana de la cuenca (Figuras 4.4 y 4.5), muestra que el límite inferior de la zona limosa-arcillosa tiene una elevación de unos 1,100 msnm, mientras que el límite superior es de aproximadamente 1,400 msnm, que es consistente con las elevaciones presentados para estos límites por Pool y Dickinson (2007) en la misma porción de la cuenca.

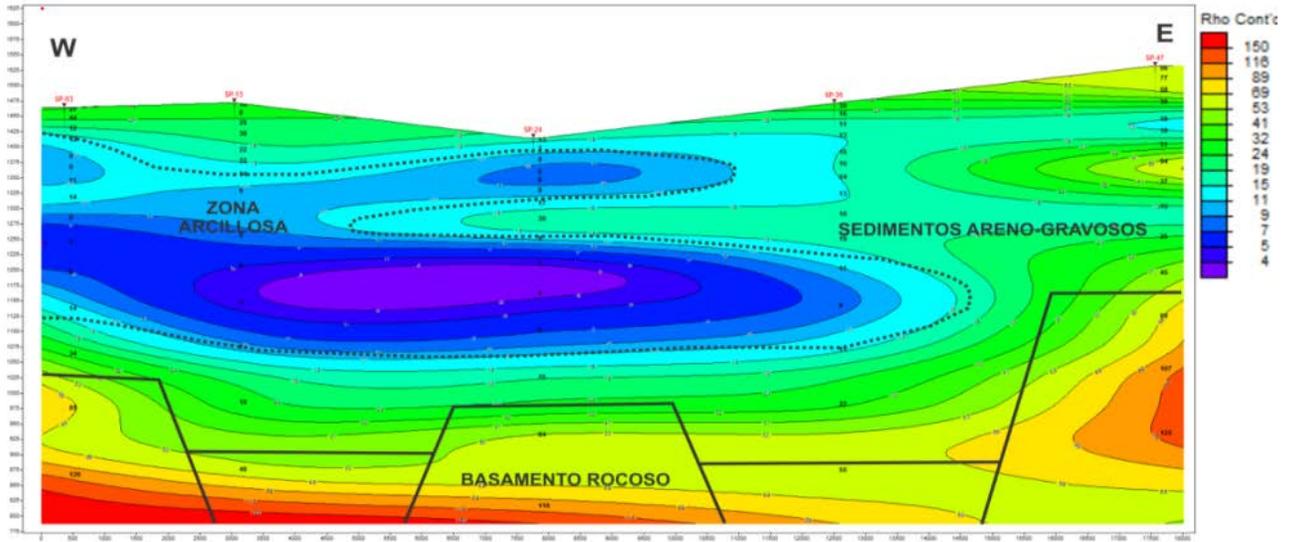


Figura 4.4 Perfil de Resistividad Oeste-Este mostrando la base y la cima de la zona arcillosa en el subsuelo de la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro.

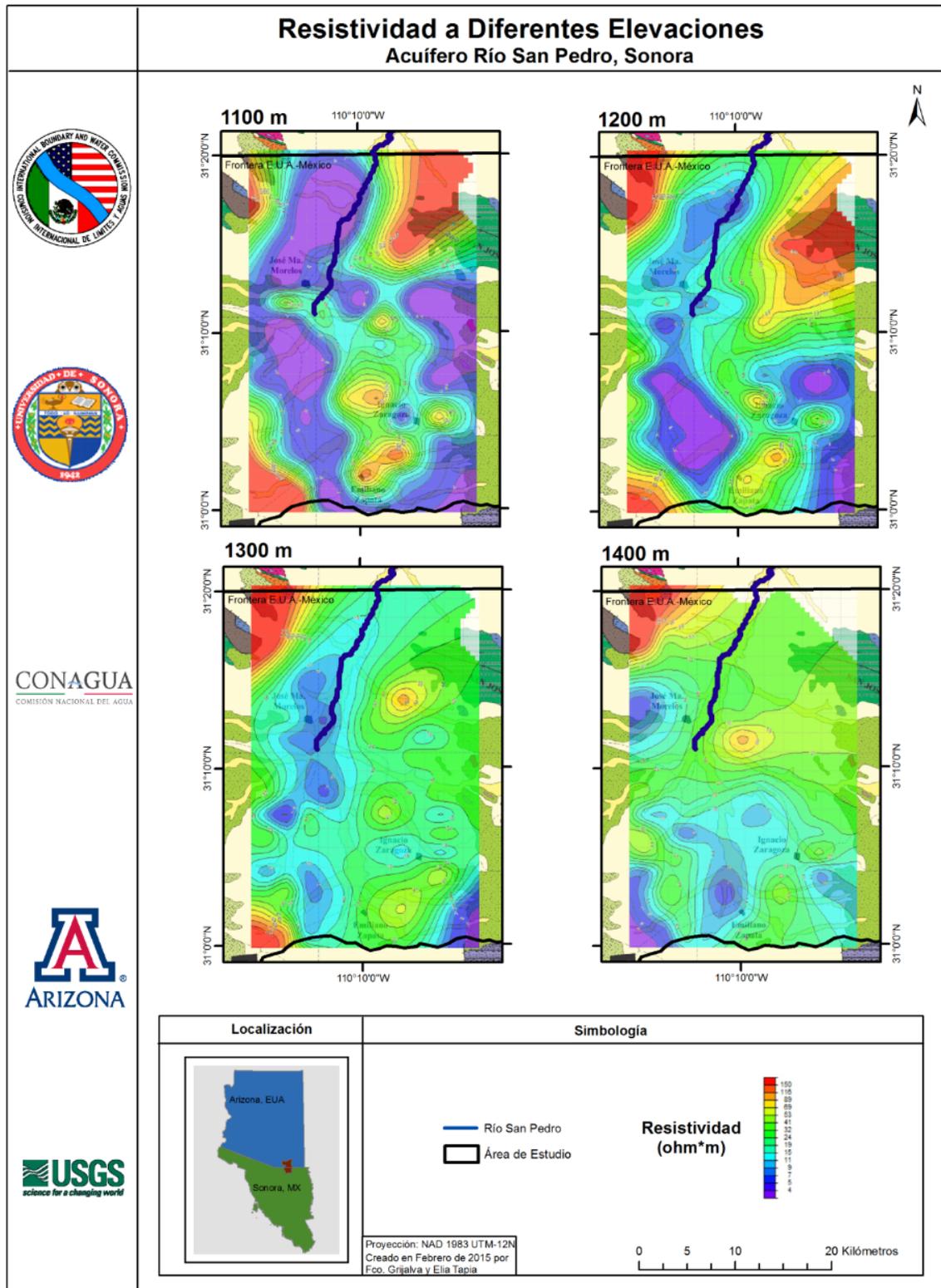
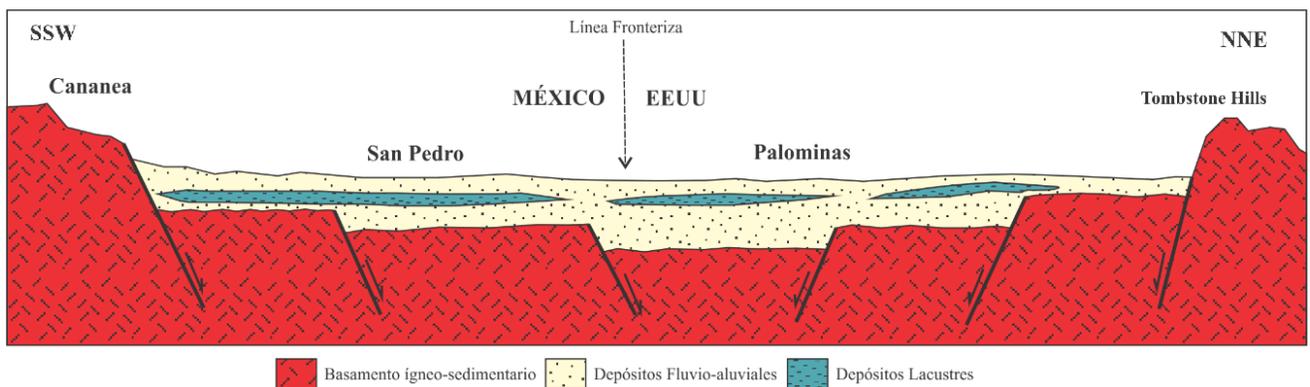


Figura 4.5 Mapas de resistividad a diferentes elevaciones en el subsuelo de la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro. El mapa base de la geología corresponde al mostrado en la Figura 4.1.

Tomando en cuenta la interpretación de los datos geofísicos en ambas porciones de la cuenca, y el hecho de que dichos datos e interpolaciones no son continuos sobre toda el área, se considera que la cuenca fue tectónicamente delimitada y se profundiza hacia el centro, alcanzando profundidad máxima propuesta de 1500 m en los

alrededores de la localidad de Palominas, Arizona (Figura 4.6), donde el relleno sedimentario está dominado por secuencias fluviales de grava-arena y sedimentos finos (bajos gravimétricos).



**Figura 4.6 Interpretación esquemática de la Cuenca Binacional San Pedro**

## 5. HIDROGEOLOGÍA

La Hidrogeología es la descripción de las propiedades hidráulicas (p.e. porosidad), de la distribución espacial (extensión y espesor), y la estructura (fallas) del subsuelo. Por lo tanto, este apartado se centra en la interpretación de la geología discutida en el apartado anterior, en términos de su significado hidrológico. La hidrogeología de la CBSP ha sido estudiada y revisada por un gran número de autores (Brown et al., 1966; Pool y Coes, 1999; Fleming y Pool, 2002; Coes y Pool, 2005; y Pool and Dickinson, 2006, entre otros).

### 5.1 Basamento Hidrogeológico

La localización y estructura (fracturamiento y tipo de roca) del basamento hidrogeológico es muy importante para entender las dimensiones y los límites de un acuífero, si los límites de los acuíferos son permeables o impermeables, así como también los tipos de interacciones y constituyentes geoquímicos. Las barreras y límites del flujo subterráneo, así como el basamento hidrogeológico de la CBSP, están principalmente formados por secuencias sedimentarias y vulcanosedimentarias del Paleozoico y Mesozoico, así como por una serie de intrusiones graníticas terciarias. Es importante establecer que a partir de los trabajos de resistividad realizados en el área de estudio se han identificado áreas de baja resistividad dentro de la CBSP (Figura 5.1; contornos de color azul oscuro y morado). Dependiendo de una serie de factores, incluyendo el método de medición, variabilidad espacial y las

propiedades del material de contraste en el subsuelo, la resistividad eléctrica se puede correlacionar con cierto tipo roca o con cierta granulometría de sedimentos, con las resistividades más altas correspondiendo a un sustrato rocoso no fracturado y las resistividades menores representando un incremento en la cantidad de arcilla, sal o contenido de agua. Al noroeste de porción mexicana de la CBSP, una asociación espacial de zonas de baja resistividad eléctrica por debajo de áreas de alta resistividad (Figura 5.1; contornos de color verde-azul), así como la profundidad a la que éstas se encuentran, podría indicar la presencia de un acuífero asociado a la secuencia sedimentaria del Cretácico, una lutita del Cretácico (posiblemente con contenido de agua salada), o un fracturamiento intenso del basamento (Figura 5.1). Los acuíferos encontrados en roca fracturada como éstos pueden ser productivos, sin embargo, aún no han sido evaluado su potencial, y su productividad dependería de sus extensiones (local o regional), así como de la fuente de recarga, y de sus características físicas como tamaño, la conductividad y el número de fracturas por unidad de área.

Con base en la determinación de profundidad al basamento de Gettings y Houser (2000) y en la discusión y análisis en el capítulo 4, se puede concluir lo siguiente: 1) La porción estadounidense de la CBSP está orientada noroeste-sureste; 2) Las dos sub-cuencas principales en el lado oeste del Río San Pedro están separadas por un alto estructural del

basamento rocoso por debajo de Sierra Vista; 3) La sub-cuenca al norte de esta ciudad tiene una profundidad al basamento cristalino superior a los 800 m; 4) La parte más profunda de la sub-cuenca al sur de Sierra Vista (> 1000 m) se encuentra por debajo de la comunidad de Palominas. Además, la sub-cuenca al noreste de Tombstone tiene una profundidad superior a 1.1 kilómetros. En Sonora, hay una sub-cuenca situada en la parte occidental de la zona, la cual está orientada nornoroeste-sursureste. Otra sub-cuenca más estrecha se localiza en la parte noreste de la zona de estudio. Una tercera sub-cuenca localmente confinada se encuentra al sur de esta última. Con base en el

análisis de datos geofísicos presentados en el Capítulo 4, la profundidad al basamento en la SASPS es muy variable, con las mayores profundidades entre 430 y 510 m, las cuales se encuentran cerca de la frontera en las inmediaciones de la localidad de José María Morelos. Aunque hay una depresión con profundidades de más de 250 m en la parte centro-sur de la cuenca, la elevación más importante se encuentra a lo largo de la carretera 2, con el basamento en o muy cerca de la superficie.

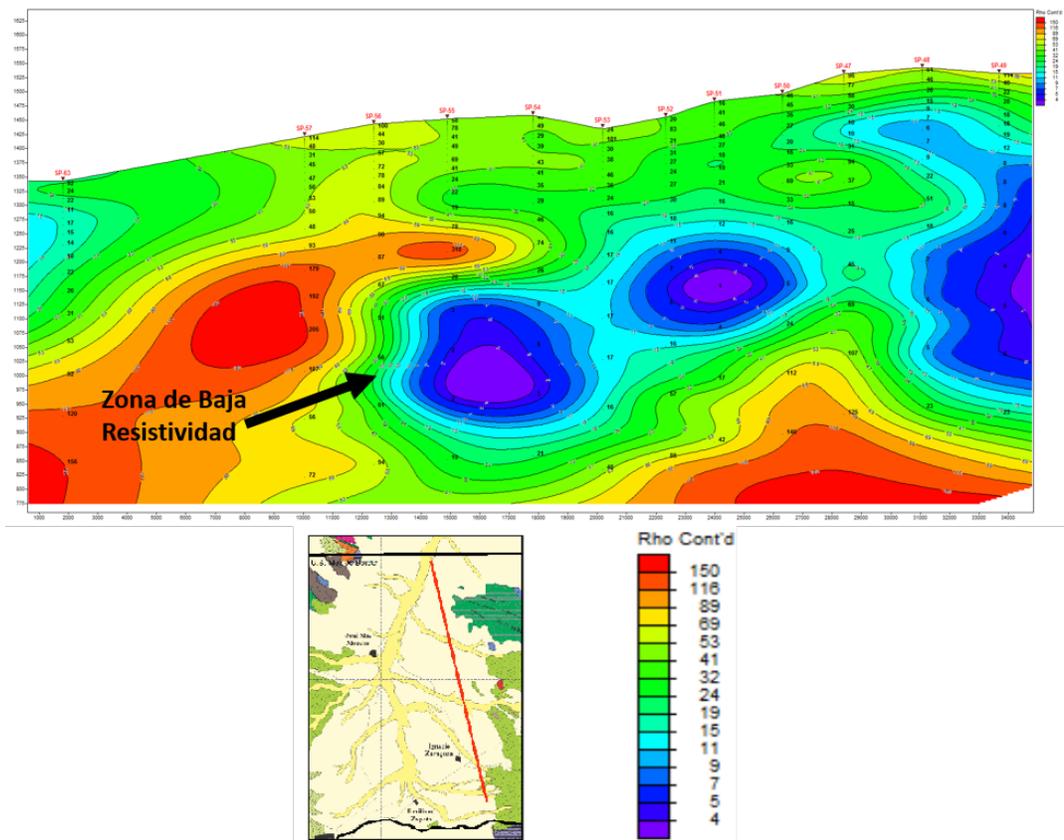


Figura 5.1 Perfil de Resistividad N-S (TEM) desarrollado en el límite oriental del lado mexicano de la Cuenca Binacional San Pedro, mostrando la zona de baja resistividad (contornos de color azul oscuro y morado) que podría estar asociada con un basamento fracturado. La localización del perfil se indica con una línea roja en el mapa geológico en la parte inferior de la figura (Ver Figura 4.1 para identificar la geología detallada). Las distancias en el perfil de resistividad y en el mapa están en metros.

Para efectos de definir la profundidad y el espesor del relleno sedimentario de la cuenca que se menciona en el Capítulo 4, tanto la unidad volcánica félsica como las secuencias vulcano-sedimentarias conglomeráticas del Terciario en ambos lados de la frontera se consideraron como parte de su basamento; sin embargo, puede que no sean parte del basamento hidrogeológico si juegan un papel importante en el movimiento de las aguas subterráneas y están conectadas hidráulicamente con la recarga de los acuíferos granulares. Se tienen afloramientos de caliza en casi todas las sierras que limitan la CBSP (Pool y Dickinson, 2007). Éstas funcionan de manera local como acuíferos, pero su verdadero alcance y función en la hidrología de la CBSP son desconocidos.

## **5.2 Unidades Hidroestratigráficas**

Las unidades hidroestratigráficas como las describe Maxey (1964) son cuerpos de roca (o aluvión) lateralmente extensos que actúan como sistemas hidrológicos distintivos. Como se discutió en el Capítulo 4, Pool y Dickinson (2007), entre otros, establecieron que los acuíferos granulares regionales en la parte estadounidense de la cuenca están constituidos por el relleno sedimentario no consolidado y consolidado que puede ser dividido estratigráficamente en Relleno Superior e Inferior de la Cuenca. Este relleno sedimentario representa también el acuífero más importante de la parte mexicana de la cuenca. Estos mismos autores mencionan la probable presencia de un acuífero en roca en la secuencia detrítica de la unidad Tc (Ver sección 4.2 para su

descripción), cuya presencia también se puede establecer en la parte mexicana dentro de la Formación Báucarit y la unidad volcánica félsica Terciaria. Sin embargo, como fue el caso con Pool y Dickinson (2007), y a pesar de la nueva información geofísica obtenida en este trabajo, aún falta bastante información para distinguir entre el Relleno Superior e Inferior de la Cuenca dentro de esta porción de la CBSP. Con el fin de desarrollar una base de comparación e integración binacional, y hasta que pueda llevarse a cabo un trabajo a detalle para distinguir la separación entre ambas unidades en el relleno sedimentario de la cuenca en Sonora, proponemos y describimos una serie de unidades hidroestratigráficas para el acuífero de la CBSP, las cuales son diferenciadas en base a las diferencias en tamaño de partícula (granulometría) y la distribución de la porosidad. Así mismo, la profundidad, la geometría típica de la cuenca y la distribución espacial de los sedimentos relacionados con su evolución, son elementos que pueden ser utilizados para estimar zonas de alta o baja conductividad hidráulica y la identificación entre roca fracturada y aluvión (Figura 5.2 como ejemplo). Una ventaja adicional es que la división del acuífero en unidades hidroestratigráficas representa un paso hacia el desarrollo de un modelo de flujo de agua subterránea. Tomando todo esto en cuenta: Los estudios en la parte de Arizona del acuífero, los resultados de las características de resistividad obtenidos del levantamiento de los TEM en la SASPS (Véase el capítulo 4), algunos de los parámetros hidráulicos definidos con anterioridad, y su correlación con

los acuíferos vecinos en las áreas de Agua Prieta, Santa Cruz, Bacanuchi y Cananea, se definen las siguientes unidades hidroestratigráficas para la CBSP:

Unidad Hidroestratigráfica 1: Corresponde a la fracción granular más gruesa de relleno sedimentario de la cuenca representado por gravas y arenas. Corresponde a las partes hidráulicamente más conductivas del Relleno Superior e Inferior de la Cuenca. Esta unidad tiene la más alta conductividad hidráulica, aunque a profundidad probablemente disminuye, ya que el grado de compactación y cementación se incrementan a mayor profundidad.

Unidad Hidroestratigráfica 2: Esta unidad incorpora los sedimentos finos con baja conductividad hidráulica que principalmente se encuentran en el Relleno Superior de la Cuenca. Estos limos y arcillas de baja resistividad se presentan como unidades, principalmente en la porción central de la cuenca. Es posible que sean responsables de crear las condiciones de confinamiento que se encuentran en la Unidad 1. La extensión de las condiciones de confinamiento refleja la extensión de esta unidad.

Unidad Hidroestratigráfica 3: Se encuentran incluidas en esta unidad aquellas unidades rocosas que podrían ser agrupadas como acuíferos de roca fracturada, entre las cuales están las unidades conglomeráticas de la Formación Báucarit, la unidad Tc (ver Capítulo 4), las rocas volcánicas félsicas del

Terciario que se encuentran entre ellas, así como las porciones fracturadas o erosionadas del basamento, tales como caliza, que podrían contener agua subterránea.

La ubicación, las relaciones espaciales, y la distribución de estas unidades hidroestratigráficas se establecieron en base a secciones hidrogeológicas derivadas de los perfiles geoelectricos obtenidos en la parte mexicana de la cuenca.

### **5.3 Definición del Sistema del Acuífero**

En comparación con los acuíferos aluviales, las rocas cristalinas, y las rocas sedimentarias del pre-Cenozoico y Cretácico (con la excepción de la caliza y zonas de fractura) probablemente almacenan poca agua en la CBSP; sin embargo, estas litologías representan las zonas de recarga más importantes para los acuíferos aluviales primarios, ya que conforman las montañas donde cae una mayor precipitación (Pool y Dickinson, 2007). Como tal, pueden funcionar como acuíferos fracturados, pero son utilizados por pocos usuarios como su única fuente de agua. El conglomerado terciario fracturado (**Tc**) en la porción estadounidense de la cuenca es localmente importante y productivo como acuífero (Pool and Dickinson, 2007; incluido en la Unidad Hidroestratigráfica 3). Aunque hay algunos pozos que extraen agua de esta unidad, sus flujos son tan mínimos que sólo son suficientes para usos menores, principalmente como abrevaderos para el ganado. Esta condición hidrogeológica también caracteriza a la Formación Báucarit en el lado

mexicano de la cuenca. Las aguas subterráneas en la CBSP fluyen principalmente en las capas de sedimentos gruesos no consolidados que actúan como el relleno sedimentario de la cuenca (Unidad Hidroestratigráfica 1), así como en los depósitos superficiales Plio-Cuaternarios asociados con terrazas y depósitos aluviales, por lo que éstos representan los acuíferos principales de la cuenca (Pool y Dickinson, 2007).

El sistema acuífero se comporta como no confinado principalmente en los sedimentos del Relleno Superior de la Cuenca. Los sedimentos del Relleno Inferior de la Cuenca tienen espesores

mayores hacia el centro de la cuenca y se encuentran confinados por lentes sedimentarios ricos en arcilla (Unidad Hidroestratigráfica 2). Esta última unidad afecta fuertemente el flujo de agua en la cuenca, incluyendo la comunicación hidrológica entre el agua superficial en el Río San Pedro y los acuíferos regionales. Las unidades que conforman las terrazas y los depósitos aluviales del Pleistoceno Superior actúan como acuíferos secundarios importantes (Coes y Pool, 1999).

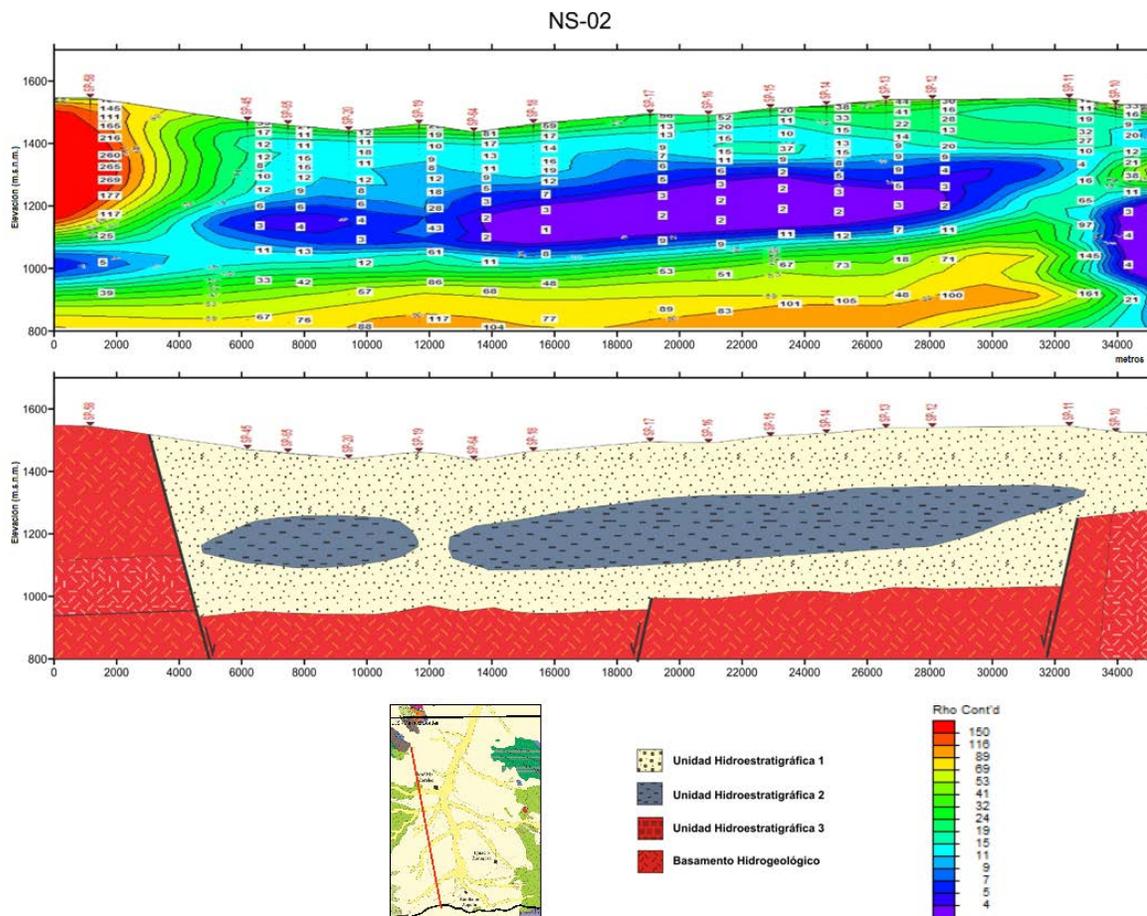


Figura 5.2 Distribución propuesta de las Unidades Hidroestratigráficas basado en los perfiles de resistividad (TEM), (y otra información) dentro del límite oriental de la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro. La localización del perfil se indica con una línea roja en el mapa geológico en la parte inferior de la figura (Ver Figura 4.1 para identificar la geología detallada). Las distancias en el perfil de resistividad y en el mapa están en metros.

## 6. PIEZOMETRÍA Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS

### 6.1 Estudio Integral de Pozos

El número de pozos en la CBSP es de alrededor de 5,000 (Figura 6.1), la mayoría de los cuales están ubicados cerca y al sur de la ciudad de Sierra Vista (REPD, 2012; ADWR, 2016). Respecto a la construcción de pozos y otro tipo de información disponible, se cuenta con datos sobre la profundidad total, del material de recubrimiento, elevación, la profundidad al espejo de agua, y una sola medición del nivel de agua estática tomada durante la perforación y el desarrollo del pozo. Hay más de 2,300 pozos que tienen una profundidad mayor a los 100 m, pero sólo un pequeño porcentaje de ellos tienen registros litológicos. Cada año, el ADWR, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, el Servicio de Investigación Agrícola (USDA ARS) y el USGS miden los niveles de agua en más de 70 pozos en la Subcuenca de SVSA. Aproximadamente cada cinco años, el ADWR mide los niveles de agua en cientos de pozos, que en conjunto proporcionan un entendimiento más completo de los patrones de nivel de agua subterránea en la región.

De acuerdo con el Registro Público de Derechos del Agua (CONAGUA, 2012), en el lado mexicano del acuífero San Pedro hay 194 pozos, los cuales se distribuyen principalmente a lo largo del cauce del Río San Pedro y cerca de Cananea (Figura 6.1). Del número total de pozos en el lado mexicano, 11 son pozos excavados a mano, 39 son pozos someros (<50 m) y 144 tienen

una profundidad que supera los 50 m. En México, los pozos se utilizan principalmente para el ganado (41% de los pozos), seguido por la industria (26% de los pozos) y la agricultura (21% de los pozos). El 12% restante es dedicado al uso municipal.

La figura 6.2 muestra la localización de pozos que cuentan con hidrogramas representativos para E.U.A. y México. Se seleccionaron 8 hidrogramas de pozos en los Estados Unidos para servir como ejemplo de los procesos hidrológicos particulares y/o configuraciones geográficas (Figuras 6.3 A-H). El pozo "Ranch (superficial)" (313610110163201) se localiza en el área de desarrollo (urbanización) no regulado al sur de Sierra Vista en el que la mayoría de los pozos son de propiedad privada. Desde 2006, los niveles de agua en este pozo están disminuyendo linealmente a una velocidad de aproximadamente 0.24 m/año. El monitoreo de los pozos 3 y 6 (MW3 (312830110102302) y MW6 (312555110074301)) se eligió para ilustrar los cambios típicos en el nivel agua de pozos dentro del cono de depresión que subyace entre Fort Huachuca y Sierra Vista (Schmerge et al, 2009; Konieczki, 1980). Desde 1995, estos pozos también han mostrado disminuciones lineales (0.18 m/año). El hidrograma para el monitoreo del Pozo 1 (MW1 (312323110020901)) fue elegido para mostrar el cambio en el comportamiento de los niveles de agua en este pozo, el cual iba presenta un descenso bastante lineal hasta cerca del 2006. Aunque hay algunas fluctuaciones, los niveles de agua de los últimos años parecen haberse estabilizado en

comparación con los descensos pre-2006. Esto podría ser causado por la recarga de la Planta de Operaciones Ambientales de Sierra Vista (EOP) que inició las recargas en julio del 2002 (EOP, 2015). El hidrograma para el pozo “Holder” de 366 m de profundidad (312250110063901) muestra lo que parece ser la recuperación y estabilización, probablemente causada por el retiro de pozos agrícolas cercanos especialmente antes del 2006, seguido de un cierto descenso debido a la constante sequía. Los cambios en el nivel del agua debido al bombeo cercano y a la gran profundidad del pozo indican que está muy probablemente proyectado en el acuífero confinado. La variabilidad continua en el registro probablemente es producto de la recarga de temporada y el bombeo de las inmediaciones de los pozos domésticos. El pozo “Foudy” (312323110020901) se encuentra cerca de Greenbush Draw, uno de los principales afluentes orientales del Río San Pedro, situado justo al norte de la frontera. El pozo, “Antelope Run # 3”, se encuentra en el lado oeste de la cuenca al pie de las montañas Huachuca cerca de Garden Canyon Wash. El fuerte aumento de los niveles de agua en ambos pozos después de una elevada precipitación en octubre del 2000 y empezando en el 2005-2006 indican que la precipitación y recarga subsecuente en los canales cercanos son los procesos más probables que controlan los niveles de agua en estos lugares. De hecho, Pool (2008) y Gungle et al (bajo revisión) utilizaron datos de descarga y de

nivel de agua apoyados por métodos de gravedad para sugerir que la recarga es uno de los factores principales que afectan los niveles de agua en el pozo “Antelope Run # 3”. El registro continuo del nivel de agua en LSP-1 representa el caso especial de los cambios en los niveles de agua diarios y estacionales en los pozos cerca del Río San Pedro que se proyectan en el acuífero aluvial. En LSP-1, los niveles de agua más altos están asociados con un alto flujo durante la temporada del monzón. Un segundo aumento de los niveles de agua inicia en el otoño, cuando la evapotranspiración cesa. Además, es probable que un número de alteraciones en los niveles de agua subterránea tales como en el 2003, y que de otra manera resulta muy difícil de explicar, se deban a la lentitud de llenado y vaciado rápido de lagunas de castores después de grandes eventos de flujo en el río (Gungle et al, bajo revisión).

En Sonora, dependiendo de la ubicación, la profundidad y el intervalo de evaluación, parte de la variabilidad en los pozos recién descrita se debe a la variabilidad a largo plazo en los ciclos climáticos (Véase el Capítulo 3 y Dickinson et al, 2004, y Hanson et al, 2006). En particular, Hanson et al (2006) y Dickinson et al (2004) encontraron que las asociaciones fuertes en la cuenca del San Pedro son con la PDO, el NAM y ENSO, con la PDO contribuyendo a las variaciones climáticas e hidrológicas que por lo general van desde 10-25 años, NAM (6-10 años), y ENSO (2-6 años).

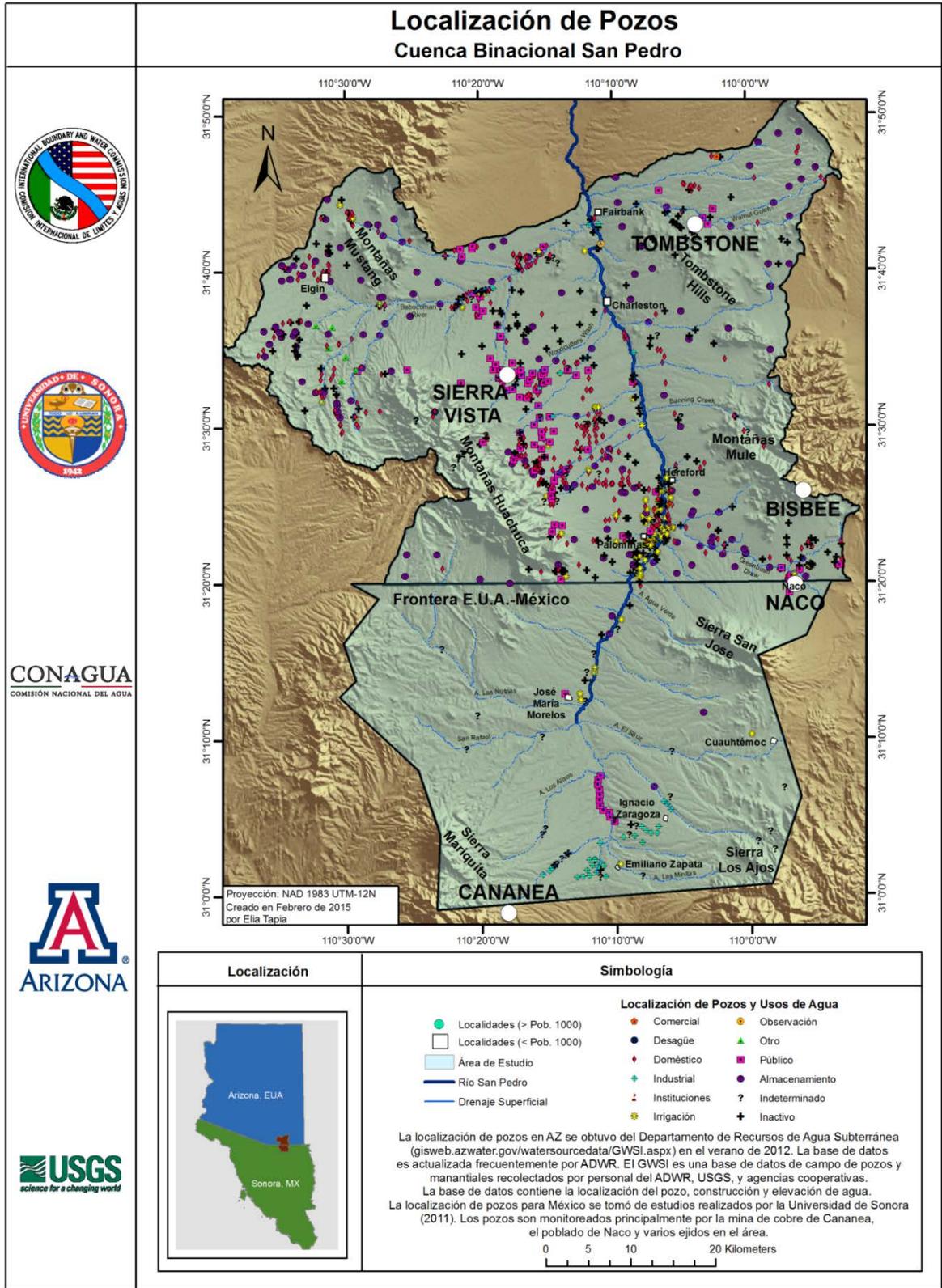


Figura 6.1 Ubicación de Pozos seleccionados distinguidos por el Uso de Agua en la Cuenca Binacional San Pedro.

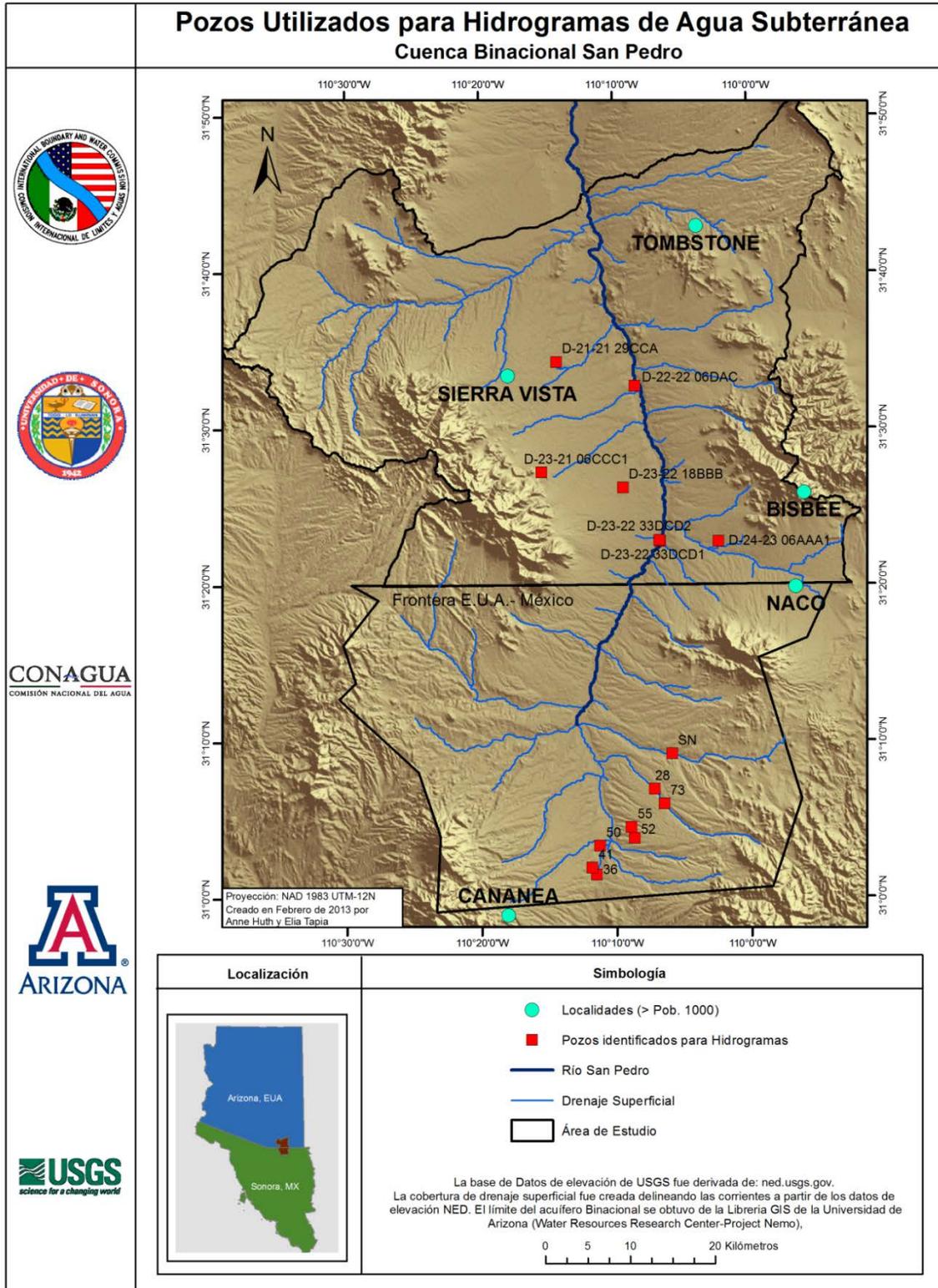
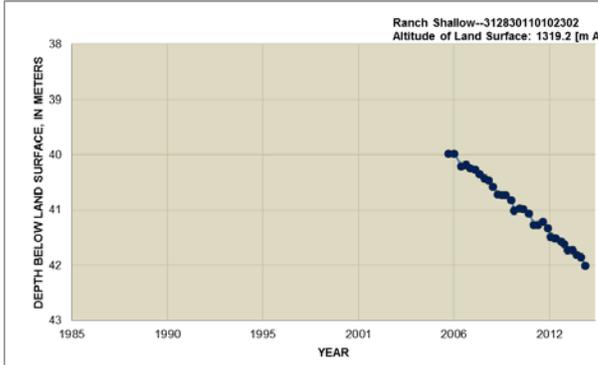
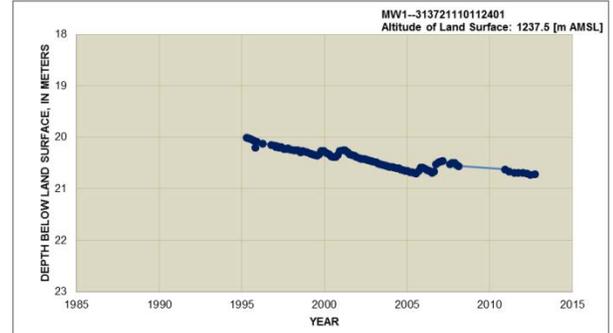


Figura 6.2 Pozos identificados para la elaboración de Hidrogramas en la Cuenca Binacional San Pedro. Los Hidrogramas en E.U.A. fueron seleccionados para resaltar los diferentes entornos geográficos y los procesos hidrológicos de interés. Ver texto, apéndices e hidrogramas individuales más abajo en el documento para más detalles, tales como hidrogramas individuales, códigos del USGS para la identificación de los sitios y coordenadas de ubicación.

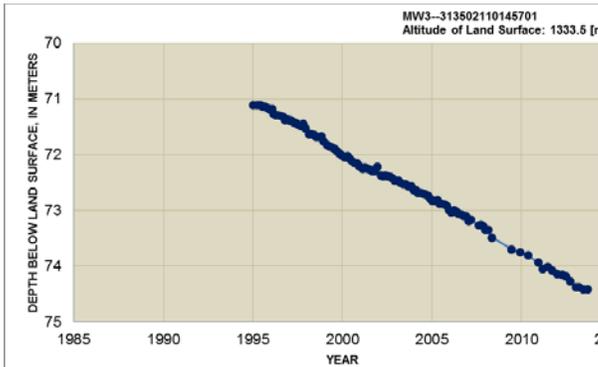
A. Pozo Ranch Shallow



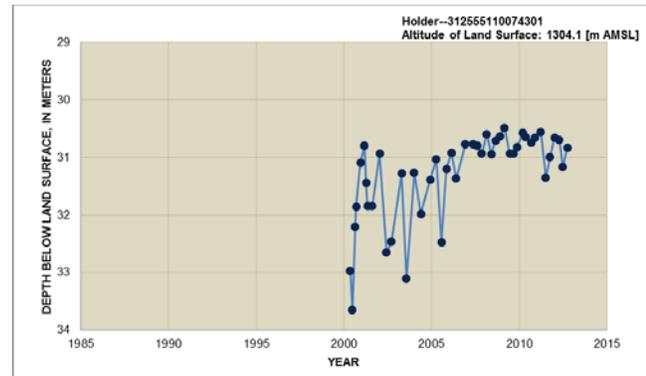
D. Pozo MW1



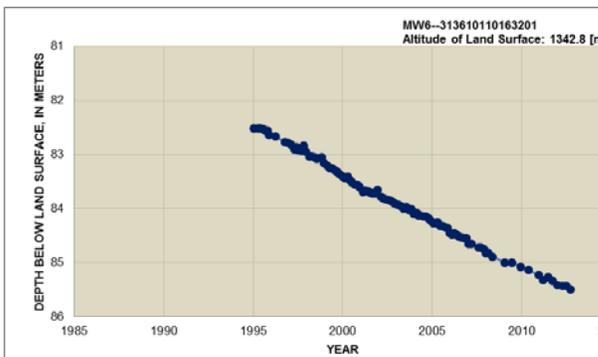
B. Pozo MW3



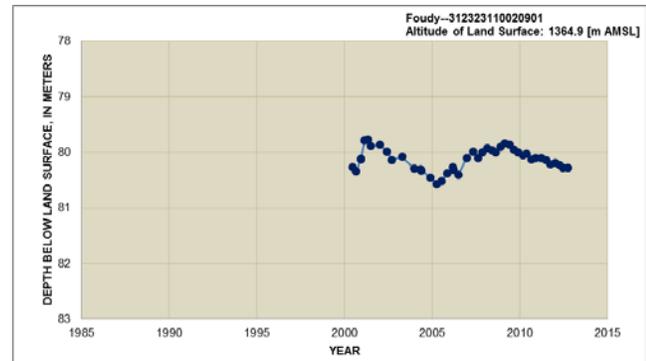
E. Pozo Holder



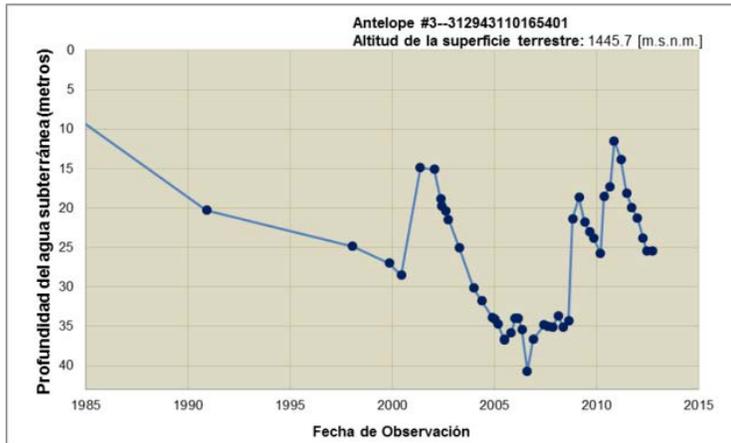
C. Pozo MW6



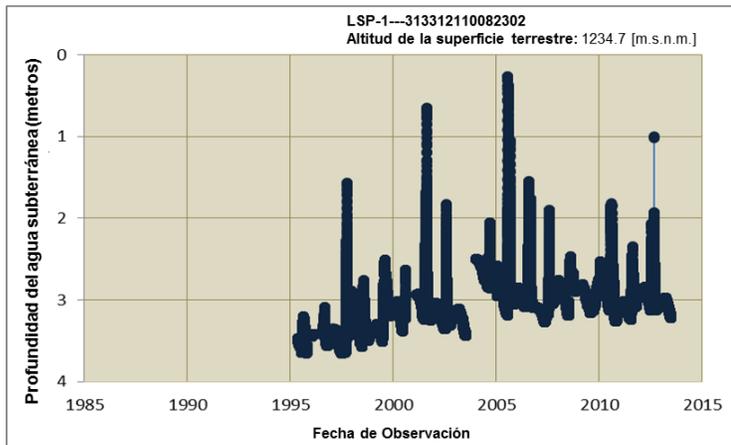
F. Pozo Foudy



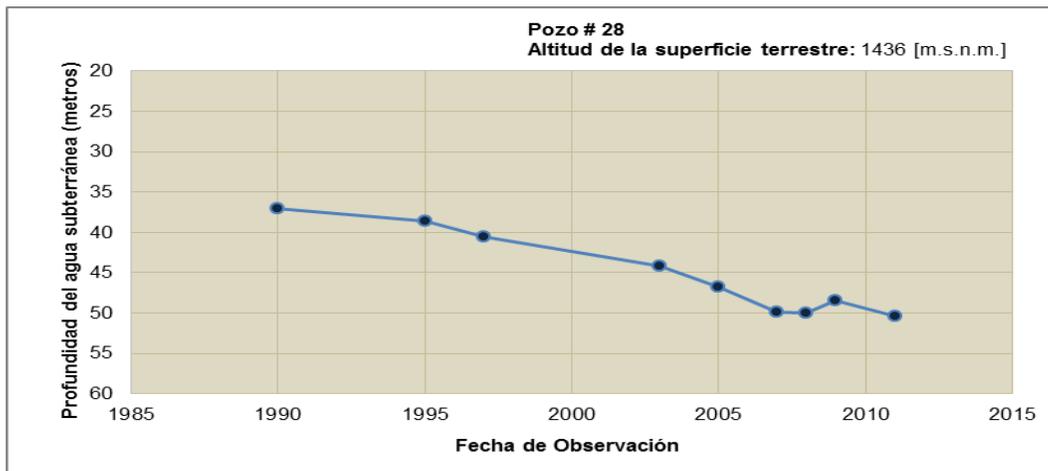
### G. Pozo Antelope #3



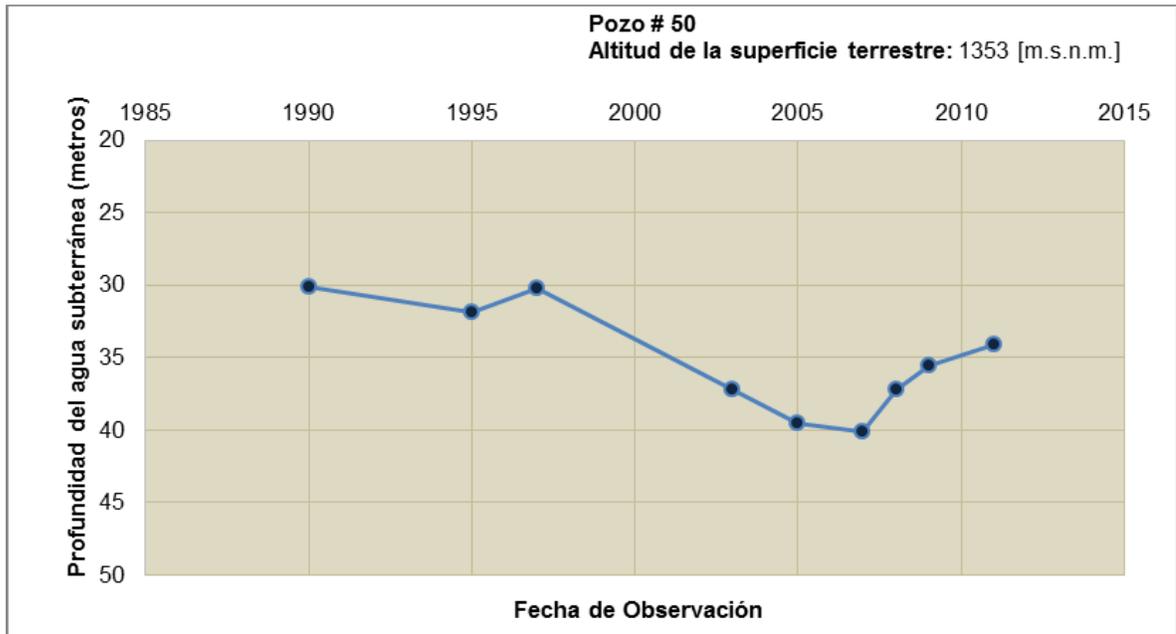
### H. Pozo LSP-1



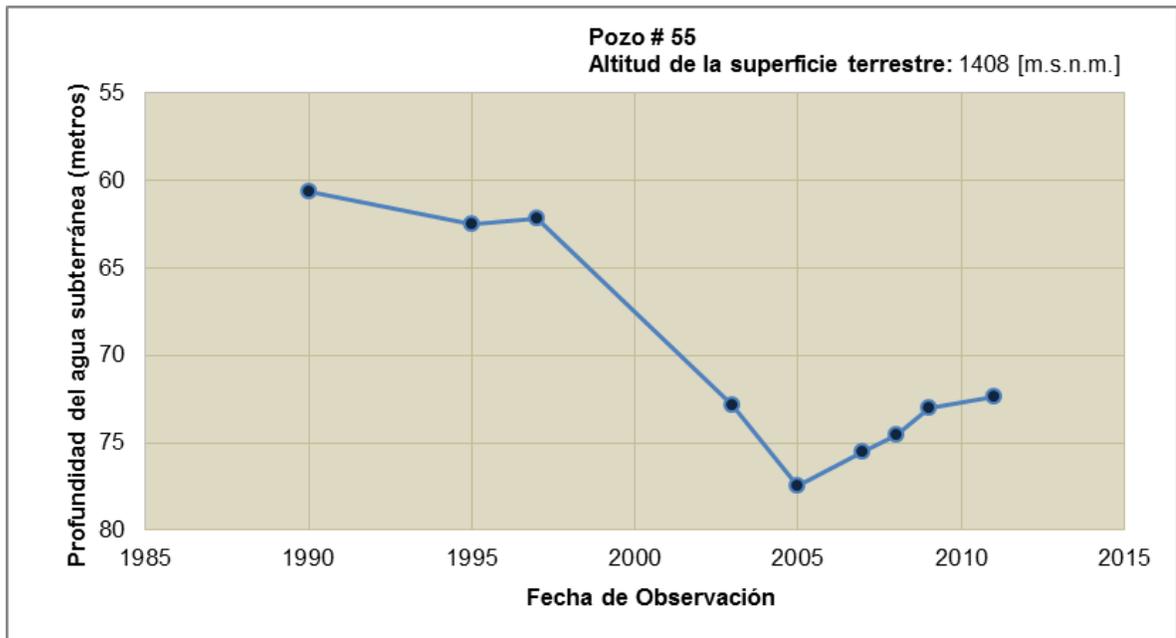
### I. Pozo # 28



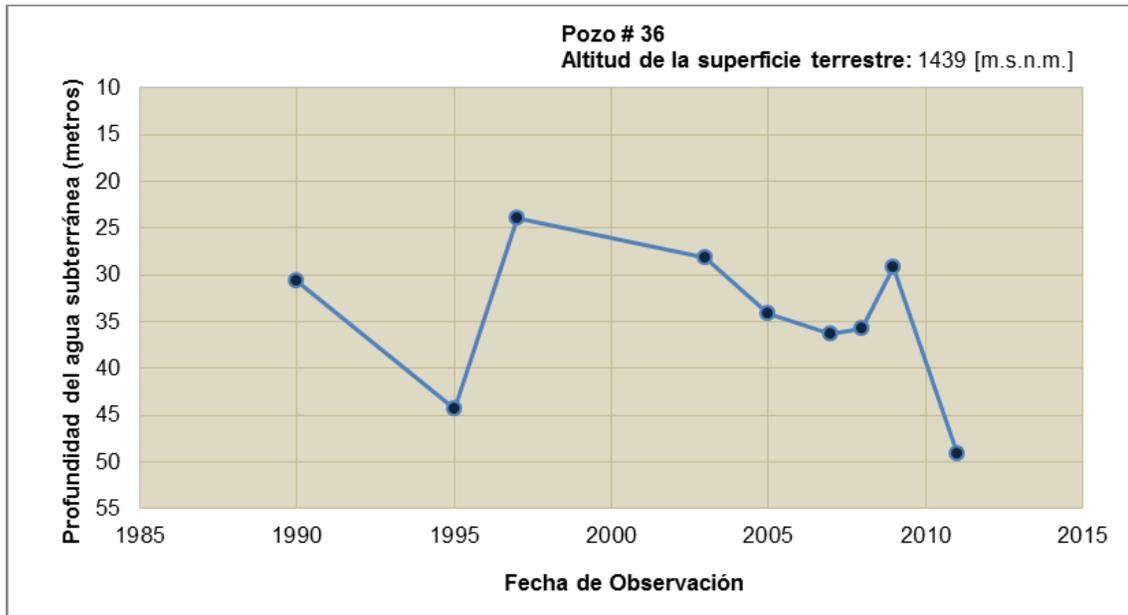
J. Pozo # 50



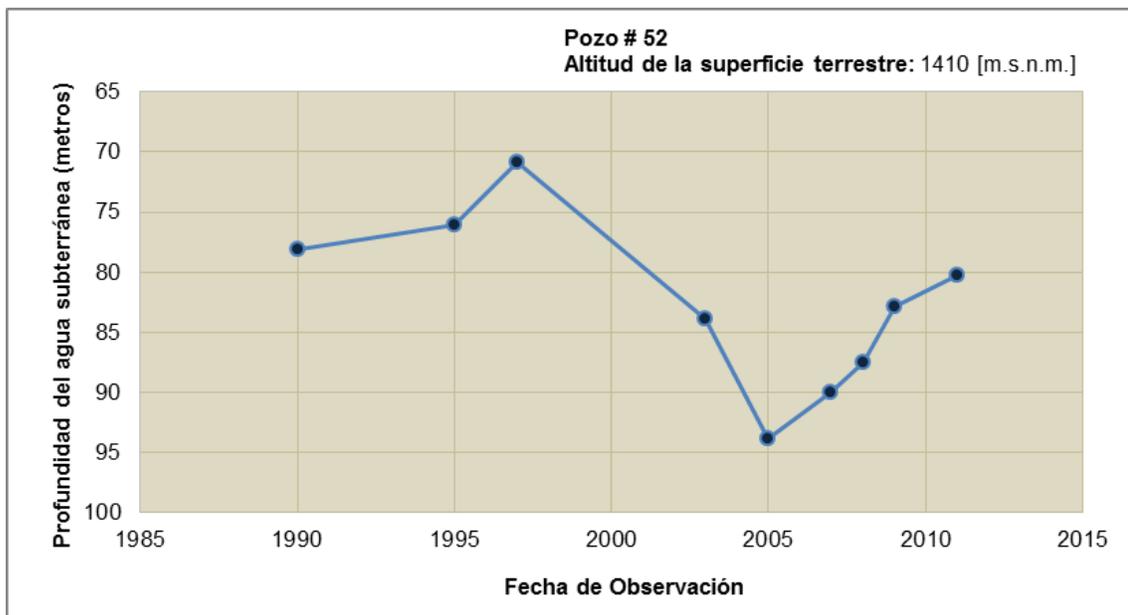
K. Pozo # 55



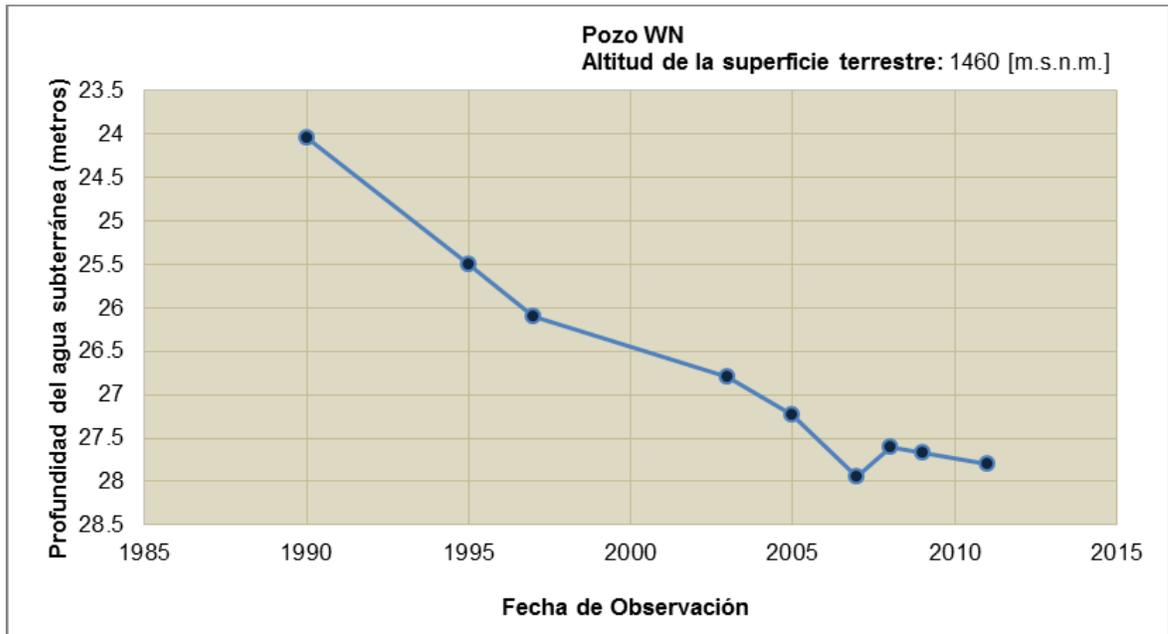
L. Pozo # 36



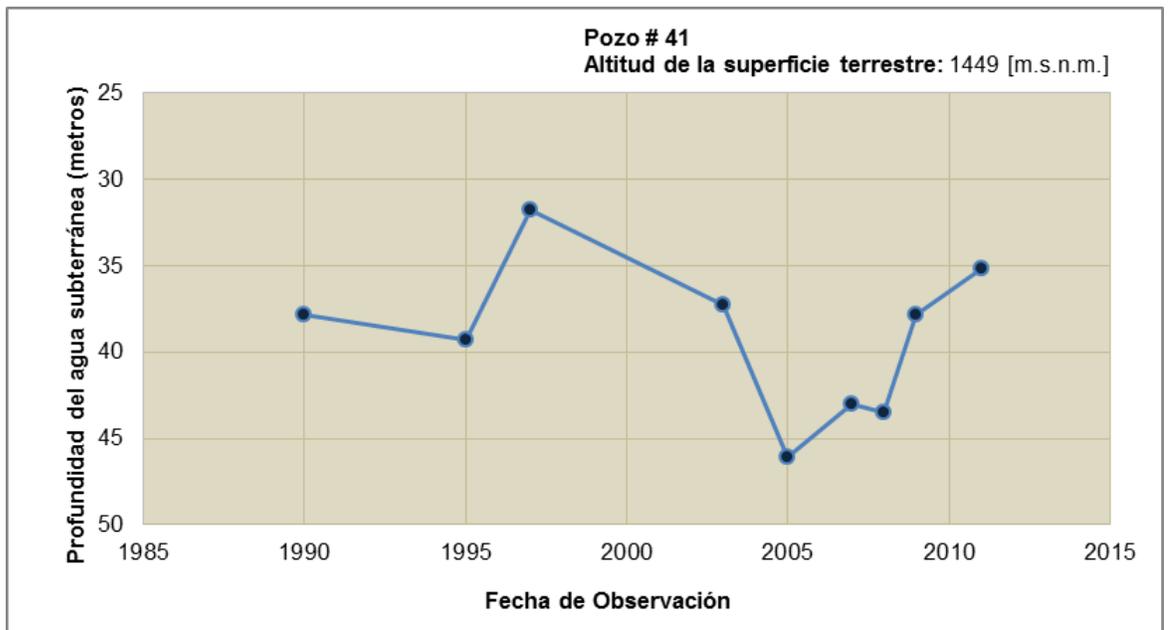
M. Pozo # 52



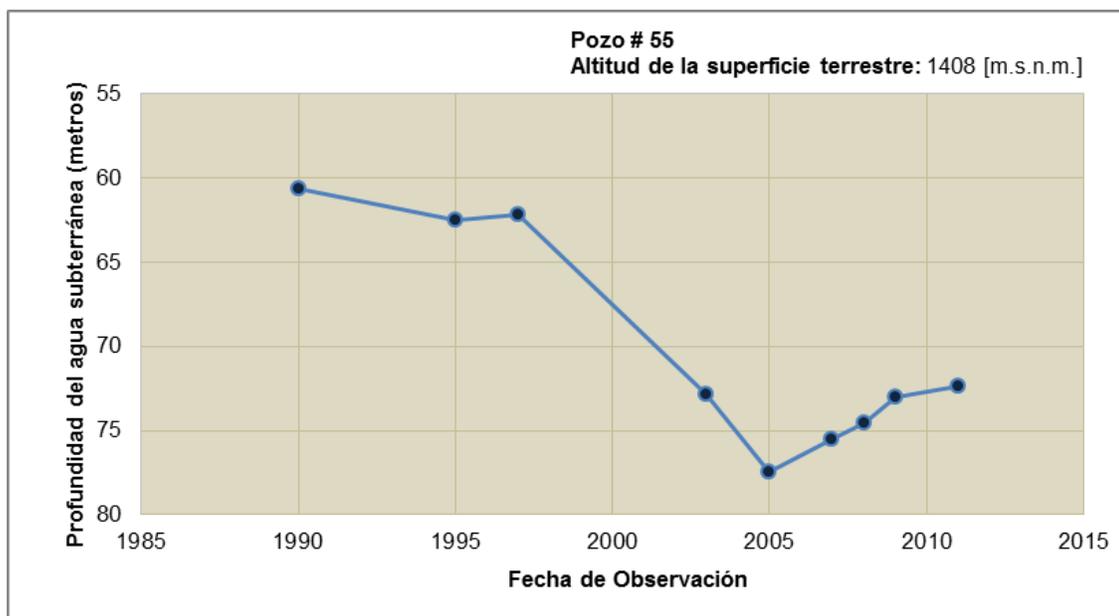
N. Pozo # WN



O. Pozo # 41



P. Pozo # 55



Usos	No. De Pozos	Volumen (hm <sup>3</sup> )
Agrícola	41	8.2
Doméstico	4	9.7
Pecuario	86	0.53
Público Urbano	21	1.8
Industrial	51	13.8
<b>Total</b>	<b>203</b>	<b>24.3</b>

Tabla 6.1 Volumen Anual Concesionado para el acuífero Río San Pedro en México (REPDA, 2012). Las concesiones de agua subterránea se designan por tipo de usuario y se determinan por CONAGUA por período específico.

### 6.2 Descripción de la Variabilidad Espacial y Temporal de los Niveles de Agua

Las elevaciones en el nivel freático, que representan condiciones confinadas y no confinadas, generalmente aumentan desde el Río San Pedro hacia las montañas, con la excepción de los conos de depresión. La extensa capa de arcilla y limo que se encuentra en ambos lados de la

frontera (Ver sección 4.6) actúa como una unidad de confinamiento que históricamente dio origen a los pozos brotantes. Actualmente pocos permanecen en esta condición. La profundidad al agua es variable encontrándose los niveles de agua poco profundos normalmente cerca de los frentes de montaña y el Río San Pedro, y mayores profundidades entre éstos. La profundidad al nivel

estático del agua en el lado mexicano oscila entre 2.5 m a 72.4 m, con la primera encontrándose en la parte sureste del acuífero en el rancho El Cuatro ubicado en el Ejido Zaragoza, mientras que la mayor profundidad se encuentra en el pozo 55, en Cieneguita (Figura 6.3). Las mayores profundidades de nivel de agua se encuentran en el sur, en las zonas conocidas como Arroyo Claro, Patos Sur, Barrilitos y Ampliación del Río; excepto para el pozo 401, que se encuentra al sureste de El Ejido José María Morelos y Pavón, el cual se localiza al oeste del acuífero (Ver Apéndice 11.5 para nombres y coordenadas).

Las elevaciones del nivel estático del agua en la SASPS se encuentran dentro de un rango de 1290 a 1674 m.s.n.m. (Figura 6.4); las elevaciones más bajas tienden a estar en las áreas con mayor prominencia topográfica, las cuales se encuentran en la parte suroeste del acuífero cerca de la sierra Los Ajos. El valor máximo para la elevación del nivel estático del agua se encontró en el Ejido Zaragoza. El valor mínimo fue de 1,290 m s.n.m. en la parte sur del acuífero. En general, las elevaciones del nivel estático del agua disminuyen hacia el norte, lo que refleja la trayectoria del flujo de agua subterránea preferencial hacia el Río San Pedro y al norte.

En la SSVA, dentro de los límites de la ciudad de Sierra Vista, la profundidad de agua subterránea es superior a los 100 m en algunos de los pozos. Las elevaciones en el nivel estático del agua y las tendencias del nivel del agua sugieren

conos de depresión en y cerca de las ciudades de Sierra Vista, Tombstone y Cananea causados por el bombeo actual e histórico de agua subterránea (Roeske y Werrell, 1973; Konieczki, 1980; Schmerge et al, 2009). Los cambios en los niveles de agua entre el año 2001 y 2006 para la Subcuenca Sierra Vista fueron calculados por Schmerge et al. (2009). Cerca de Tombstone, los cambios oscilaron entre 3.1 m y 3.4 m. En el área de Ciudad de Huachuca, Sierra Vista, y Nicksville, Arizona, los niveles de agua han disminuido entre 3.4 y 9.1 m durante ese mismo período. Durante este mismo intervalo, en el área al suroeste de Charleston, la mayoría de los niveles de agua se han recuperado, con un aumento total de entre 0.61 m y 5.8 m. El aumento se produjo probablemente como resultado de la planta de tratamiento de aguas residuales que está recargando al acuífero con agua tratada (Brown y Caldwell, 2009). También, hay un aumento en los niveles de agua (generalmente entre 0.3-1 m) cerca de Hereford y al sur hacia la frontera que podría haber resultado de la cancelación, a principios y mediados del 2000, de la mayor parte de bombeo agrícola en esta zona. Las áreas de recarga localizadas cerca de barrancos y/o frentes de montaña posiblemente están relacionadas a la alta precipitación en octubre del 2000.

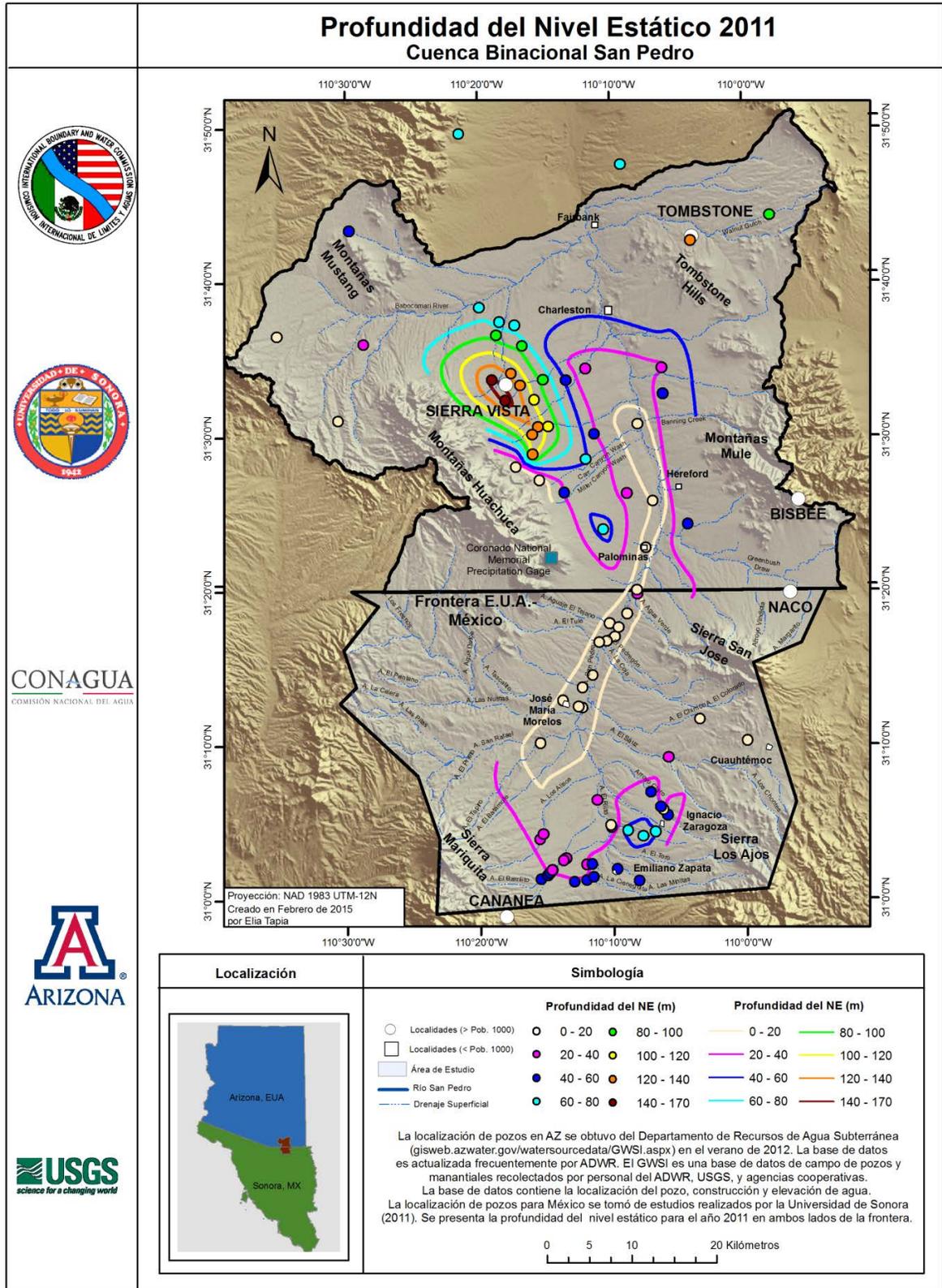
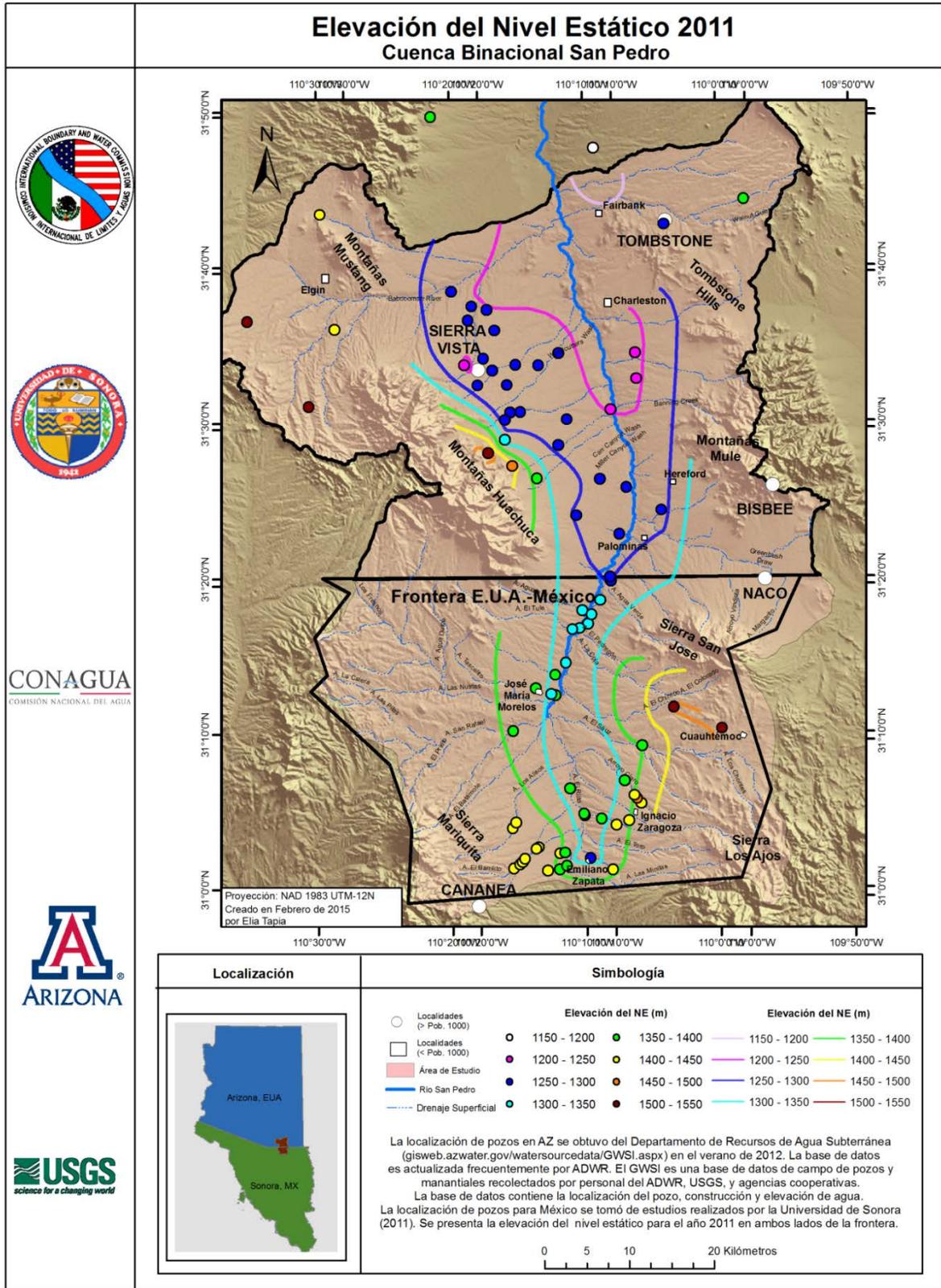


Figura 6.3 Profundidad al Nivel Estático del Agua en el 2011 en la Cuenca Binacional San Pedro.



**Figura 6.4 Elevación del Nivel Estático en el 2011 en la Cuenca Binacional San Pedro.**

### **6.3 Definición e interpretación de los parámetros hidráulicos de la subsuperficie**

Los parámetros hidráulicos representan las restricciones en el flujo de agua impuestas por las propiedades físicas y del fluido de un sistema acuoso en un medio de roca porosa. La estimación y el entendimiento de la variabilidad espacial y temporal de estas propiedades es fundamental para comprender y predecir los flujos, el comportamiento de los niveles de agua y los cambios en el almacenamiento del acuífero en respuesta a los cambios en factores como el clima, el bombeo, manejo de recarga del acuífero, y las prácticas de manejo del suelo entre otros. Las pruebas de bombeo (o pruebas de acuíferos) se pueden utilizar para probar un gran número de hipótesis acerca de las condiciones de acuíferos cercanos a, y entre pozos. Más comúnmente se utilizan para estimar la transmisividad del acuífero y propiedades de almacenamiento. La transmisividad es el producto del espesor saturado del acuífero y de la conductividad hidráulica. Las pruebas de bombeo en el lado estadounidense son limitadas, pero se realizaron dos en los pozos en Fort Huachuca (Brown et al. 1966). La primera se llevó a cabo en 1958 en el pozo D-21-20 33dbb (Sitio No.: 313338110185601) el cual tenía una profundidad total de 68.8 m, con 21.3 m en el Relleno de la cuenca superior y 47.5 m en Relleno de la cuenca inferior (Figura 6.6). Se estimó una transmisividad hidráulica de 1,860 m<sup>2</sup>/d. Se utilizaron otros dos pozos (D-21-20 3bbb1 y 2, Sitio No.: 55-537824) junto con un pozo de

observación para estimar una transmisividad de 2,860 m<sup>2</sup>/d, con un coeficiente de almacenamiento de  $1.6 \times 10^{-5}$ . Los tres pozos fueron evaluados sólo en el Relleno de la cuenca inferior (Unidad Hydroestratigráfica 1). Aparte de éstos, las mediciones de parámetros hidráulicos en la SVSA son limitadas. Sin embargo, existen valores del modelo calibrado de Pool y Dickinson (2007, Tabla 6.2). Estos valores fueron calculados tanto para el lado mexicano como para el estadounidense de la cuenca, y, en general, la conductividad hidráulica saturada (K) varía entre 0.0001 y 12.50 m/d. Las rocas sedimentarias (incluyendo caliza), ígneas y metamórficas tienen valores estimados K que varían entre 0.625 y 0.0001 m/d (Pool y Dickinson, 2007). El Relleno de la cuenca superior tiene valores calibrados de 7 m/d para arena y grava, y de 0.050 m/d para la arcilla, limo, arena y grava de baja permeabilidad con un promedio de 3.46 m/d. El Relleno de la cuenca inferior, que es más compacto, varía entre 6.25 m/d y 0.001 m/d, con un promedio de 0.98 m/d. Hay zonas en el acuífero donde hay datos insuficientes para clasificar el aluvión ya sea como Relleno de cuenca inferior o superior (Pool y Coes, 1999; Pool y Dickinson, 2007). No obstante, las propiedades del acuífero se estimaron durante la calibración del modelo y varían entre 10 y 0.0013 m/d. El aluvión asociado con el río tiene la mayor permeabilidad en la cuenca, oscilando desde 12.5 hasta 7.5 m/d.

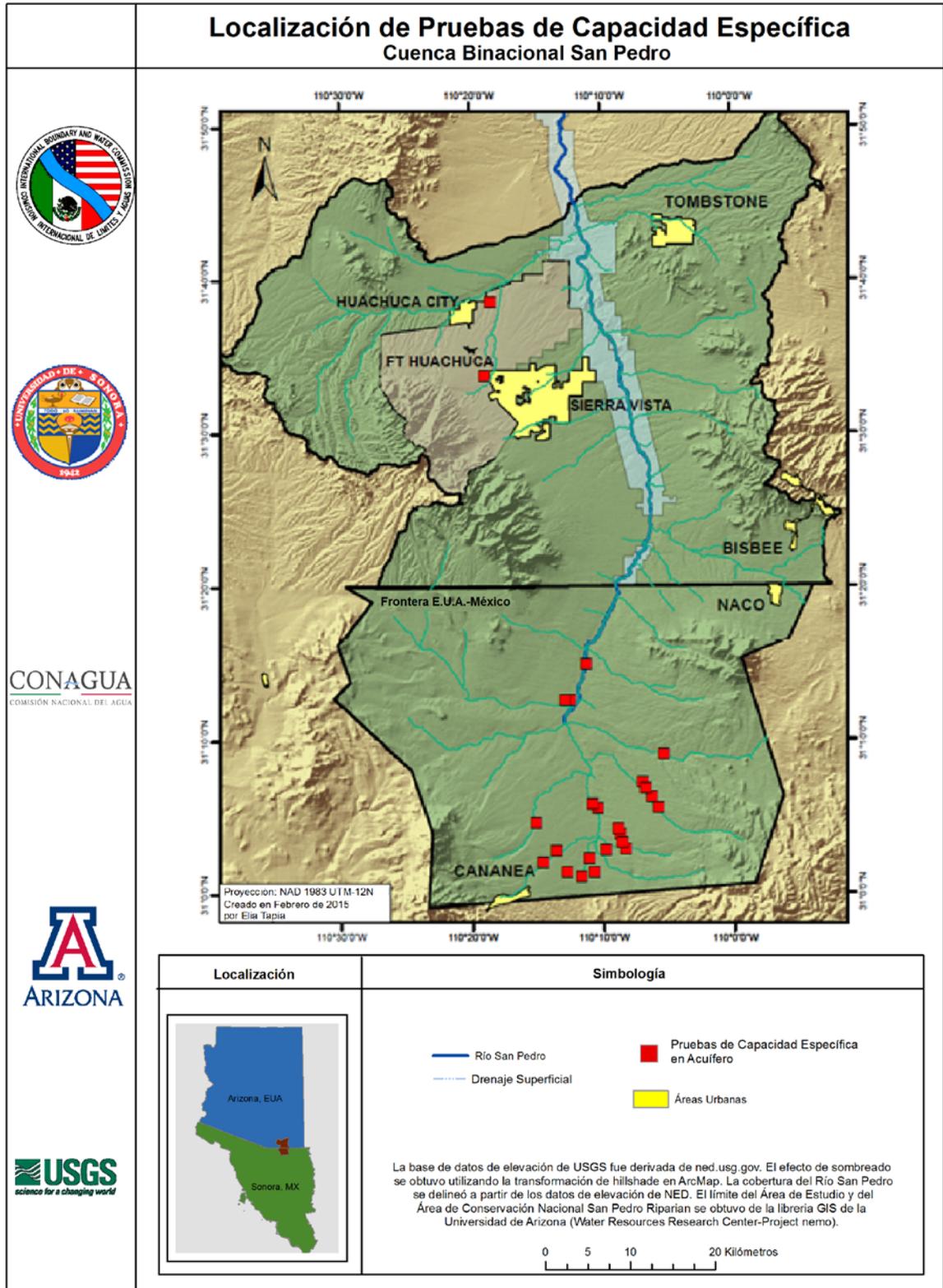


Figura 6.5 Localización de pozos donde se llevaron a cabo pruebas de capacidad específica.

La Anisotropía Vertical ( $K_h/K_v$ ) es la relación de  $K$  en la dirección horizontal ( $K_h$ ) a  $K$  en la dirección vertical ( $K_v$ ). Es una medida de la facilidad relativa con la que el agua fluye horizontalmente en comparación a su flujo vertical. En las rocas y el relleno no diferenciado, la anisotropía promedio varía en menos de un orden de magnitud, de 3.5 a 9.4 (Pool y Dickinson, 2007). En el Relleno de la cuenca inferior y superior,  $K_h/K_v$  se estimó estar entre 10.8 y 26.8, respectivamente en las arenas y gravas, y entre 27.3 y 122.5 en las rocas intercaladas y en arcilla y limo. En el aluvión,  $K_h/K_v$  se estimó entre 7.5 y 22.5 dependiendo en parte de la posición geomorfológica.

El Almacenamiento específico ( $S_s$ ) es una característica de los acuíferos que describe el volumen de agua producido por la expansión del agua y la descompresión del medio poroso cuando la carga hidráulica disminuye (Freeze y Cherry, 1979). Los valores calibrados para  $S_s$  para los acuíferos varían poco en la CBSP, y van desde  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  hasta  $6.7 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$  (Pool y Dickinson, 2007). El rendimiento específico ( $S_y$ ) es el volumen de agua que es producido por un acuífero no confinado cuando el espejo de agua disminuye. Típicamente,  $S_y$  es dos o tres órdenes de magnitud mayor que  $S_s$ . En la CBSP,  $S_y$  oscila entre un mínimo de 0.001 en roca dura a 0.3 en las gravas y arenas de los rellenos de cuenca y aluviones. Se utilizaron métodos de microgravedad y los cambios en los niveles de agua de pozo para estimar un valor de  $S_y$  de 0.09 para el pozo Antílope # 3 (Gungle et al, bajo revisión) y 0.14

para un pozo cerca de Garden Canyon Wash (Pool, 2008).

De acuerdo con la "Actualización del Estudio Geohidrológico de las Cuencas del Río San Pedro y Norte del Río Sonora en Cananea, Sonora" (Consultores en Agua Subterránea, S.A., 2000), hay información de 13 pruebas de bombeo y 11 pruebas de capacidad específicas en la SASPS, (5 de las pruebas se realizaron durante este proyecto y las otras fueron compiladas de la literatura). En la SASPS, el valor de la conductividad hidráulica  $K$  varía entre  $8.35 \times 10^{-4} \text{ m/día}$  y  $5.14 \text{ m/día}$  (Tabla 6.3). El valor mínimo se encontró en el pozo 73, ubicado en el Ejido Ignacio Zaragoza. La mayor conductividad se encuentra en el pozo 30, situado en la zona de Patos Sur. Con respecto a la transmisividad del acuífero, que es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor del acuífero, los valores oscilaron entre  $29.6 \text{ m}^2/\text{s}$  y  $1990 \text{ m}^2/\text{s}$ . El valor mínimo se encontró en el pozo de COAPAES No. 3 ubicado en la zona Riíto, y el máximo en el pozo No. 28, cerca del Ejido Ignacio Zaragoza. Pool y Dickinson (2007) publicaron un mapa binacional con las estimaciones simuladas de transmisividad (Figura 6.6). Los valores oscilaron desde por debajo de  $50 \text{ m}^2/\text{día}$  en áreas de limo y arcilla (cerca del centro de la cuenca o a lo largo de los afluentes; véase también las Figuras 4.7 y 4.8), o roca sedimentaria y cristalina (a largo de los márgenes de la cuenca). Los valores más altos, entre 1000 y  $3000 \text{ m}^2/\text{día}$ , se encuentran en zonas de arena y grava.

Unidad hidrogeológica	Conductividad Hidráulica m/d			Anisotropía vertical Kh/Kv			Almacenamiento específico m <sup>-1</sup>			Gasto Específico		
	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Max	Mín	Prom.	Máx.	Mín.	Prom.	Máx.	Mín
Caliza	0.072	0.625	0.0006	7.9	17.5	5	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	0.011	0.02	0.01
Rocas Sedimentarias	0.039	0.3	0.0001	7.3	17.5	5	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	0.088	0.2	0.01
Graníticas y metamórficas	0.006	0.05	0.0001	8.8	17.5	5	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	0.006	0.01	0.001
Volcánicas	0.018	0.063	0.0001	7.1	17.5	5	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	0.002	0.01	0.001
<b>Relleno indiferenciado</b>												
Arena y grava indiferenciada	0.7978	10	0.0003	9.4	17.5	3.5	2.4x10 <sup>-6</sup>	5.0x10 <sup>-6</sup>	1.0x10 <sup>-6</sup>	0.12	0.2	0.01
Limo y arcilla indiferenciada	0.285	1.25	0.0013	3.5	3.5	3.5	5.0x10 <sup>-6</sup>	5.0x10 <sup>-6</sup>	5.0x10 <sup>-6</sup>	0.25	0.25	0.25
<b>Relleno de cuenca alta</b>												
Arena y grava	3.459	7	0.05	26.8	75	8.8	1.5x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	1.0x10 <sup>-6</sup>	0.177	0.3	0.1
Intercaladas	0.887	4	0.02	27.3	87.5	8.8	2.0x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	0.15	0.25	0.05
Limo y arcilla	0.229	1	0.05	65	87.5	8.8	2.0x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	2.0x10 <sup>-5</sup>	0.057	0.1	0.05
<b>Relleno de cuenca baja</b>												
Arena y grava	979	6.25	0.0002	10.8	36.1	3.5	3.5x10 <sup>-6</sup>	5.0x10 <sup>-6</sup>	1.0x10 <sup>-6</sup>	0.119	0.2	0.01
Intercalada	0.785	4	0.01	38.2	122.5	12.3	6.7x10 <sup>-5</sup>	1.0x10 <sup>-6</sup>	5.0x10 <sup>-6</sup>	0.092	0.1	0.05
Limo y arcilla	0.005	0.01	0.001	122.5	122.5	122.5	6.3x10 <sup>-5</sup>	1.0x10 <sup>-5</sup>	5.0x10 <sup>-6</sup>	0.05	0.05	0.05
<b>Aluvión</b>												
Indiferenciada	4.929	12.5	2.5	8.9	22.5	3.5	3.9x10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	0.264	0.3	0.25
Pre-atrincheramiento	7.5	7.5	7.5	22.5	22.5	22.5	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	0.291	0.3	0.2
Post-atrincheramiento	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	1x10 <sup>-6</sup>	0.3	0.3	0.3

**Tabla 6.2 Parámetros hidráulicos subterráneos para la cuenca alta del Río San Pedro, de Pool y Dickinson (2007)**

Código	Fase	X Coord.	Y Coord.	Q (lps)	T (ft <sup>2</sup> /d)	K (m/d)
3	Reducción	578820	3439956	19.69	319	.114
4	Reducción	578163	3440450	41.1	335	.113
14	Reducción	579837	3434918	33	1370	.616
27	Reducción	576849	3431730	57	6830	2.71
28	Reducción	584235	3443171	50	21400	4.48
29	Reducción	577795	3433957	40.1	2350	.452
73	Recuperación	585313	3441409	20.24	-	.000835
87	Reducción	582222	3435070	19.71	406	.368
95	Reducción	586811	3446573	9.08	7730	1.94
126	Reducción	577348	3457302	19	11500	.0760
147	Reducción	575377	3452973	24.7	885	.243
148	Reducción	574825	3452912	24.05	1190	.242
30	Recuperación	575114	3432194	51	8270	5.14
34	Recuperación	578426	3432287	28	6350	1.67
50a	Recuperación	581554	3436863	33	2670	.856
51	Recuperación	581802	3435905	24	3710	2.54
53	Recuperación	581265	3437451	33	3620	1.14
62	Recuperación	572170	3433400	51	10900	3.6
66	Reducción	573773	3434823	50	5670	.887
	Recuperación	573773	3434823	54.39	6170	-
68	Recuperación	571302	3438109	76.96	4520	1.49
71	Recuperación	586154	3440141	46	12800	2.53
75	Reducción	584659	3442429	32.5	13600	2.25
	Recuperación	584629	3442429	43.41	8690	-

**Tabla 6.3 Pruebas de bombeo en la porción mexicana de la Cuenca Binacional San Pedro (Consultores en Agua Subterránea, S.A., 2000, todas las pruebas de bombeo fueron revisadas y aprobadas por la CONAGUA).**

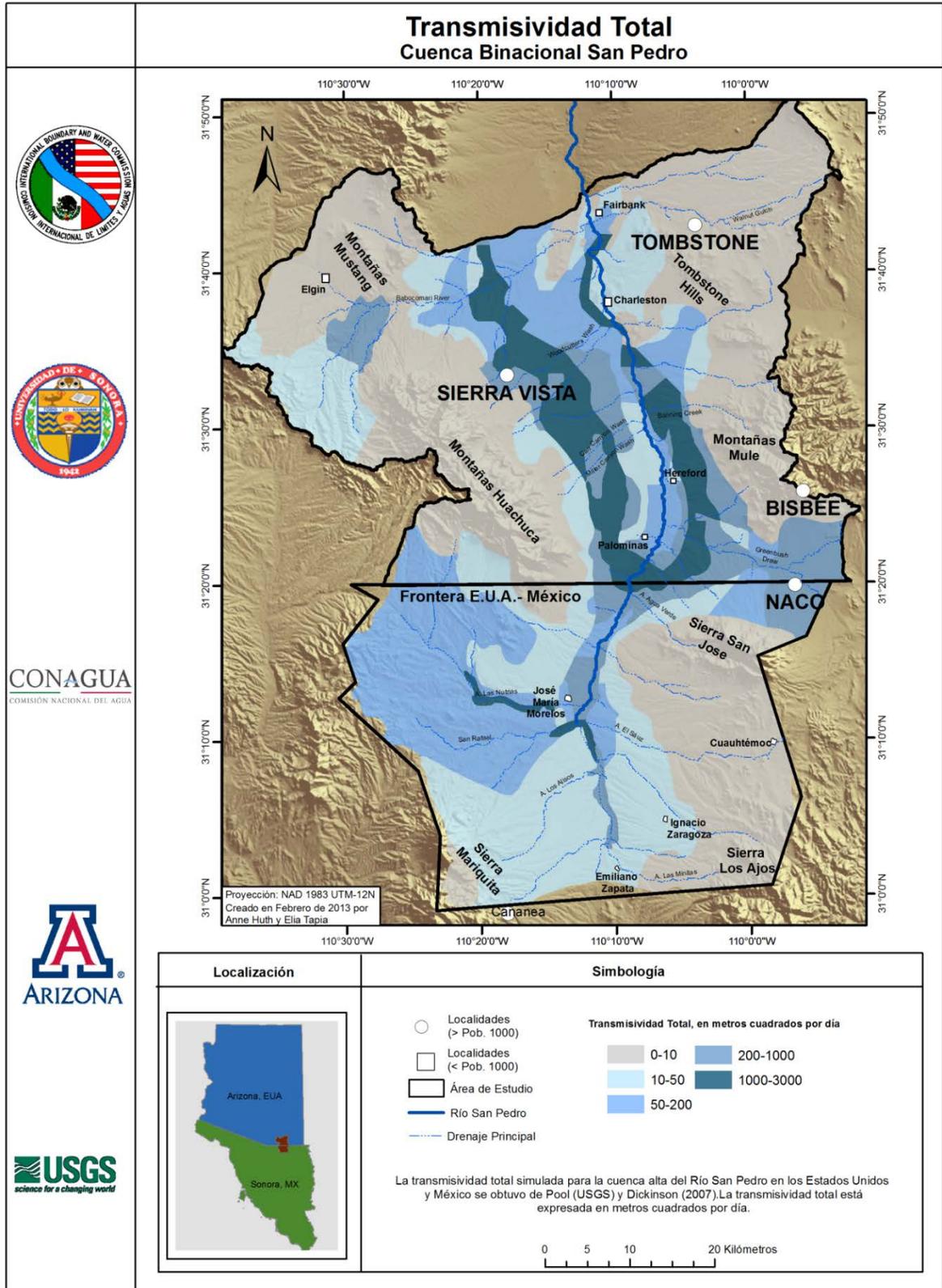


Figura 6.6 Distribución de Transmisividad en la Cuenca Binacional San Pedro (Pool y Dickinson, 2007).

## 7. HIDROGEOQUÍMICA

### 7.1 Muestreo Hidrogeoquímico

El ADWR y USGS muestrean aproximadamente cada 5 años la calidad de agua para adquirir información básica, incluyendo datos sobre la temperatura de agua subterránea, pH y conductividad eléctrica. Toda esta información está disponible en las bases de datos mantenidas por estas agencias. Las bases de datos incluyen principalmente la información recolectada por personal técnico estatal y federal (ADWR y USGS) de acuerdo con los protocolos establecidos, incluyendo las publicadas en el USGS Manual del Campo Nacional (Servicio Geológico de Estados Unidos). La parte de la calidad del agua de la base de datos del Sistema Nacional de Información del Agua (NWIS, por sus siglas en inglés) del Servicio Geológico de Estados Unidos se encuentra disponible en el enlace: <http://waterdata.usgs.gov/az/nwis/qw/>. A través del siguiente enlace: [https://gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/gws\\_i.aspx](https://gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/gws_i.aspx), se puede acceder libremente a la base de datos del ADWR Inventario de los Sitios de Aguas Subterráneas (IMAS, por sus siglas en inglés). Además de estos datos básicos sobre la calidad del agua en Arizona, hay datos adicionales generados por las agencias estatales y federales. En Arizona, la calidad del agua es administrada por el Departamento de Calidad Ambiental de Arizona (ADEQ) en coordinación con la USEPA. En cumplimiento con las normas estatales y federales, los operadores de servicios públicos y privados deben recolectar datos sobre la calidad del agua

subterránea. Además, el personal estatal muestrea periódicamente cuencas por todo el estado. ADEQ mantiene la información de varios parámetros químicos y físicos de calidad del agua en su Base de Datos de Aguas subterráneas ADEQ (ADEQ Groundwater Database). La USEPA mantiene una base de datos de calidad del agua y otra información llamada STORET (<http://www.epa.gov/storet/>). ADEQ y USGS prepararon anticipadamente un informe conjunto sobre la calidad de las aguas subterráneas para el área de estudio (Coes et al, 1999).

Para efectos de este informe, el muestreo de la calidad del agua del acuífero Río San Pedro se llevó a cabo en Sonora, en julio del 2011 por el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora (Minjarez et al., 2011), durante el cual se recolectaron 20 muestras en varios pozos de bombeo. Se analizaron los parámetros de campo de las muestras (conductividad eléctrica, pH, alcalinidad y temperatura), y posteriormente fueron enviadas a un laboratorio certificado, Analítica del Noroeste, para el análisis de aniones y cationes. Con la intención de dar la mejor representación posible de las propiedades químicas del agua en el acuífero Río San Pedro, el espaciamiento de los muestreos fue elegido en base a la densidad de los pozos de agua subterránea para representar de la mejor manera posible las condiciones hidrogeológicas existentes espacial y temporalmente, así como para cubrir la mayor fracción posible del área de estudio. Se tomaron muestras del tubo de descarga de los pozos, y en el caso de pozos excavados de gran

diámetro sin bombas, el muestreo se llevó a cabo utilizando un recipiente de plástico y una cuerda de polietileno, previamente lavada con agua desionizada; en los casos de muestras con exceso de materia orgánica, se utilizó un colador de plástico. Normalmente, los pozos se encontraron en operación, pero toda vez que se no encontraron en funcionamiento, fueron bombeados durante al menos 15 minutos antes de tomar la muestra. En cada sitio de muestreo, una calibración de campo se realizó en los instrumentos antes de la medición de conductividad eléctrica, pH y la temperatura de la muestra. Para estimar la variabilidad, estas lecturas se tomaron tres veces para cada muestra. Los datos de cada pozo se registraron en una bitácora e incluyen: las condiciones meteorológicas, el tiempo de muestreo, parámetros físicos y coordenadas UTM.

## 7.2 Temperatura y pH

La distribución espacial y las tendencias temporales de la calidad del agua también pueden servir como indicadores de la dirección del flujo, de la interacción entre diferentes aguas, del origen o las fuentes de las aguas, y de las fuentes potenciales de contaminación. La temperatura de las aguas subterráneas puede ser utilizada como un indicador de procesos hidrológicos tales como recarga, descarga, y el intercambio de agua subterránea con la superficial (Blasch et al, 2007; Anderson, 2005). La temperatura subsuperficial generalmente aumenta con la profundidad, un fenómeno conocido como *gradiente geotérmico*. Este gradiente puede variar desde 1°C por cada

20-40 m de aumento en la profundidad. Además, el agua de la superficie puede infiltrarse y alterar las temperaturas subsuperficiales anualmente o incluso en escalas de tiempo mayor, debido a las variaciones en la temperatura del aire, la insolación y/o el volumen y temperatura de la infiltración de agua (Dowman et al, 2003; Smith, 1983). Por estas razones, es útil medir la temperatura en pozos.

El potencial de hidrógeno (pH) de una solución indica la concentración efectiva de iones de hidrógeno, (Mazor, 1997). Se determina típicamente en el campo, ya que el tiempo, la exposición al aire, y temperaturas diferentes a aquellas del subsuelo pueden contribuir a la alteración del pH de la muestra. El pH influye en muchos procesos químicos tales como la disolución y la precipitación mineral, transporte químico, y los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes. Por lo tanto, es un parámetro que es importante medir, porque influye en varias reacciones, así como en la presencia y concentración de los diferentes componentes en solución. Si el pH es de alrededor de 7.0, el agua se considera que es neutral; valores por encima o por debajo de éste se consideran técnicamente como ácido (<7) o alcalino (>7). Sin embargo, tanto la USEPA como la Secretaría de Salud de México regulan el pH del agua potable para estar en un rango de 6.5-8.5, de tal manera que el agua ácida es (<6.5) y el agua alcalina es (> 8.5) (USEPA, 2014; Secretaría de Salud de México, 2014).

Las Figuras 7.2 y 7.3 resumen los valores de temperatura y pH en los pozos muestreados en Sonora y los datos del ADWR (ADWR GWSI, 2013). Como se muestra en las figuras, la temperatura en la parte mexicana varió de 19.6 hasta 27.6°C, con una media de 23.6°C, mientras que todos los valores de pH estuvieron dentro de los niveles máximos permitidos (MCL, *Maximum Contaminant Levels*) descritos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) para las aguas destinadas al consumo humano, de 6.5 - 8.5. En el lado estadounidense, las temperaturas oscilaron desde 14.5 a 26.5°C, con un promedio de 23°C, mientras que los valores de pH se encontraron entre 6.2 y 8.2. El pH en el Río San Pedro en Charleston en el período 1987-2013 no mostró

tendencias significativas (Gungle et al, bajo revisión), y el agua del río era ligeramente alcalina con un pH de 8.3 durante las condiciones de caudal base. La agrupación de la temperatura y el pH en las figuras 7.2 y 7.3 podría estar relacionada con la profundidad, la geología y/o la configuración topográfica, pero las mediciones e información sobre la profundidad del intervalo evaluado son demasiado escasas como para dar una interpretación clara.

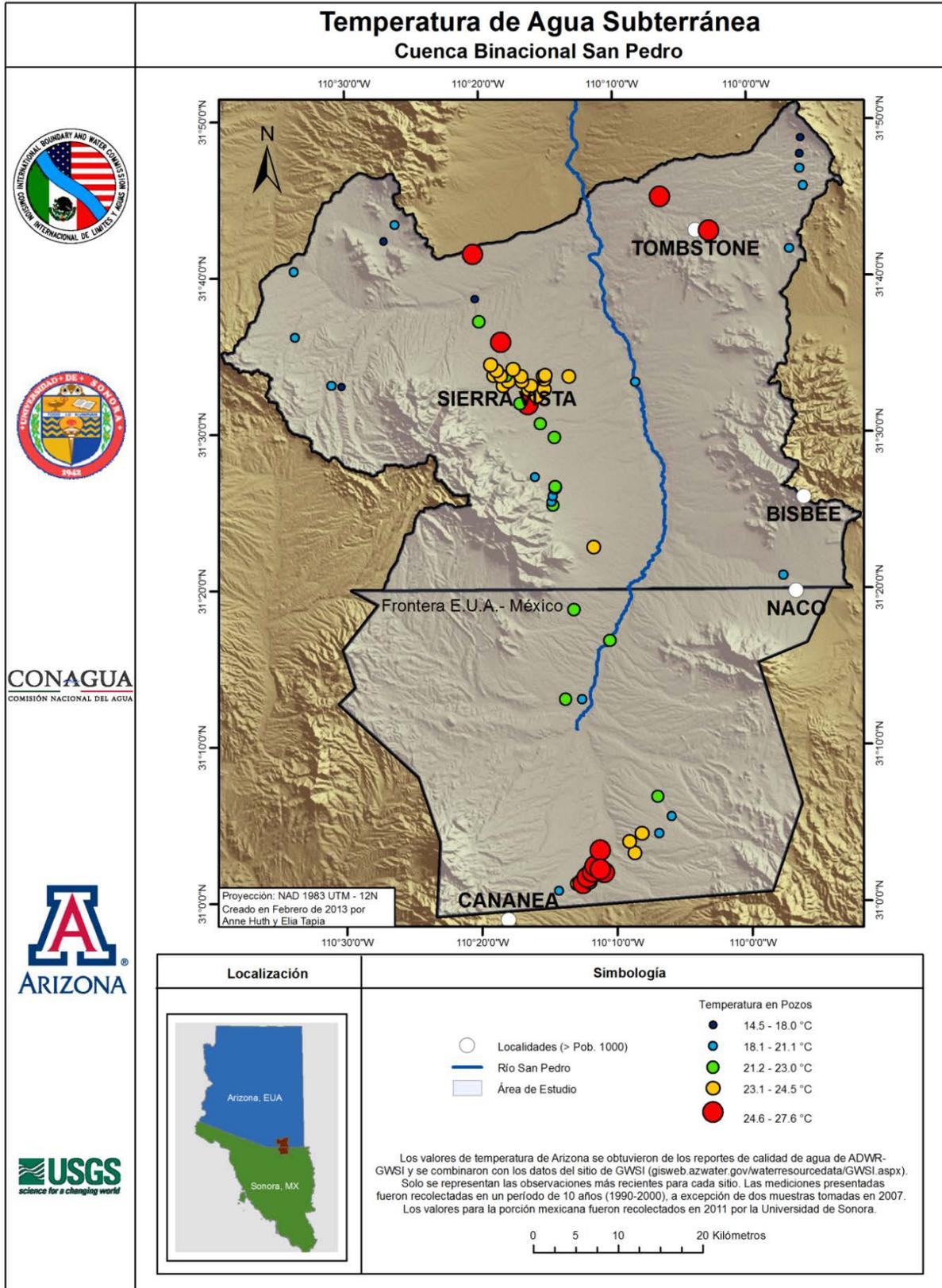


Figura 7.1 Temperatura del Agua Subterránea en la Cuenca Binacional San Pedro.

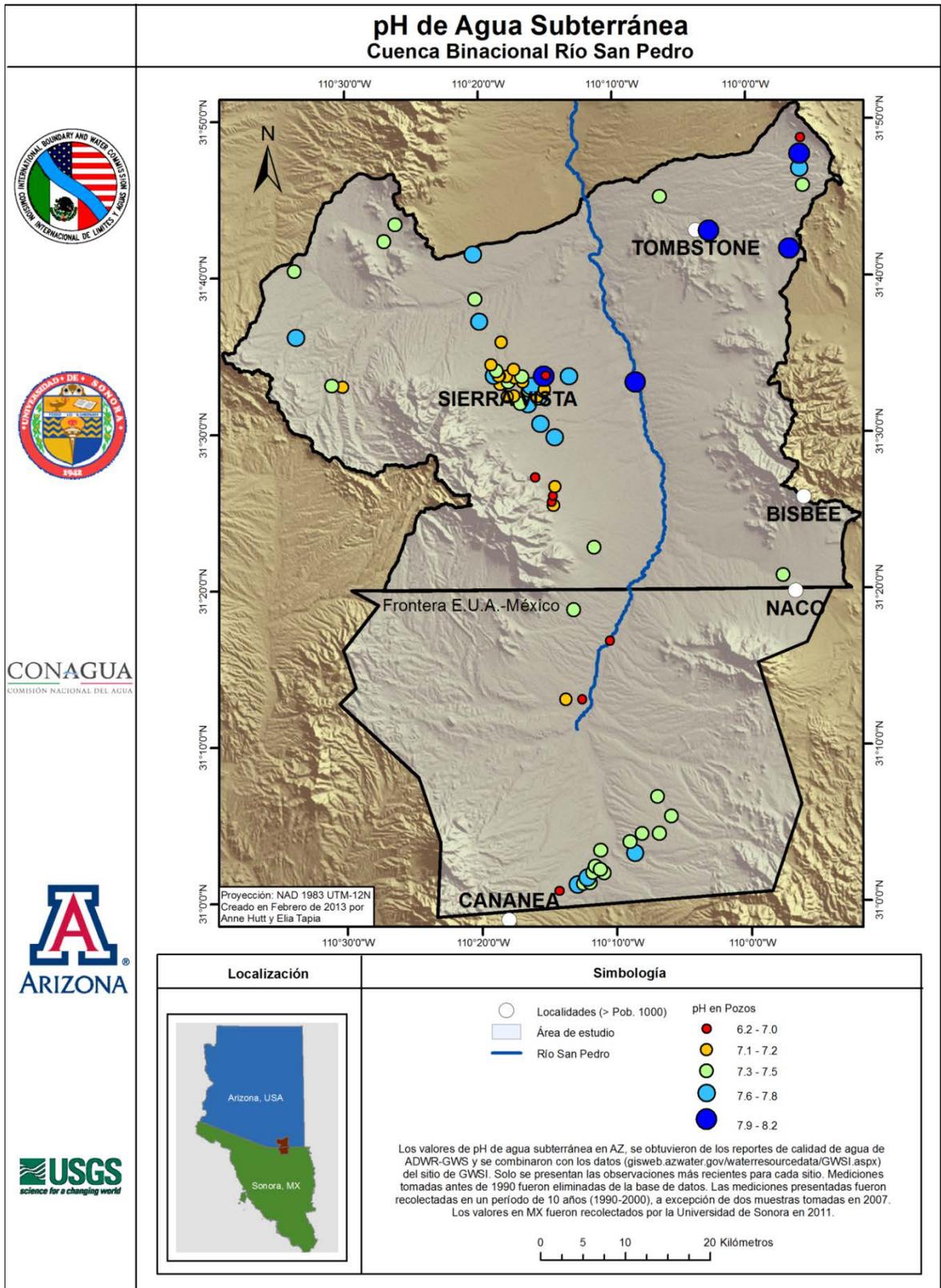


Figura 7.2 pH del Agua Subterránea en la Cuenca Binacional San Pedro.

### 7.3 Calidad del Agua

Los datos de calidad del agua se comparan con los niveles máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (Tabla 5.2) para uso y consumo humano cuando es requerido por ley o para los fines de un estudio en particular, y en el lado estadounidense se basa en los niveles máximos permisibles establecidos por la USEPA y el ADEQ, aunque no se han establecido para la mayoría de los compuestos. En general, los resultados del muestreo y el análisis de la calidad del agua indican que la mayor parte de las aguas subterráneas en el acuífero del Río San Pedro son generalmente de buena calidad y adecuadas para cualquier uso humano (Pool y Coes, 1999; Coes et al., 1999; CONAGUA, 2009; Anning y Leenhouts, 2010). Sin embargo, algunos pozos en la Subcuenca Sierra Vista en Arizona contienen concentraciones en determinados componentes que exceden los límites federales en los Estados Unidos para el agua potable. Los componentes excedidos incluyen arsénico, flúor, hierro, magnesio, sólidos disueltos, sulfatos, y algunos compuestos orgánicos volátiles (Coes et al., 1999; Gellenbeck y Anning, 2002; ADWR, 2009; Anning y Leenhouts, 2010). Los contaminantes de preocupación emergente (CECs, por sus siglas en inglés), incluyendo compuestos de aguas residuales y productos de cuidado personal, se muestrearon en agua de tres manantiales cercanos y al otro lado del río en Sierra Vista, y en la planta de tratamiento de aguas residuales de Sierra Vista (Gungle et al, bajo revisión). Los contaminantes de preocupación

emergente, tal como se definen aquí, son compuestos no regulados generados directa o indirectamente por la actividad humana, la toxicidad de los cuales es desconocida o poco conocida (Kolpin 2002; Daughton, 2004). El número y las concentraciones de detecciones de CECs emergente fueron más altos en la planta de tratamiento, seguido por los manantiales de Murray y Horsethief. Las detecciones en la planta de tratamiento de aguas residuales incluyeron productos de cuidado personal (por ejemplo DEET), materiales ignífugos (Tris (dibromo-2,3-propilo (TCPP), o Fosfato de Tris) y productos farmacéuticos (temazepam, carbamazepina). Las detecciones en los manantiales Murray incluyeron plastificantes (para-nonilfenol) y fármacos como el fenobarbital y la codeína, entre otros.

La alcalinidad es la capacidad de una solución acuosa filtrada de neutralizar el ácido debido a la presencia de carbonato u otros iones (Rounds, 2006). Las soluciones carbonatadas tienen un control significativo en el pH natural de las aguas (Hem, 1985), que es importante para la salud y el mantenimiento de los ambientes acuáticos y las interacciones agua-roca. Entre las principales fuentes de alcalinidad se encuentra la disolución de dióxido de carbono atmosférico en el agua. El dióxido de carbono en el suelo puede ser elevado y por lo tanto la alcalinidad, debido a la respiración de las plantas y la oxidación física y biológica de materia orgánica (Hem, 1985). En los pozos muestreados en la CBSP, los valores máximos de alcalinidad varían de entre 190 a 255 mg/L y se encontraron justo al sur de la frontera y

adyacentes al río (Figura 7.3). Se encontraron a su vez valores altos al norte del área de estudio, al frente de las montañas Huachuca (160-190 mg-L). Los valores más bajos (76-90 mg-L) se encontraron en los pozos cerca de la ciudad de Cananea.

La conductividad específica, a menudo se utiliza como un sustituto para la SDT, es una medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Como tal, es un indicador de la concentración de iones presentes, y es una buena aproximación de la concentración de sales disueltas en el agua. Las unidades de conductividad específica se reportan en siemens/metro (S/m), pero generalmente se utiliza  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dando lugar a valores que son fácilmente convertibles a otros expresados como partes por millón (ppm) que se utilizan para la medición de SDT. Debido a que la tecnología para la determinación de la conductividad específica se encuentra tan ampliamente disponible y es de fácil aplicación, a menudo se utiliza en el campo y muchos estudios informan los valores en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en lugar de las unidades ppm que corresponden a los SDT. La conversión de los valores de conductividad eléctrica a unidades de ppm correspondientes a los SDT, es compleja y depende de la concentración, entre otros factores, pero a continuación se presenta una simplificación utilizada con frecuencia (Weiner, 2012):

*1.0 ppm de SDT  $\approx$  0.67  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de Conductividad Específica*

Los SDT y la conductividad específica se utilizan a menudo como los indicadores de

primera línea de calidad del agua. También pueden ser utilizados para sugerir o aclarar hipótesis sobre la ocurrencia de determinados procesos hidrológicos en una cuenca determinada. Los sólidos totales disueltos es la suma de todos los componentes disueltos en una muestra (Drever, 1997), y, como tal, son importantes por un número de razones incluyendo el gusto (que está regulado como un estándar secundario de agua potable por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), el potencial de efectos en la salud acuática, y la salinización del suelo (USEPA, 2014; Terrell y Perfetti, 1989; NRCS, 2014). Se supone que el tiempo prolongado de residencia del agua en la subsuperficie aumenta las concentraciones de sólidos disueltos mediante la disolución de minerales durante el transporte, y una reducción en las concentraciones puede ocurrir a través de la dilución por agua meteórica u otras reacciones químicas (tales como precipitación química) a lo largo de trayectorias de flujo de aguas subterráneas (Pool y Coes, 1999).

La conductividad eléctrica de las aguas subterráneas y superficiales es variable dentro del área de estudio, pero se pueden identificar algunas tendencias temporales y espaciales (Figura 7.4). En Sonora, se observaron valores generalmente menores a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio de 338  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; el valor promedio es inferior a los datos reportados para la parte sur de la SASPS que tiene valores máximos de 335  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (CONAGUA, 2009). De acuerdo con los resultados obtenidos por Minjárez et al. (2011), los valores de

conductividad específicas registrados en los pozos muestreados en Sonora muestran un rango entre 256 y 578  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los tres pozos con los valores más altos fueron: el pozo No. 418, Barrilito y el pozo No. 383. Estos se localizan en el Ejido San Pedro, al sur de Barrilito y en el Ejido José María Morelos, respectivamente. El pozo con la medición más baja es el pozo No. 40 (con 256  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), ubicado en el Ejido Zapata en el lado sur del acuífero. En Sonora, se observó que los valores de conductividad aumentan hacia el norte hasta llegar a la frontera internacional (CONAGUA, 2009 y Minjárez et al., 2011). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los valores más altos reportados en el acuífero transfronterizo se encuentran cerca de la ciudad de Cananea, donde ha sido reportada una conductividad eléctrica de hasta 737  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

De acuerdo al análisis de muestras de agua tomadas en la SASPS en el 2000, la mayor parte del valle está dominado por concentraciones de sólidos totales disueltos menores a los 500 mg/L (CONAGUA, 2009). Este reporte indica que las concentraciones más bajas se encuentran en la parte centro-sur de la subcuenca y que los valores tienden a aumentar ligeramente en dirección norte a lo largo de la trayectoria del flujo regional de las aguas subterráneas. Esto es similar a lo que se encontró en los datos de conductividad específica mencionados anteriormente. Al mismo tiempo, la información del estudio geoquímico realizado en 2011 por la Universidad de Sonora, muestra mediciones de SDT que varían desde 182 hasta 844 mg/L, los cuales son valores que no superan el

límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-1994. En la SSVA, los valores de conductividad específica de las aguas superficiales tenían un promedio de 558  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Pool y Coes, 1999). Sin embargo, el rango de mediciones varió desde 235 hasta 610  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con valores en general tendiendo a disminuir en el río en la dirección del flujo de superficie. Esto apunta hacia una fuente potencial de sólidos totales disueltos cerca de la frontera.

Pool y Coes (1999) encontraron valores de conductividad específicas en los sedimentos del Holoceno que tenían una media muy similar a lo observado en los flujos superficiales. Los valores tuvieron un promedio de 550  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , pero llegaron a un máximo de 1,121  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y a un mínimo de 342 durante el período de estudio (Pool y Coes, 1999). No hay una explicación clara sobre la causa de los valores altos en el aluvión del Holoceno, pero es posible que sea debido a la concentración de sales por evaporación antes de la infiltración y/o la disolución de yeso u otros minerales evaporíticos presentes en el acuífero regional cerca y al sur de los límites de la línea internacional, cuya presencia ha sido detectada cerca de las comunidades de Palominas y Hereford (Pool y Coes, 1999; McGuire, 1997) y la disolución de la cual eleva la conductividad eléctrica del agua.

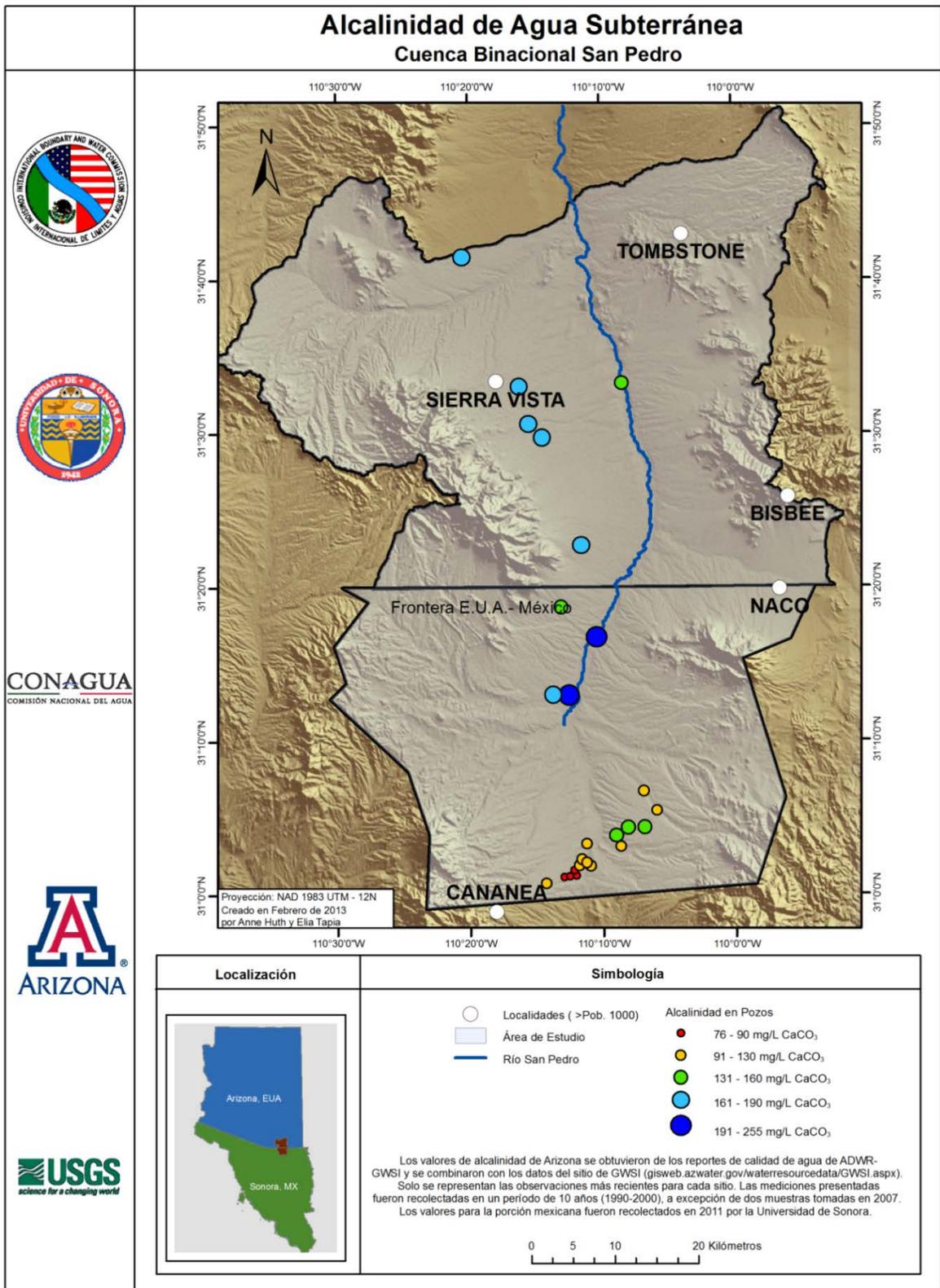


Figura 7.3 Alcalinidad del Agua Subterránea en la Cuenca Binacional San Pedro.

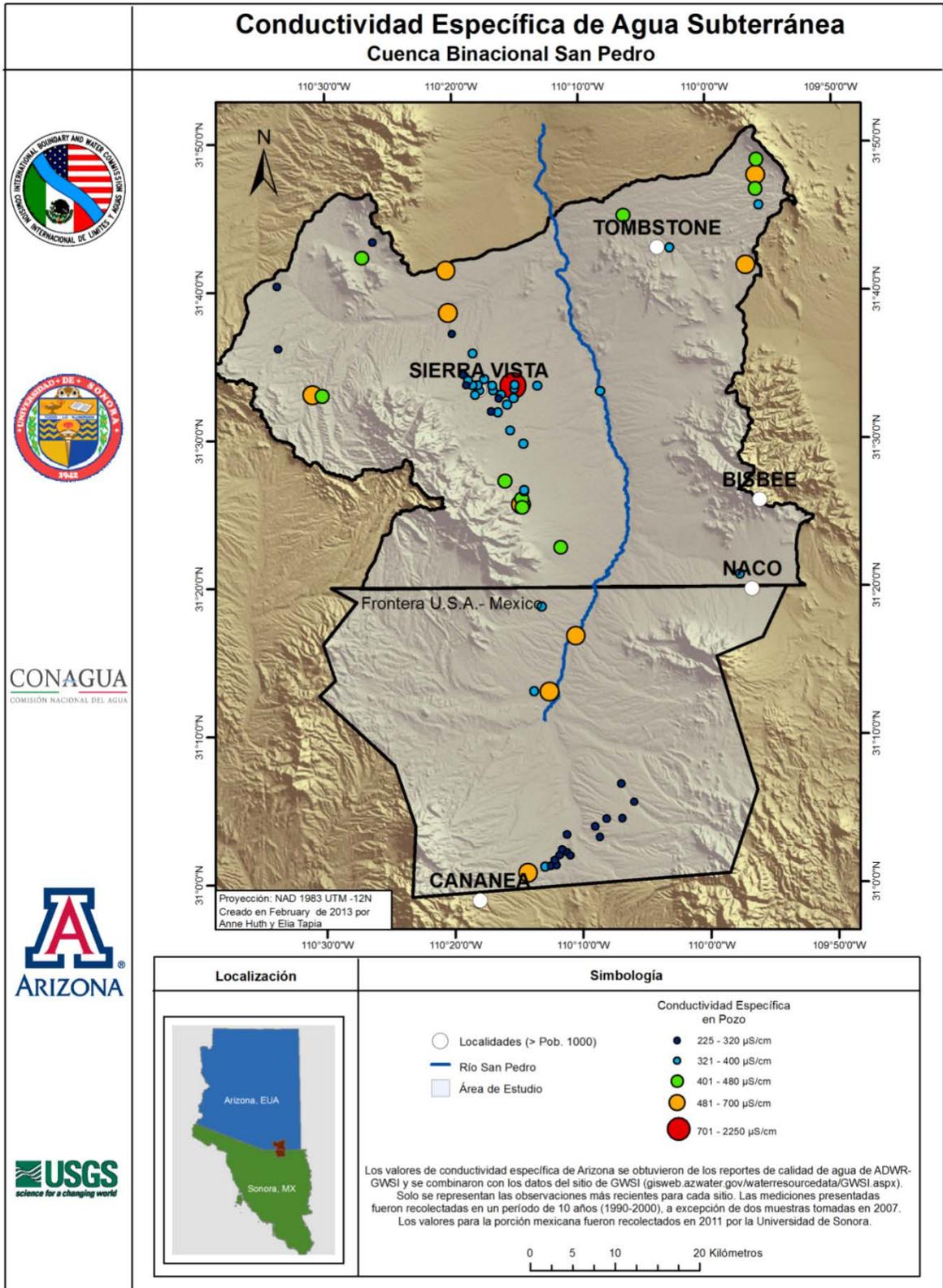


Figura 7.4 Conductividad Eléctrica en la Cuenca Binacional San Pedro.

#### **7.4 Distribución de los Iones Principales e Identificación de las Familias de Agua**

Las concentraciones de iones principales varían en función de la interacción entre las fuentes de agua, trayectorias de flujo, y las características físico-químicas de rocas y sedimentos en el acuífero (Somaratne y Frizenschaf, 2013; Uliana y Sharp, 2001). Las direcciones de flujo predominantes son de sur a norte por el aluvión, y desde las áreas de recarga en el frente de montaña a través del acuífero regional. La distribución geográfica de los iones en el agua subterránea indica que hay altas concentraciones de calcio y magnesio cerca de las montañas, y concentraciones de sodio y potasio aún mayores en muestras ubicadas cerca del río (Minjárez et al., 2011).

Las concentraciones de calcio y magnesio en las aguas del Río San Pedro y en los sedimentos del Holoceno en general son menores que las que se encuentran en las aguas del acuífero regional (Pool y Coes, 1999). Además, las concentraciones de sodio, potasio, cloro y sulfato son generalmente mayores en el acuífero regional que en los sedimentos del Holoceno. El agua en los sedimentos del Holoceno es probable que se derive de la mezcla de agua del acuífero regional y de la recarga de agua de río, aunque las concentraciones de cloro, sulfato y bicarbonato tienden a variar dependiendo de la cantidad de escorrentía de aguas superficiales. No se observaron variaciones constantes en los principales iones en las aguas del aluvión (Pool y Coes, 1999).

Los diagramas de Piper se basan en una clasificación de las aguas por balance de masa, lo que permite identificar por zonas la presencia de diferentes familias hidrogeoquímicas regionales, así como resaltar las diferencias entre los tipos de agua a nivel regional y dentro de un mismo acuífero. La Figura 7.5a muestra el diagrama de Piper que caracteriza el tipo de agua con los puntos de muestreo mapeados en la Figura 7.5b. El tipo de agua subterránea en la SSVA es bicarbonatada cálcica, generalmente alcalina y de baja salinidad (Pool y Coes, 1999). De acuerdo con los resultados del levantamiento de muestras del 2011, realizado por la Universidad de Sonora en la SASPS, la familia de agua que predomina en el acuífero es también bicarbonatada cálcica (80% de las muestras). Esto representa una reciente infiltración de agua, con tiempos de residencia cortos, que ha circulado a través de rocas volcánicas. A excepción de cuatro muestras ubicadas en la parte norte del acuífero, estas muestras fueron en su mayoría de la zona conocida como Ampliación del Río y Los Patos. La familia sulfatada cálcica se encontró en tres pozos en la zona Patos Sur. La familia bicarbonatada sódica se encontró en sólo un pozo.

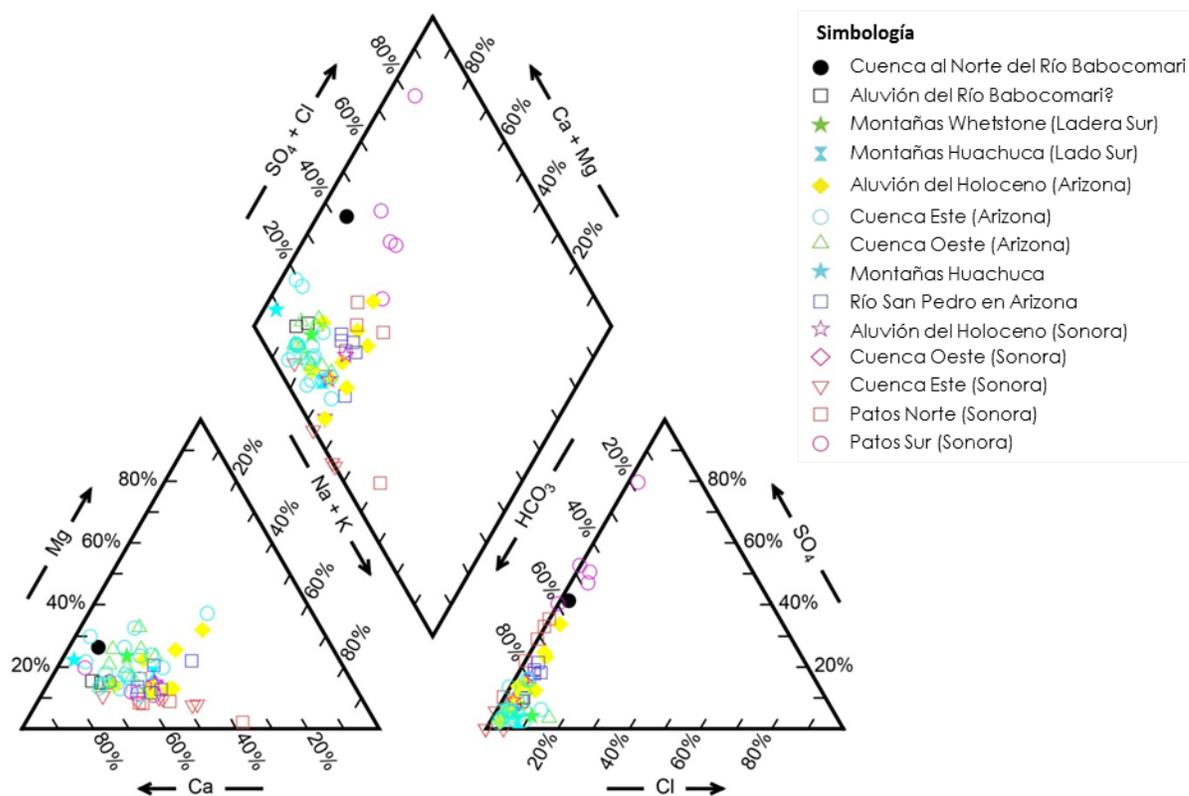


Figura 7.5 (a) Diagrama de Piper para la Cuenca Binacional San Pedro utilizando los datos disponibles del USGS NWIS (2013) y los datos recopilados por la UNISON (2011).

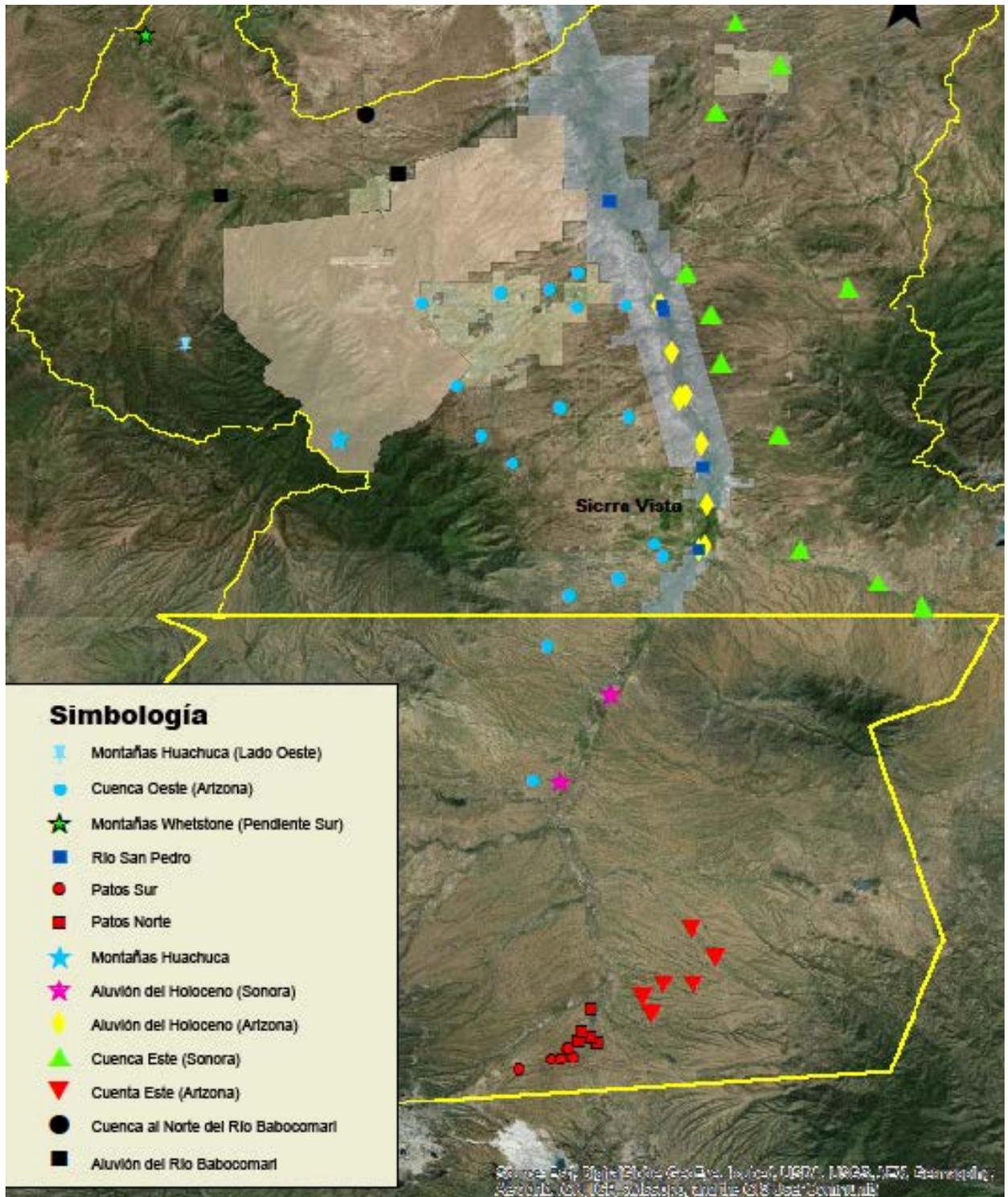


Figura 7.5 (b) Localización de muestras utilizadas en el Diagrama de Piper para la Cuenca Binacional San Pedro.

## Sodio

El sodio se encuentra comúnmente en las aguas subterráneas debido a las interacciones agua-roca. Se puede derivar de rocas ígneas, principalmente basaltos y riolitas, así como por la contaminación urbana e industrial. La máxima concentración de sodio permitida por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) es de 200 ppm. Las concentraciones en el acuífero

varían desde 4 hasta 61 ppm. La concentración máxima se encontró en el pozo D-23-22 22CCC y el valor mínimo en el pozo D-23-19 01DBB. Ambos pozos se encuentran en la parte estadounidense de la CBSP. La distribución espacial de las muestras presenta concentraciones de sodio más altas en la parte norte del acuífero (Figuras 7.7 y 7.8).

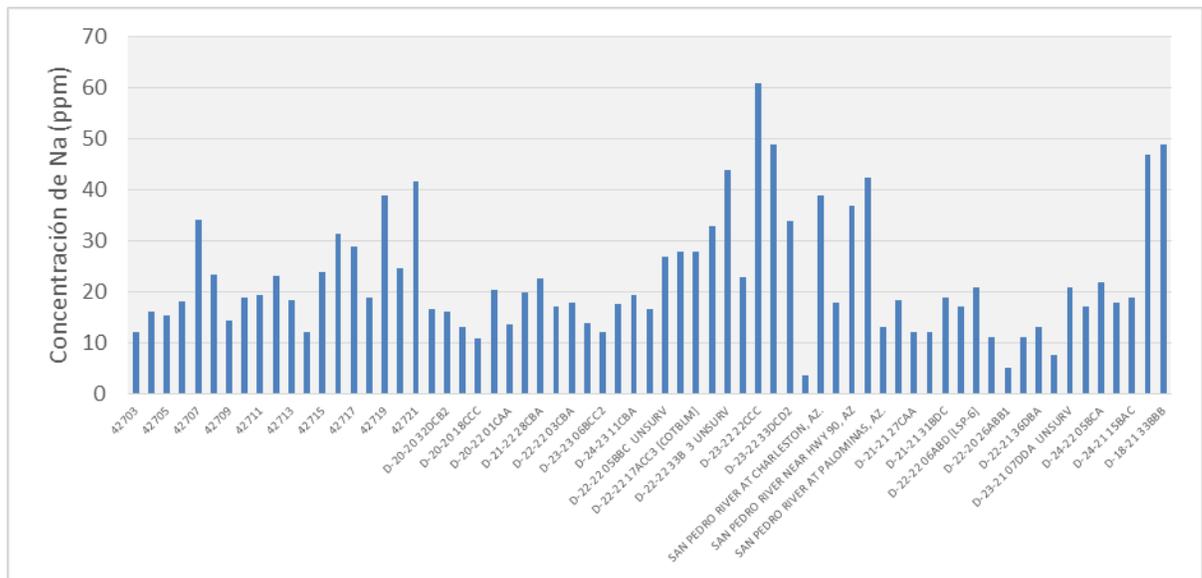


Figura 7.6 Concentración de Sodio por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro

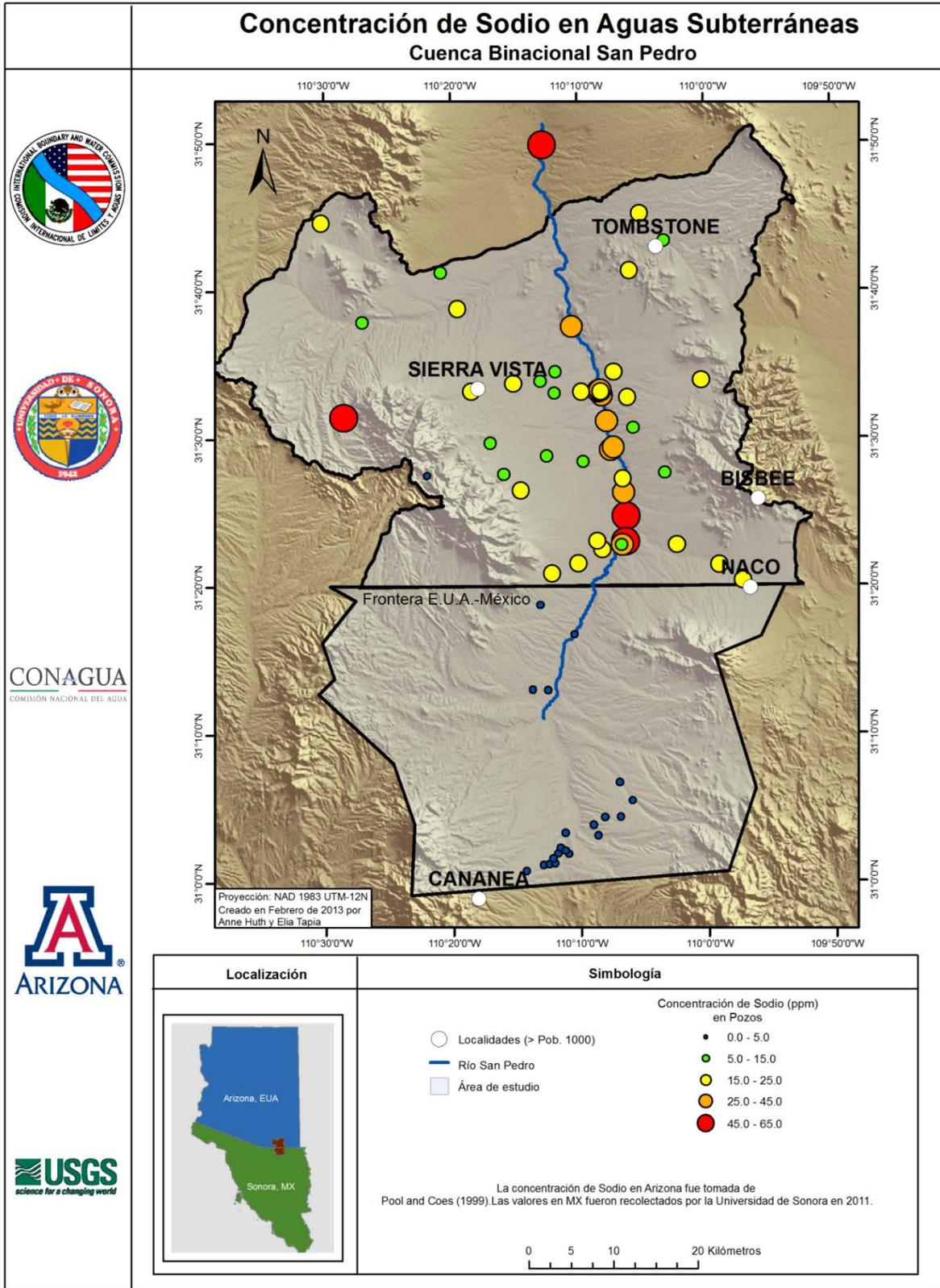


Figura 7.7 Variabilidad espacial de las Concentraciones de Sodio en la Cuenca Binacional San Pedro.



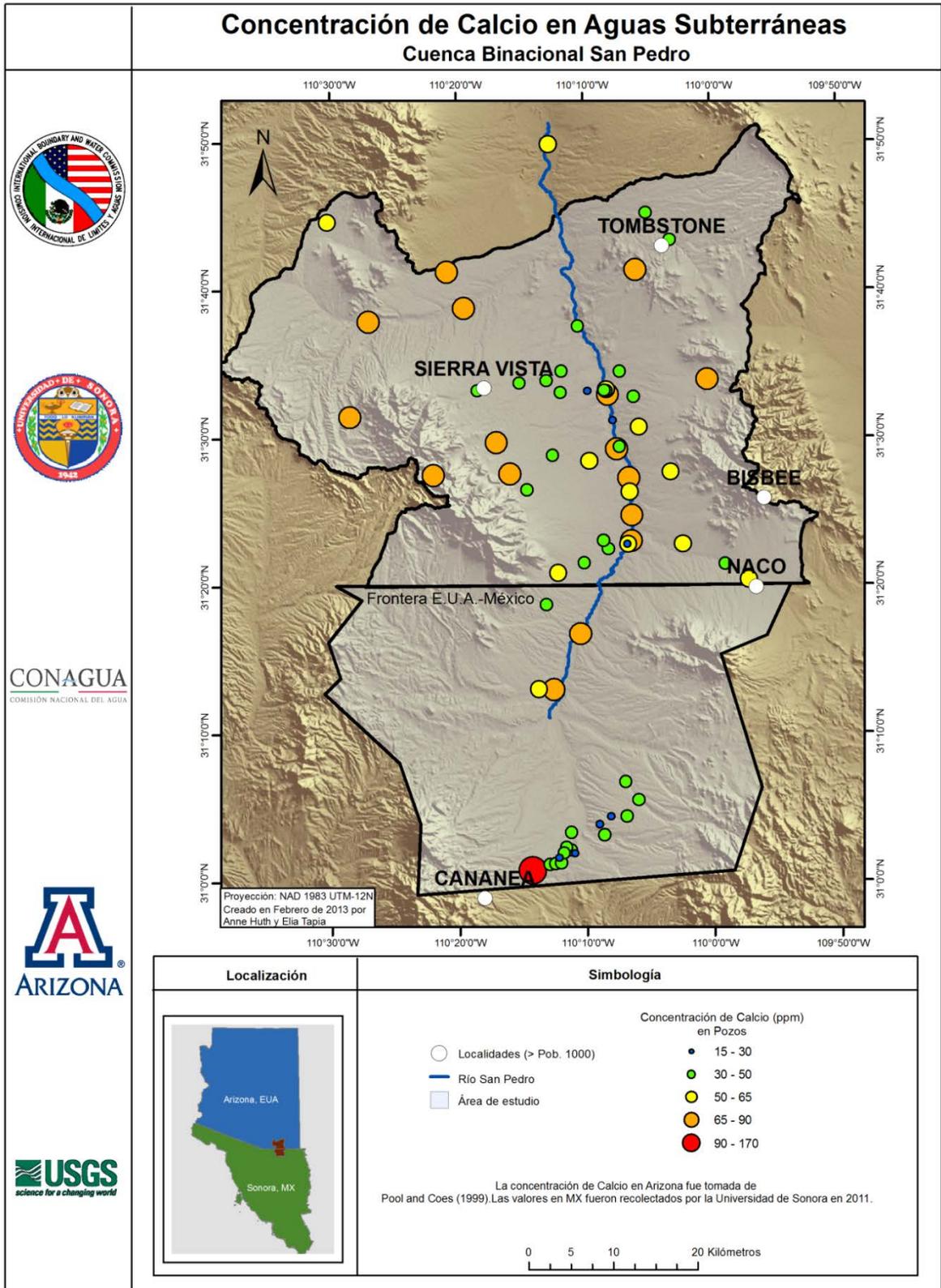


Figura 7.9 Variabilidad Espacial de las Concentraciones de Calcio en la Cuenca Binacional San Pedro.

## Magnesio

El magnesio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, sólo superado por el aluminio y el hierro. Es parte tanto de rocas sedimentarias como ígneas. La principal fuente de magnesio en el agua subterránea es la disolución de la dolomía y caliza dolomítica (Custodio y Llamas, 1996).

La Norma Oficial Mexicana y la USEPA no establecen un límite máximo permisible de magnesio para uso y consumo humano, ya que no es considerado peligroso para la salud humana. Puede tener un efecto laxante cuando se mezcla con sulfatos. Otro inconveniente de este elemento es que cuando se encuentra en altas

concentraciones se precipita en tuberías y calderas. Las concentraciones en el acuífero varían de 1 a 28 ppm. La concentración máxima se encontró en el pozo No. 42718, mientras que el valor mínimo fue encontrado en el pozo No. 42707. Ambos pozos se encuentran en la parte mexicana de la SASPS. La distribución espacial de los pozos muestra claramente que, además de la muestra ubicada en la ciudad de Cananea, las concentraciones más altas de magnesio se encuentran al norte del acuífero, y las concentraciones más bajas se encuentran en la parte sur (Figuras 7.10 y 7.11).

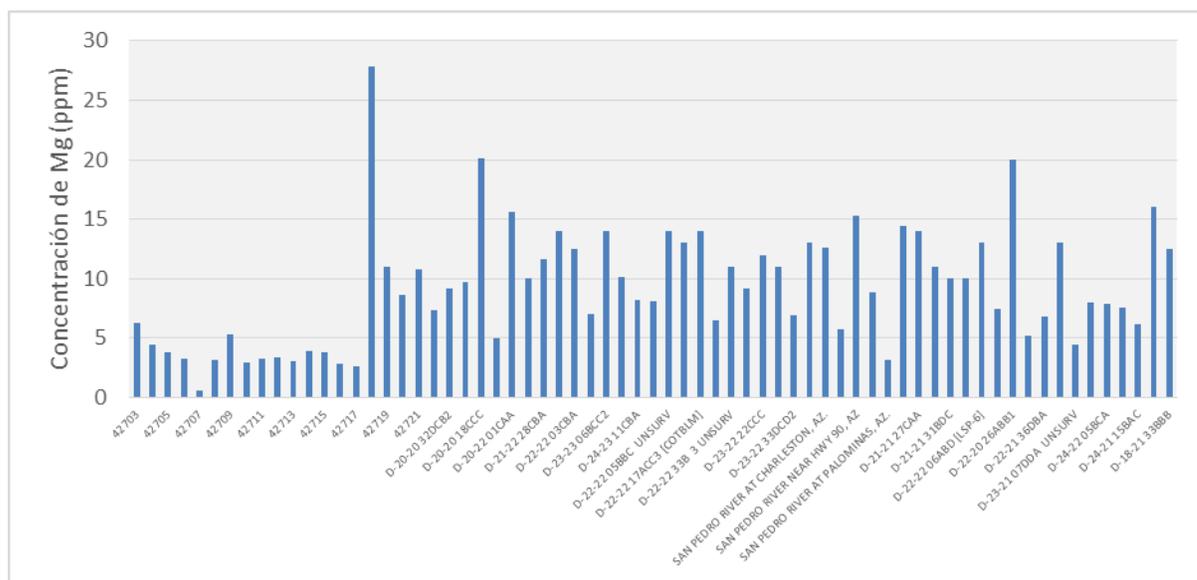


Figura 7.10 Concentración de Magnesio por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro.

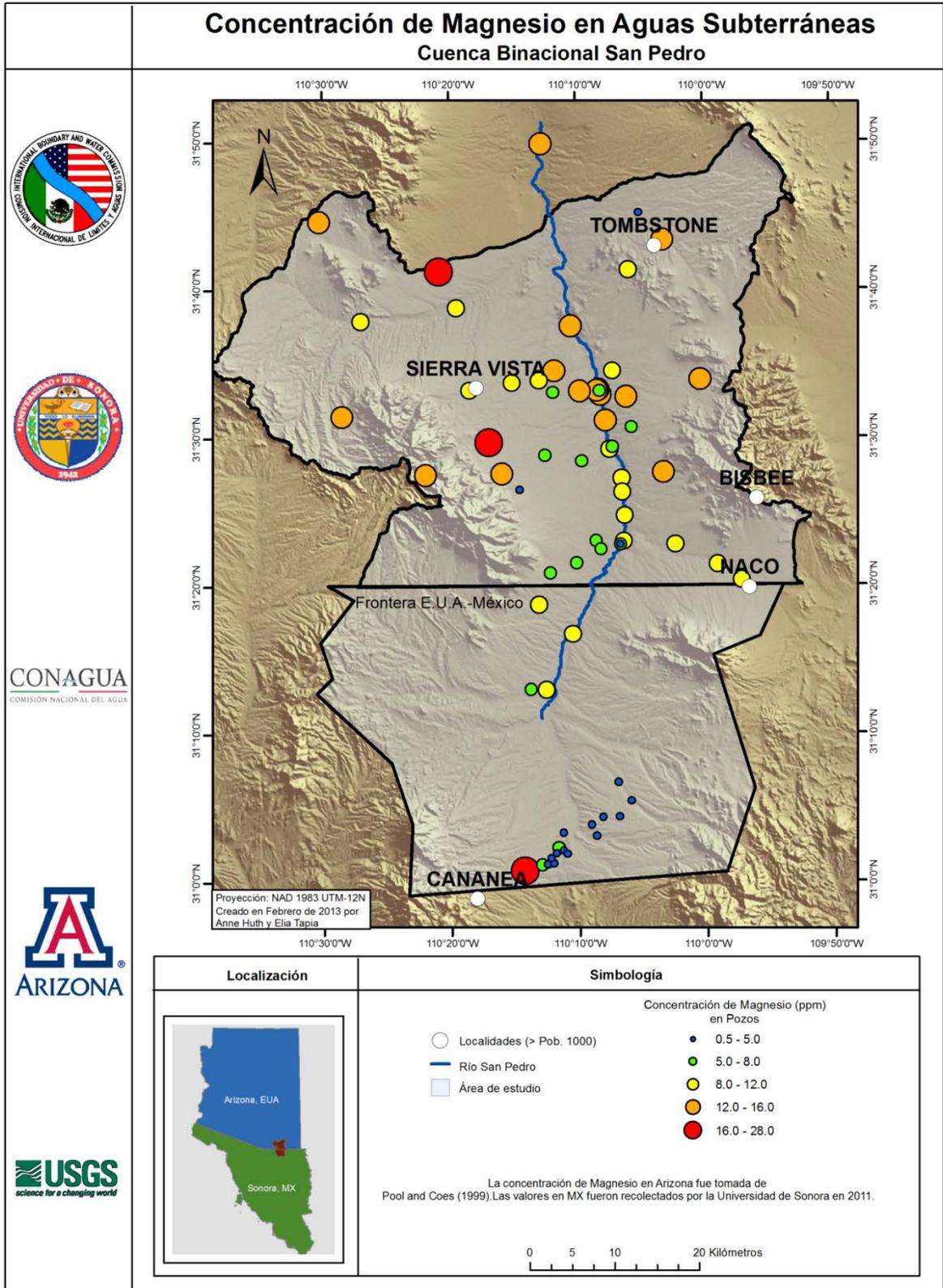


Figura 7.11 Variabilidad Espacial de las Concentraciones de Magnesio en la Cuenca Binacional San Pedro.

## Potasio

Las concentraciones de potasio en el agua subterránea se encuentran generalmente en niveles muy bajos, y se producen generalmente por lixiviación de minerales aluminosilicados, evaporitas, descomposición de la materia orgánica, intrusión salina y contaminación antropogénica. La Norma Oficial Mexicana no establece un límite máximo para el potasio. Sin embargo, Custudio y Llamas (1996) señalaron que los límites seguros (inocuos) para el potasio no deben sobrepasar las

10 ppm. Las concentraciones en el acuífero van de 0 a 5 ppm. La concentración máxima se encontró en el pozo Río San Pedro en Palominas, Arizona, mientras que el valor mínimo fue encontrado en seis pozos en la parte mexicana de la zona de estudio, y es menor que el límite de detección posible. Las concentraciones superiores tienden a agruparse cerca del río y sus afluentes (Figuras 7.12 y 7.13).

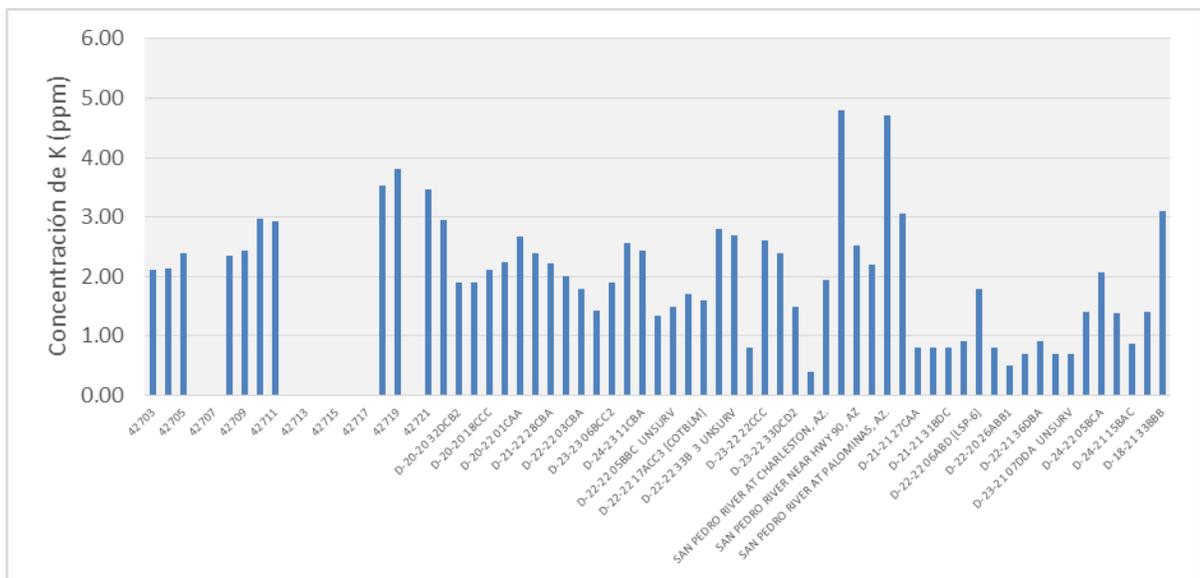


Figura 7.12 Concentración de Potasio por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro.

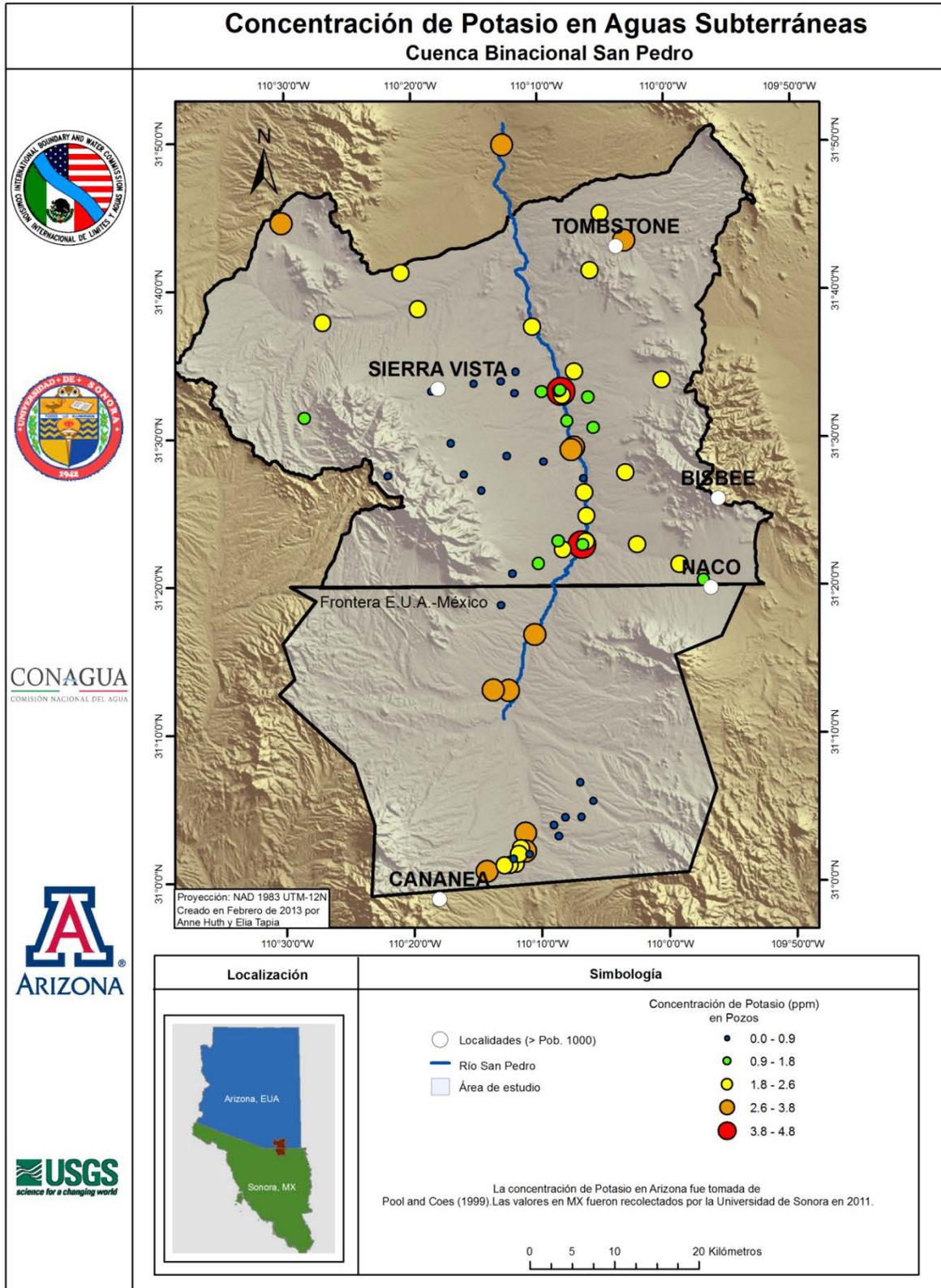


Figura 7.13 Variabilidad espacial de las concentraciones de Potasio en la Cuenca Binacional San Pedro.

## Cloruro

La Norma Oficial Mexicana y USEPA (estándar secundario) establece un límite máximo de cloruro de 250 ppm para uso y consumo humano. Las concentraciones en el acuífero van de 0 a 23 ppm. La concentración máxima se encontró en el pozo D-24-24 18CCB en la SVSA.

Los valores medidos en once pozos en la parte mexicana de la zona de estudio se encontraban por debajo del límite de detección de 5 ppm. Las concentraciones de cloruro no siguen ningún patrón fácilmente discernible (Figuras 7.14 y 7.15).

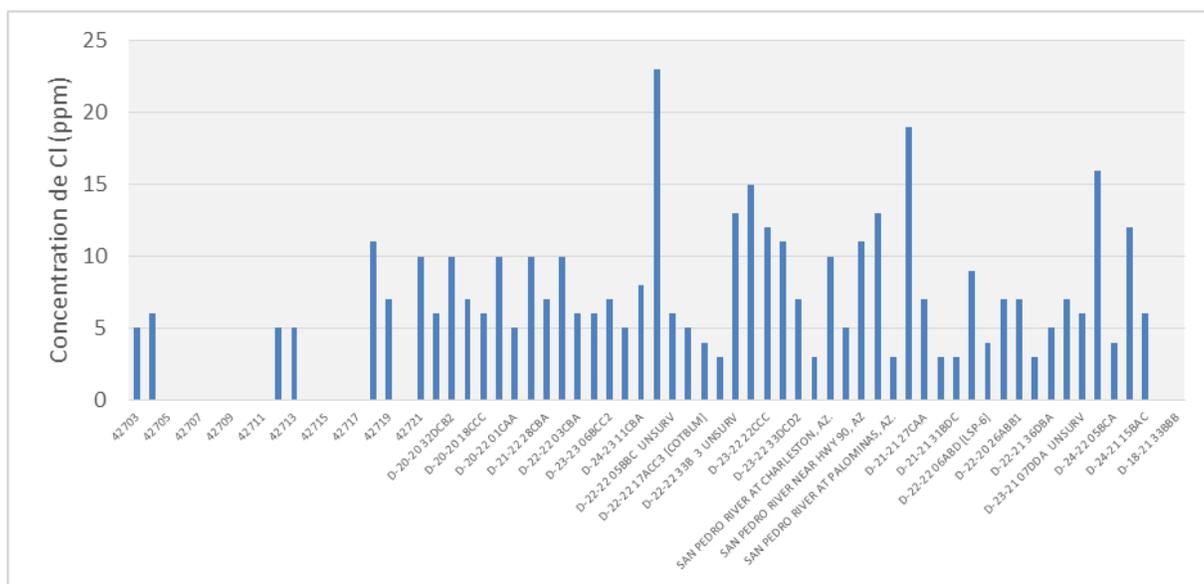


Figura 7.14 Concentración de Cloruro por pozo (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro.

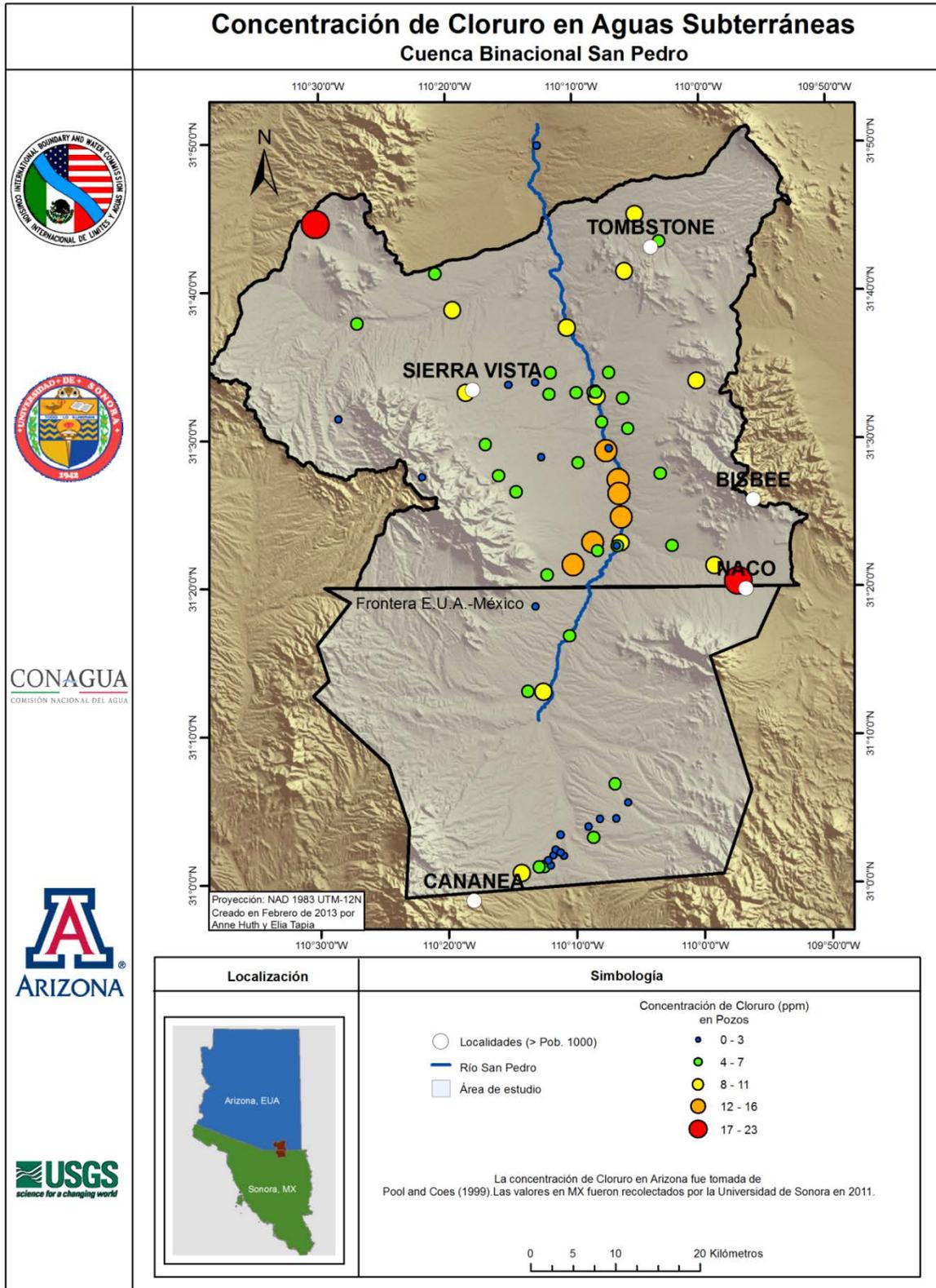


Figura 7.15 Variabilidad Espacial de las concentraciones de Cloruro en la Cuenca Binacional San Pedro.

## Sulfato

Las concentraciones de sulfato en aguas subterráneas van de 9 a 445 ppm. La concentración máxima se encontró en el pozo No. 42718 en Cananea, México, la cual supera el estándar secundario de la USEPA de 250 ppm y el límite de la Norma Oficial Mexicana de 400 ppm. El valor mínimo se encontró en cuatro pozos

en la parte mexicana de la zona de estudio, y es menor que el límite de detección posible. Las concentraciones de sulfato más altas en la SASPS se encuentran cerca de Cananea, posiblemente debido a los depósitos de minerales de sulfuro cercanos (Figuras 7.16 y 7.17).

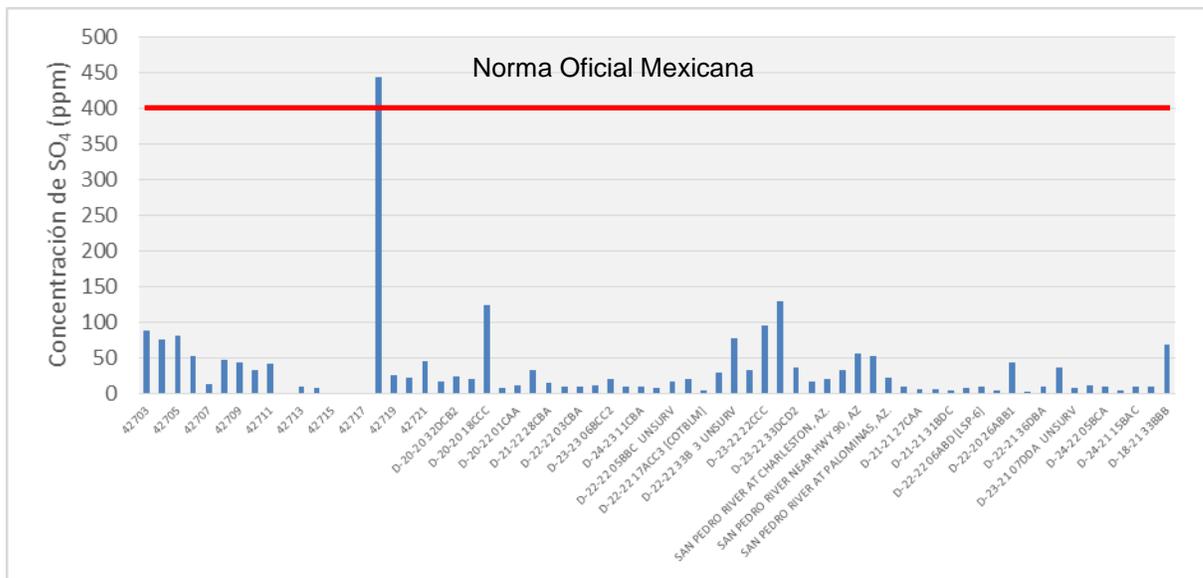


Figura 7.16 Concentración de Sulfato en aguas subterráneas y aguas superficiales (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro.

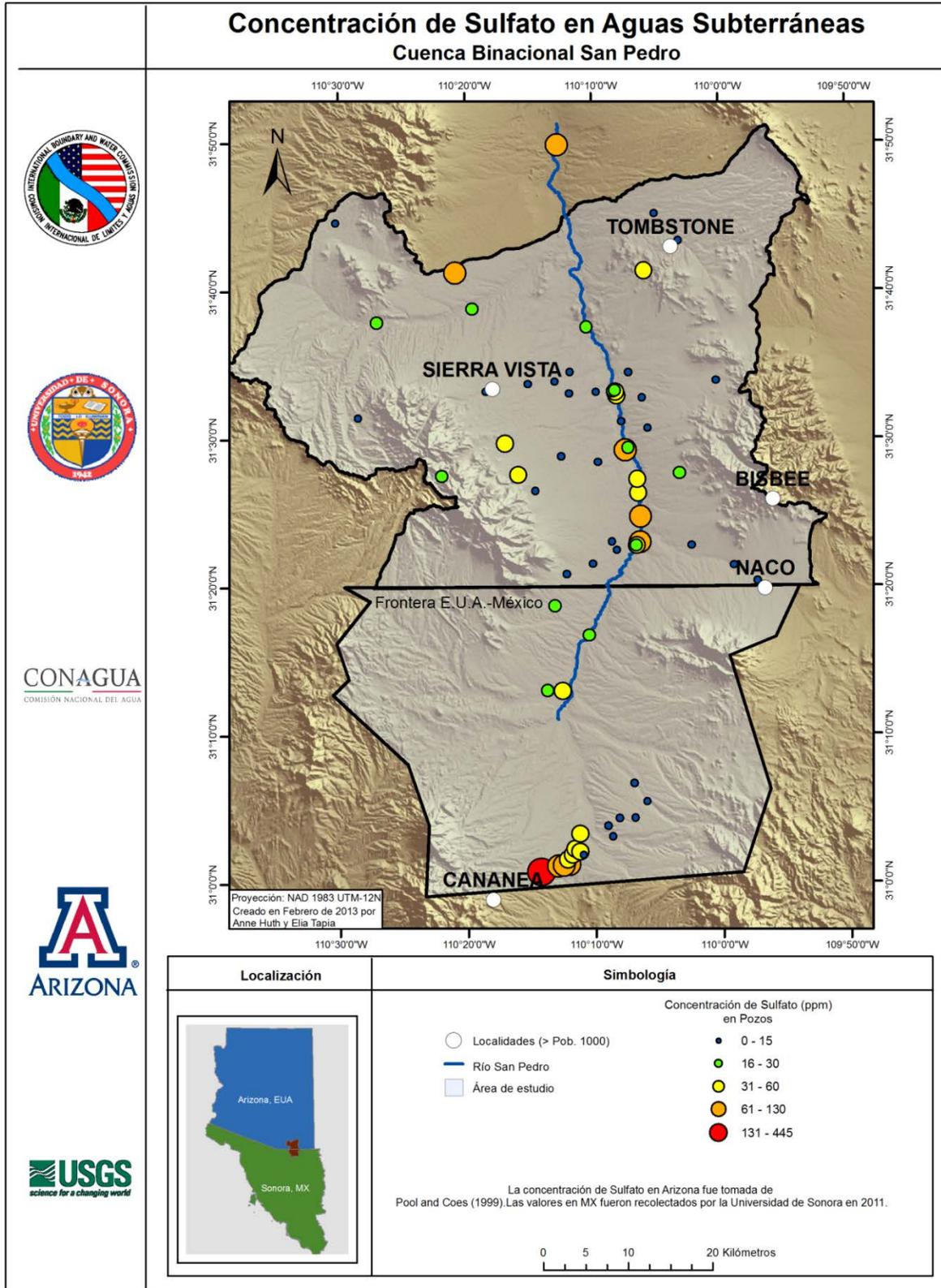


Figura 7.17 Variabilidad Espacial de las Concentraciones de Sulfato en la Cuenca Binacional San Pedro.

## Bicarbonato

No hay un estándar en la concentración de bicarbonato en el agua potable ni de parte de la Norma Oficial Mexicana ni de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Sin embargo, las altas concentraciones de bicarbonato, junto con el Ca y el Mg, provocan que el agua sea dura, y puede causar la acumulación de sarro. Custodio y Llamas (1996) indican que el bicarbonato en agua dulce por lo general oscila

entre 50 y 350 ppm. Las concentraciones en el acuífero van de 93 a 422 ppm. La concentración máxima fue encontrada en el pozo D-22-18 13BBD en los Estados Unidos y superó el límite máximo de Custodio y Llamas (1996). El valor mínimo se encontró en el pozo No. 42705 en la parte mexicana de la zona de estudio. Los valores de bicarbonato tienden a ser más bajos en la parte sur del acuífero (Figuras 7.18 y 7.19).

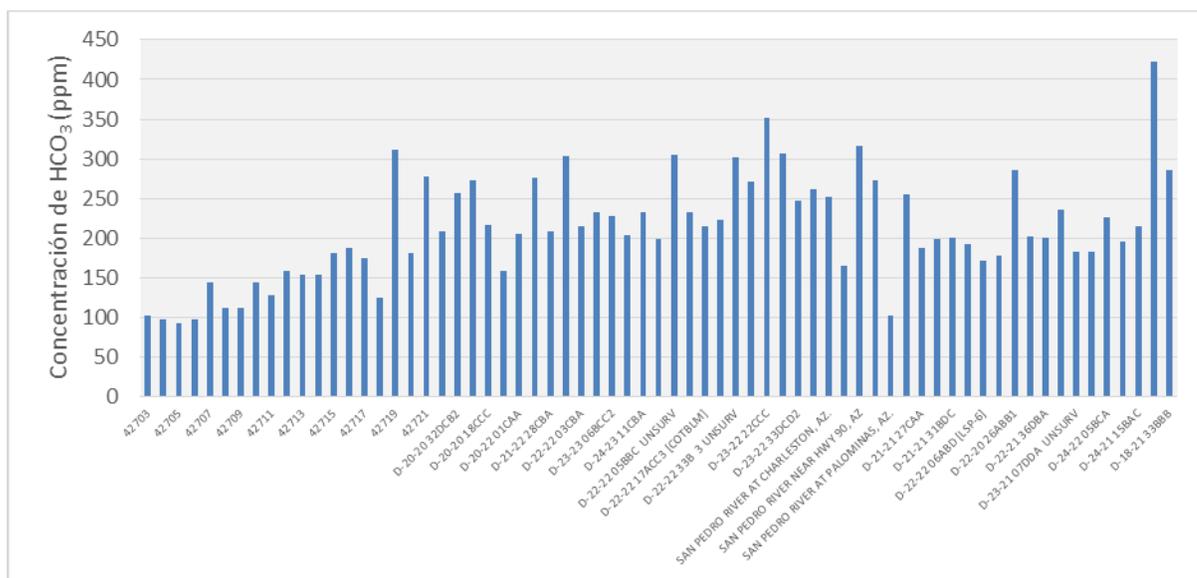


Figura 7.18 Concentración de Bicarbonato en aguas subterráneas y aguas superficiales (ppm) en la Cuenca Binacional San Pedro.

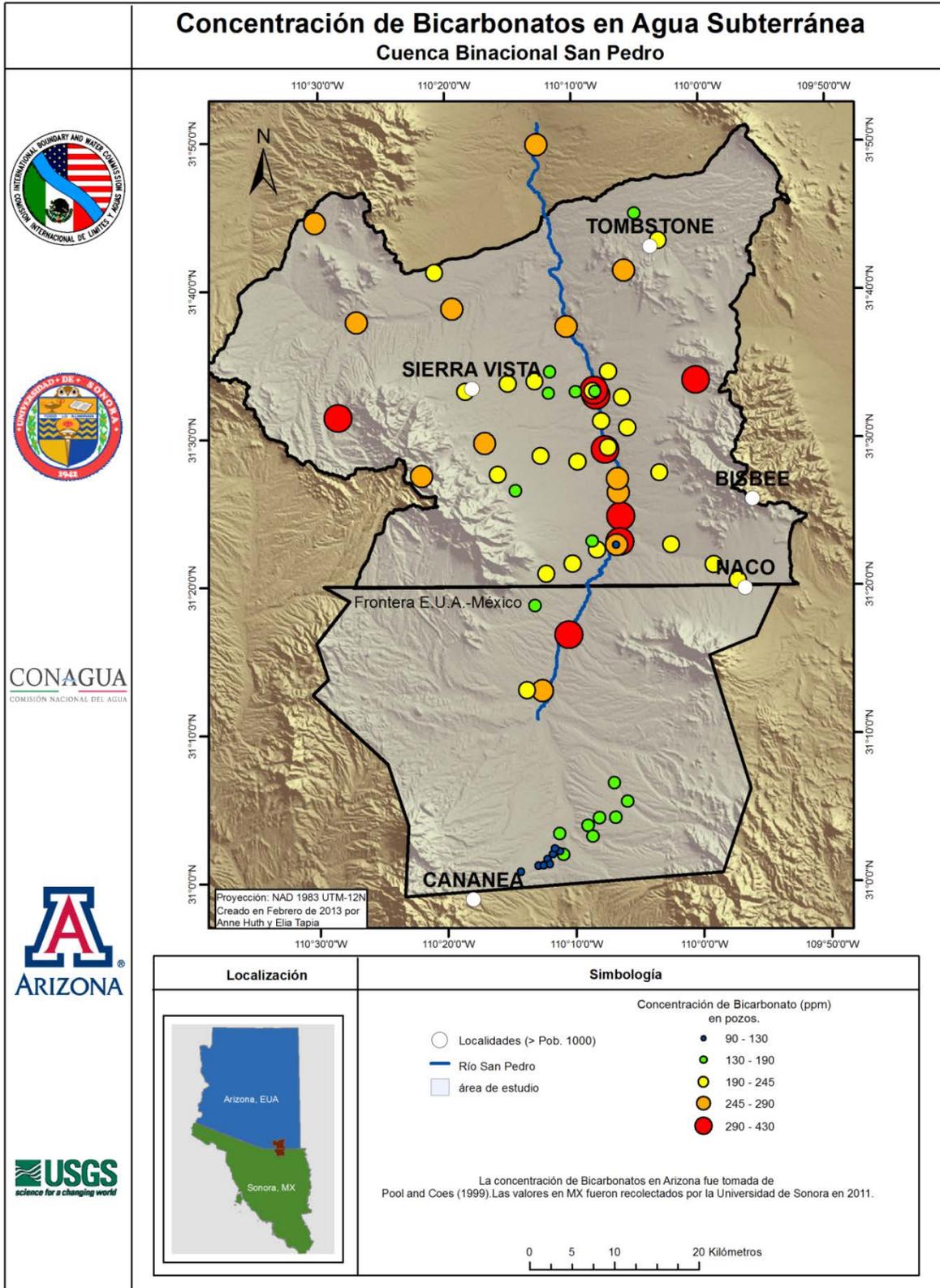


Figura 7.19 Concentración de Bicarbonato en aguas subterráneas en la Cuenca Binacional San Pedro.

## 7.5 Isótopos Estables

Las proporciones de isótopos estables de hidrógeno ( $\delta^2\text{H}$ ) y de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) son espacial y temporalmente variables en aguas subterráneas, aguas superficiales y de precipitación. La variabilidad es controlada por una serie de procesos tales como la evaporación, la condensación y la mezcla. Esta variabilidad puede ser utilizada en conjunto con información hidrogeológica y geoquímica para dilucidar fuentes de agua subterránea, trayectorias de flujo y la mezcla. Esto requiere la comprensión de cómo varían las proporciones de isótopos en el agua superficial y en la precipitación como entradas al sistema de aguas subterráneas en particular, bajo investigación. Por ejemplo, aunque existe una gran variabilidad de un evento a otro tanto a nivel mundial como local, las proporciones promedio de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  en invierno y/o precipitación de elevaciones altas tienden a ser bajas en comparación con el promedio de verano y la precipitación de elevación baja (Clark y Fritz, 1997; Eastoe y Dettman, 2014).

Hasta el presente, la distribución de isótopos estables en el agua ha sido muestreada y analizada sólo en el lado de Arizona de la cuenca. Pool y Coes (1999) analizaron muestras de agua recolectadas desde 1994 hasta 1997. Otros estudios también han utilizado isótopos estables para analizar los patrones de flujo, recarga de acuíferos, y el balance de agua en esta región (Coes, 1997; Pool y Coes, 1999; Baillie et al, 2007; Wahi, 2005; Wahi et al, 2008; Kennedy y Gungle, 2010; y Gungle et al, bajo revisión). Pool

y Coes (1999) encontraron las proporciones más bajas  $< -70\text{‰ } \delta^2\text{H}$  y  $< -10\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$  en muestras de manantiales en las montañas Huachuca y en el escurrimiento en el Río San Pedro, durante los meses de noviembre y diciembre de 1994. Las mayores proporciones de  $-50\text{‰ } \delta^2\text{H}$  y  $-7\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$  se detectaron en muestras del Río San Pedro después de las lluvias de verano en 1994. Las muestras del acuífero regional al oeste del río tenían proporciones de  $-50$  a  $-70\text{‰ } \delta^2\text{H}$  y  $-8.3$  a  $-9.6\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$ . La distribución de estas proporciones es consistente con los patrones de flujo determinados por la distribución de los niveles de agua subterránea. El agua con bajas proporciones isotópicas se produce en vías de flujo que se originan en la base de las montañas Huachuca. A lo largo de estos caminos de flujo, los valores varían poco, lo que indica que poca recarga de agua enriquecida con isótopos pesados ocurre lejos de las montañas Huachuca (Pool y Coes, 1999). El agua subterránea cerca de la frontera internacional tiene proporciones de  $-55.1$  a  $-57.8\text{‰ } \delta^2\text{H}$  y  $-7.6$  a  $-8.3\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$ , similares a las detectadas cerca de las montañas Mule, al este del río, y para las proporciones detectadas en las aguas del aluvión del Holoceno éstas van de entre  $-57.9\text{‰ } \delta^2\text{H}$  y  $-8.2\text{‰ } \delta^{18}\text{O}$  (Pool y Coes, 1999). Gungle et al (bajo revisión) utilizaron isótopos en el caudal base del Río San Pedro para examinar los cambios espaciales y temporales en las entradas de agua subterránea al río.

Se encontraron variaciones temporales estadísticamente significativas (aumento en  $\delta^{18}\text{O}$ ) en las estaciones Palominas, Babocamari Bajo, y

Lewis Springs. Estos descensos se interpretan como una entrada de las estaciones Palominas y Babocamari. En la estación Lewis Springs, se sugiere que la tendencia podría ser causada por infiltración de agua evaporada de las lagunas de castores. Los resultados apoyan las conclusiones de Pool y Coes (1999) que encontraron que las aportaciones de aguas subterráneas desde el lado oeste del río eran más substanciales entre Hereford y los manantiales de Lewis. Utilizando un modelo de mezcla con dos miembros extremos, Baillie et al (2007) concluyeron que el caudal base en el río es de hasta un 80% de agua de inundación derivada del monzón más cerca de la frontera internacional, disminuyendo a 55% en tramos agua abajo. Entre 2003 y 2005, un estudio fue llevado a cabo en el lado oeste de la cuenca utilizando una gama de isótopos que estiman las cantidades de recarga natural a lo largo de los bordes de las montañas en esta región de Arizona. Los autores estimaron que el  $65\% \pm 25\%$  de la recarga en los bordes de las montañas se produce durante el invierno y el  $35\% \pm 25\%$  ocurre durante el verano (Wahi et al, 2008). También encontraron que más del 90% de la parte no escorrentía de precipitación se pierde principalmente como el componente de transpiración de evapotranspiración.

## **8. MODELOS CONCEPTUAL Y NUMÉRICO DE LOS COMPONENTES DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y SU COMPORTAMIENTO**

El comportamiento hidrodinámico en el ABSP está determinado por factores claves como la geología, el clima, y el tiempo. En combinación, estos controlan la precipitación, la vegetación, el escurrimiento de agua superficial, y el almacenamiento y flujo de agua subterránea incluso la recarga y descarga. Otros factores importantes al comportamiento hidrodinámico incluidos o controlados por la geología y el clima incluyen variaciones en temperatura, topografía, temporada, pendientes, aspecto, y suelos, así como factores antropogénicos como el uso del agua y el uso y la cobertura de suelo.

### **8.1 El Sistema de Flujo de Agua Subterránea**

La mayor parte del agua subterránea en el área de estudio se origina a través de las montañas frontales o por medio de la recarga en el sistema montañoso en las elevaciones más altas de la cuenca (Corell et al., 1996; Wahi et al., 2008; Pool and Dickinson, 2007; Wilson and Guan, 2004). La recarga en el sistema montañosos produce por medio de la infiltración y percolación profunda a través de rocas permeables como areniscas y caliza. La recarga es mayor en las elevaciones más altas no solamente por la cantidad de precipitación sino por las tasas bajas de ET provocadas generalmente por temperaturas bajas (Pool and

Dickinson, 2007). Otra fuente significativa de recarga ocurre en las corrientes y ríos perennes, así como en los cauces efímeros, donde el agua se concentra y los sedimentos permeables facilitan la infiltración (Coes and Pool, 2005; Baillie et al., 2007). En los sedimentos aluviales de la cuenca, el agua subterránea fluye hacia las zonas de descarga a lo largo de los cauces perenes o intermitentes de arroyos y ríos, a través de la ET por freatofitas (Tillman et al, 2011; Tillman et al 2012.), y a adyacente a cuencas de bajo gradiente (Coes y Pool, 1999). Los manantiales ocurren más comúnmente en las elevaciones bajas de las montañas en cañones que se intersectan capas de arenisca o caliza que yace sobre una capa de baja permeabilidad (Coes et al., 1999; Pool and Dickinson, 2007). Esta situación se encuentra más frecuentemente en la Sierra San José y en las montañas Huachuca y Mule (Minjárez et al., 2011). Las áreas de descarga en las elevaciones bajas de la cuenca se encuentran donde la red de drenaje se intersecta con los sedimentos saturados que yacen sobre capas gruesas de arcilla y limo (Pool and Dickinson, 2007). Estos puntos de descarga pueden ser o tramos de los corrientes y ríos, o manantiales saliendo de las terrazas a los lados del Río San Pedro. Asimismo, existe descarga de agua subterránea a la subcuenca de Benson a través de los sedimentos aluviales. Como se evidencia por el espejo de la superficie del agua del nivel estático, la mayoría del agua subterránea cruza el límite cerca y hacia el este del Río San Pedro, y cruza muy poco hacia el oeste del mismo.

## 8.2 El Comportamiento Hidrodinámico Pre-Desarrollo

Para entender cómo el flujo de agua ha cambiado a través de las influencias del clima, bombeo, y otros factores, es importante estimar el balance antes del desarrollo agrícola, municipal e industrial cuando el sistema estaba en un estado cuasi-estacionario. El balance de agua subterránea pre-desarrollo fue estimado para la CBSP por

Corell et al. (1996), y actualizado por Pool y Dickinson (2007) en base a los datos disponibles de extracciones de agua, área regada, uso de agua por vegetación ribereña, y recarga artificial (Tabla 8.1).

Componente del Balance de Agua Subterránea	Promedios anuales	
	Entradas (m <sup>3</sup> /día)	Salidas (m <sup>3</sup> /día)
Recarga	60, 600	0
Flujo Base	0	28, 700
Evapotranspiración	0	26, 400
Flujo Subterráneo	0	4, 000
Drenaje	0	1, 500
TOTAL	60,600	60, 600

1. Se estima que la recarga es equivalente a los componentes de descarga.
2. Caudal de base representa caudal de base neto, porque tramos en que el cauce pierde o gana agua no son bien definidos.
3. Los drenes incluyen descarga de unos manantiales en las Montañas Huachuca.
4. Está supuesto que ningún cambio en almacenamiento ocurrió durante el tiempo antes del desarrollo.

**Tabla 8. 2 El balance de agua en la CBSP antes del desarrollo (Pool y Dickinson, 2007)**

Pool y Dickinson (2007) utilizaron datos de varios años anteriores a 1940 (la ET en 1935, descarga a Charleston 1935-1939, etc.) para estimar las condiciones del pre-desarrollo (estado estacionario), dado que el sistema no estaba en balance antes de 1940 por factores como el uso y el secado de las minas en Tombstone y Bisbee que comenzaron en los primeros años del siglo veinte, así como a las variaciones en el clima como la ODP y ENSO (Hanson et al, 2004; Dickinson et

al, 2004; Pool, 2005). También ocurrió en este periodo la incisión y el ensanche del cauce del Río San Pedro, comenzando antes de 1900 y no terminando hasta los años cincuenta (Hereford, 1933). Los cambios en el cauce tuvieron la consecuencia de inducir profundización del nivel freático, cambios en la vegetación ribereña con cambios asociados en la ET, y un aumento en el flujo de base, pero la secuencia y magnitud de

estos impactos son desconocidas (Pool and Dickinson, 2007).

La descarga del flujo base hacia la Subcuenca de Benson fue estimada en 4,000 m<sup>3</sup>/d: 2,700 m<sup>3</sup>/d desde el aluvión este del río San Pedro, 1,000 m<sup>3</sup>/d desde el aluvión ribereño asociado con el Río San Pedro cerca del fluviómetro de Tombstone, y 300 m<sup>3</sup>/d del relleno de cuenca al oeste del río (Pool and Dickinson, 2007). La descarga de agua subterránea para los cauces y manantiales fue estimada en 28,700 m<sup>3</sup>/d y la descarga por ET fue estimada de ser 26,400 m<sup>3</sup>/d para una descarga total de 60,600 m<sup>3</sup>/d. Suponiendo que el sistema está en un estado estacionario, el valor de la recarga es de la misma magnitud que el de la descarga (Pool and Dickinson, 2007).

### **8.3 El Comportamiento Hidrodinámico Post-Desarrollo**

La ET en la CBSP cambió significativamente después de 1935 porque el tipo de vegetación a lo largo de los cauces se convirtió principalmente de pastizales y humedales a mezquiales y vegetación ribereña, compuesta principalmente de arbustos y árboles como fresnos y álamos. Los mezquiales y bosques ribereños tienen tasas de ET que son mayor que aquellos de los zacatales y humedales. Para el año 2003, Pool y Dickinson (2007) usaron valores de ET que variaban entre 0.0324 hm<sup>3</sup>/d y 0.0407 hm<sup>3</sup>/d para la SSVA, y entre 0.0045 hm<sup>3</sup>/d y 0.0057 hm<sup>3</sup>/d en la SASPS. Debido a este cambio de la vegetación a lo largo de los cauces, estimaron que los valores de 2003 son el doble de

la tasa de ET en 1935. Tillman et al. (2012), utilizaron el Índice Realzado de Vegetación, un producto satelital de MODIS, para calcular la ET para el período de 2000 a 2007 en la SSVA. Determinaron que la ET varía entre 0.031 hm<sup>3</sup>/d y 0.0419 hm<sup>3</sup>/d con un promedio de 0.0353 hm<sup>3</sup>/d, lo cual es congruente con los valores aplicados por Pool y Dickinson (2007). Scott, Williams, et al. (2006) estimaron el uso del agua subterránea a lo largo del río San Pedro; e Scott, Cable, et al. (2008) estimaron el uso del agua subterránea a lo largo de los ríos San Pedro e Babocomari de ser alrededor de 0.0323 a 0.0408 hm<sup>3</sup>/d para 2003, e Scott, Cable, et al. (2008) reportaron un valor de 0.0411 hm<sup>3</sup>/d para el período de 2001a 2005.

Los informes históricos indican que la extracción de agua subterránea varió considerablemente durante el período después de 1935 en los usos industriales, domésticos y municipales. La extracción de agua subterránea en la CBSP comenzó a principio del siglo 20 y se incrementó de manera relativamente constantemente después de 1935 más o menos, alcanzando una tasa estimada entre 0.110 y 0.164 hm<sup>3</sup>/d durante los últimos 25 años (Pool y Dickinson, 2007). Varios sectores son los responsables por la mayoría del bombeo en la CBSP, los cuales incluyen los sectores mineros, municipales, agropecuarios, industriales y domésticos. Antes de 1940, la extracción fue dominada por las minas cerca de Tombstone, Bisbee, y Cananea, pero después de 1940 el incremento que ocurrió se debió a la perforación de pozos nuevos y a la instalación de bombas de

alta capacidad (Pool y Dickinson, 2007). Las extracciones de agua para la mina cerca de Tombstone eran importantes al inicio del siglo 20, alcanzando un volumen estimado de 0.019 hm<sup>3</sup>/d en 1910 y concluyendo poco después (Pool y Dickinson, 2007). La mina en Bisbee estuvo abierta hasta 1987. Aunque la tasa de bombeo osciló entre 0.027 y 0.466 hm<sup>3</sup>/d, es probable que la extracción del acuífero principal era aislada de la CBSP y alguna porción, desconocida, venía de la cuenca adyacente. Los usos no mineros en la SSVA comenzaron al inicio de los años 1930's. La extracción para uso agrícola en el lado estadounidense fue importante a mediados del siglo 20, pero disminuyó con el tiempo y nunca sobrepasó 0.019 hm<sup>3</sup>/d (Pool y Dickinson, 2007). La extracción de agua subterránea para todos los usos combinados ha aumentado de manera constante y continua con la misma tendencia, alcanzado 0.054 hm<sup>3</sup>/d (Pool y Dickinson, 2007). La extracción máxima asociada con la base militar de Fort Huachuca ocurrió en 1993 y fue estimado en aproximadamente 5 hm<sup>3</sup>/año y ha ido bajando de forma bruta y per cápita desde 1993 (Pool y Dickinson, 2007; Gungle, comunicación escrita, 2014.) La extracción de agua subterránea en la zona de Sierra Vista continúa la expansión del cono de depresión y la alteración de los gradientes del manto freático. La extracción de agua subterránea para todos los usos combinados aumentó con algo de variabilidad a lo largo del siglo XX, variando entre 50 y 55 hm<sup>3</sup>/año al llegar a 2002. Gungle et al. (*bajo revisión*) documentó

que los gradientes horizontales entre Sierra Vista y San Pedro continúan descendiendo.

Los modelos conceptuales y matemáticos post desarrollo de agua subterránea desarrollados por Pool y Dickinson (2007) para la CBSP incluyen cambios en recarga, ET y bombeo. En su modelo numérico, no se implementaron las variaciones en recarga natural, aunque reconocen que ocurren y puede ser significativo en cuanto a los impactos sobre los niveles de agua y los caudales. Sin embargo, su implementación del componente artificial de recarga varía tanto de manera temporal como espacial. Tiene diferentes fuentes como agua de los excedentes del riego agrícola, agua del drenado de minas y aguas residuales que provienen de las descargas domésticas de las localidades de la región y de las fosas sépticas. Se varió la recarga artificial con el tiempo y la ubicación para coincidir, por ejemplo, con las fechas cuando las instalaciones de tratamiento de aguas residuales cerca a Sierra Vista, Bisbee, Fort Huachuca y Tombstone se iniciaron operaciones, donde descargan su efluente (cauces, lagunas, cultivos) y el gasto de descarga (normalmente aumenta con el tiempo). Utilizando Sierra Vista como caso específico, la planta de tratamiento de aguas residuales inició operaciones en 1967, descargando a un cauce de un río efímero. En 1978, se amplió la planta incorporando descarga que se utilizaba para riego de cultivos a partir de 1980. En 2002, el sitio de descarga del efluente se trasladó con el punto final hacia lagunas de recarga.

Las actualizaciones recientes de varios componentes del sistema de agua subterránea y del balance de agua fueron llevadas a cabo por Kennedy y Gungle (2010), Upper San Pedro Partnership (USPP; 2010, 2012), Lacher (2012) y Gungle et al. (*bajo revisión*), en parte como resultado de legislación estadounidense en 2003 que estableció que el Upper San Pedro Partnership elabore un informe anual sobre la condición, evaluación y el mantenimiento del rendimiento sustentable en el manejo del acuífero regional en la SSVA. Gungle et al. (*bajo revisión*) tiene el análisis más reciente de los componentes de la zona de SSVA como parte del sistema de agua subterránea. Se refinan y vuelven a analizar los componentes del balance hidrológico a nivel de cuenca, incluyendo un estimado del balance de agua para el periodo de 2002 a 2012. Las categorías del balance incluyen los componentes naturales del sistema (recarga, entradas/salidas de agua subterránea, descarga de caudal base y ET), bombeo de agua subterránea (municipales, organismos operadores, pozos rurales/exentos, industrial, riego), medidas de manejo activo (remoción de tamarisco/mezquite, recarga mediante efluente municipal y lagunas de retención) y recarga involuntaria (sistemas sépticos, instalaciones de césped, etc. y recarga urbana aumentada). El promedio a largo plazo de flujos desde y hacia los componentes naturales del sistema fueron estimados de investigaciones anteriores y se mantienen constantes de año en año. Los demás componentes del balance son estimados sobre una base anual y se enfocan

principalmente en el consumo de almacenamiento a través de extracción y en la recarga de fuentes variadas. La captura (p.ej. como volumen de reducción en el escurrimiento o ET) no se estimó como un componente del balance. Los estimados anuales son derivados por una variedad de métodos y fuentes tales como bombeo, estimados satelitales y verificados en campo de riego, y descarga menos ET para estimar recarga de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

La extracción de agua subterránea es una parte significativa del balance hídrico en cada país. En México, la autoridad principal para la administración de aguas subterráneas y superficiales proviene del gobierno federal. Ambas pueden ser utilizadas por personas físicas, municipios e instituciones mediante una «concesión» (ver Sección 1.6), definida como una asignación por parte del estado que permite el uso de una cantidad limitada del recurso hídrico. Las concesiones para el bombeo de agua subterránea son otorgadas a los usuarios por un periodo fijo por CONAGUA. El volumen concesionado puede ser el volumen de agua utilizado o no en cualquier año en particular. Los pozos registrados en REPDA 2012 dentro de la Cuenca del San Pedro en Sonora tiene un volumen total en concesión de aproximadamente 24.3 hm<sup>3</sup> anuales (CONAGUA, 2012). La Tabla 6.1 muestra un resumen de los volúmenes concesionados, de los cuales 8.20 hm<sup>3</sup> (34%) se destinan a la actividades agrícolas, 1.8 hm<sup>3</sup> (7%) al abastecimiento público-urbano, 13.8 hm<sup>3</sup> (57%) para el sector industrial, 0.53 hm<sup>3</sup> (2%) para satisfacer las necesidades del uso pecuario y

los 0.01 hm<sup>3</sup> (0.04%) restantes para fines domésticos. En los Estados Unidos en 2012, la mayoría del agua fue bombeada para usos municipales y del operador de agua 11.77 hm<sup>3</sup> (78%; Gungle et al., *bajo revisión*). En orden decreciente, los usos restantes incluyen pozos rurales exentos 1.78 hm<sup>3</sup> (11.8%), industrial 1.41 hm<sup>3</sup> (9.3%), agropecuario 0.070 hm<sup>3</sup> (0.5%), riego 0.068 hm<sup>3</sup> (0.4%).

Para fines de desarrollar un entendimiento aproximado de la distribución del uso binacional del agua, categorías parecidas de extracción de aguas subterráneas de ambos lados de la CBSP para 2012 fueron combinadas. Estos valores son solamente aproximaciones porque los métodos de determinar cada valor difieren en cada país. Los valores utilizados en Sonora son la cantidad de agua que cada sector tiene como concesión. Esto es la cantidad de agua para la cual el concesionario tiene derecho a usar. Es posible que la cantidad actual consumida sea diferente a este valor. En Arizona, se calcularon los valores utilizando varios métodos dependiendo del tipo de uso y los datos disponibles. De manera binacional, el volumen total de extracción es alrededor de 39.4 hm<sup>3</sup>. El uso más importante fue industrial con 15.2 hm<sup>3</sup> (38.5%). Éste fue seguido por el uso público/municipal/de organismos operadores de 13.56 hm<sup>3</sup> (34.4%), agricultura/riego 8.27 hm<sup>3</sup> (21%), pozos rurales/domésticos exentos 1.79 hm<sup>3</sup> (4.5%) y agropecuario 0.60 hm<sup>3</sup> (1.5%).

El informe de Gungle et al. (*bajo revisión*) incluye detalles del volumen de la reducción en el uso de agua y el aumento en la recarga de cada

entidad que está involucrada en el proceso. Los resultados resumidos del balance hídrico indican que la sobreextracción del acuífero ha bajado, de alrededor de 14 hm<sup>3</sup> en 2002 a cerca de 7 hm<sup>3</sup> en 2012 con una incertidumbre estimada de aproximadamente 5 hm<sup>3</sup> (Gungle et al. (*bajo revisión*)). Sin embargo, como se notó en Gungle et al. (*bajo revisión*), tiene un valor limitado el usar un número a nivel de cuenca para los varios componentes del balance y el total del superávit o déficit por varios motivos. Algunas veces, variaciones anuales en factores climáticos tales como precipitación y temperatura resultan en cambios en recarga y descarga del acuífero, los cuales eclipsan cambios en otros componentes, haciendo poco confiable la interpretación de si hay un superávit o déficit en términos de factores antropogénicos al comparar un año con otro. Más aun, el enfoque de balance hídrico omite la variabilidad estacional y espacial de los términos del balance de agua que son más importantes al estimar los efectos sobre los componentes del sistema como por ejemplo el flujo en el San Pedro. Además, en muchos años, la variabilidad anual de los términos del balance hídrico es baja comparada con su incertidumbre, lo que significa que las conclusiones sacadas de las comparaciones interanuales también son inciertas.

En el informe de Gungle et al. (*bajo revisión*) la variabilidad de un número de componentes se considera de manera espacial y temporal. Por ejemplo, los niveles del manto acuífero ripario son estables junto al río San Pedro, mientras los niveles del manto acuífero

regional van disminuyendo en la zona de Sierra Vista. La descarga de manantiales a una elevación menor experimenta un descenso ligero, posiblemente debido a una señal climatológica, con excepción de los que se encuentran próximos al Parque de Operaciones Ambientales [EOP en inglés] de Sierra Vista. Va en descenso el flujo de base en los ríos San Pedro y Babocomari. El cambio en el almacenamiento en el acuífero se midió durante el periodo 2008-2010 con microgravimetría. Las mediciones revelan una resolución mayor de cambios espaciales y temporales de lo típico con otros métodos. Cambios en gravimetría son una medida de los cambios combinados en tanto las zonas saturadas como las no saturadas. Estos datos revelan poco cambio en almacenamiento después de monzones húmedos (mayo 2008 a nov. 2008 y mayo 2010 a nov. 2010) comparados con un descenso después de un monzón seco (junio 2009 a nov. 2009). También muestra un descenso en almacenamiento en el cono de depresión de Sierra Vista durante el invierno de 2008 que fue relativamente seco.

Para profundizar el conocimiento del sistema y mejorar las predicciones, Lacher (2011) actualizó el modelo de Pool y Dickinson (2007) simulando cambios en el sistema hidrológico entre 1902 y 2105. Además, Lacher (2011) actualizó la información piezométrica y los pronósticos del crecimiento poblacional para modificar la ubicación y la tasa de bombeo. Su actualización no incluyó cambios en los parámetros climáticos. Durante el período 2003-2105, el aumento en la tasa neta de bombeo se estimó en un  $0.0338 \text{ hm}^3/\text{d}$

utilizando las proyecciones de población. La recarga permaneció relativamente constante con un valor alrededor de  $0.0744 \text{ hm}^3/\text{d}$  y la ET disminuyó aproximadamente en  $0.0098 \text{ hm}^3/\text{d}$  por el descenso del nivel freático y la disminución consecuente en vegetación ribereña. Se simuló un abatimiento de más de 18 m en áreas que se continúa expandiendo cerca de Naco, entre Sierra Vista y Palominas, y en una zona amplia al noreste de Cananea.

Una parte importante del análisis del comportamiento y evolución del sistema acuífero considera el efecto de ciclos climáticos y/o cambios en componentes del balance de agua sobre el escurrimiento base en el río San Pedro (Vionnet y Maddock, 1992; Pool y Coes, 1999; Hanson et al., 2006; Thomas y Pool, 2006; Pool y Dickinson, 2007; Leake et al., 2008; Kennedy y Gungle, 2010; Lacher, 2011; Lacher, 2012; Leake y Gungle, 2012; Gungle et al. *(bajo revisión)*). Leake et al. (2008) usaron el modelo de Pool y Dickinson (2007) para definir y analizar las zonas de captura de los pozos simulados que inducían flujo procedente del río, los manantiales y la ET riparia. Generaron mapas que ilustran el porcentaje de agua de bombeo que sería capturado de esta fuentes después de 10 y 50 años de bombeo. Básicamente, esto muestra la sensibilidad del río al bombeo en diferentes zonas en la cuenca. Los mayores abatimientos simulados fueron asociados con los municipios y otras zonas desarrolladas tales como Sierra Vista y las áreas desarrolladas al sur de la ciudad, Tombstone, Bisbee/Naco, y Cananea.

Existe variabilidad significativa entre autores en sus conclusiones sobre las fuentes de cambio del caudal base. Hanson et al. (2006) notaron que los ciclos climáticos son un motor importante de la variabilidad de caudal con las asociaciones más fuertes que ocurren dentro de los índices PDO y ENSO. Thomas y Pool (2006) usaron las estadísticas para explorar las causas u origen de la disminución en el flujo base del Río San Pedro, en el contexto regional de precipitación y caudal. Las posibilidades que consideraron incluyen la precipitación, cambios en las características de la cuenca, actividades humanas y almacenamiento de agua en el subálveo del río y arroyos. Concluyeron que no existieron tendencias significativas monotónicas en la variación de la precipitación en la cuenca durante el periodo 1930-2002 con la excepción del verano que tuvo una tendencia decreciente. Sin embargo, como Hanson et al. (2006), encontraron que hubo ciclos pronunciados en precipitación, en particular en invierno y primavera. Mientras que el caudal aumentó en la mayoría de los cauces de la región en este mismo periodo, el flujo base disminuyó en primavera, verano y otoño en el río San Pedro y en dos ríos contiguos, Whitewater Draw y el río Santa Cruz. Observaron que el bombeo regional no afectó al caudal del río; el único impacto claro del bombeo al caudal fue en zonas agrícolas específicas ubicadas cerca del cauce. Concluyeron que hubo varias explicaciones potenciales para el descenso en el flujo base. Éstas incluyen (1) una disminución en entradas del acuífero regional, (2) ET aumentada debido o a una expansión en la

vegetación o a una temporada más extendida de crecimiento, o (3) por error en los datos o el modelo. Lacher (2011) encontró que el desarrollo (poblacional, industrial y agrícola) en la cuenca binacional redujo el flujo base en un 28% en Palominas, 7% en Charleston, y 20% en Tombstone durante el siglo XX. Una conclusión importante de Lacher (2011) fue que el escurrimiento base futuro será capturado por el incremento de la extracción causada por el desarrollo, mientras que la ET se disminuirá como resultado de los niveles menores de agua subterránea.

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 9.1 Resumen de Conclusiones y Observaciones

México y los Estados Unidos comparten aguas en varias cuencas que cruzan la frontera internacional. Sin embargo, no existe un tratado entre ambos países en materia de gestión de las aguas subterráneas de los acuíferos transfronterizos. Se necesita una gran cantidad de información hidrogeológica para entender el comportamiento de este complejo sistema hidrológico transfronterizo, pero la mayoría de los estudios científicos se han hecho a nivel nacional o estatal, por lo general sin el conocimiento o consideración de las condiciones hidrogeológicas en el otro lado de la frontera. El conocimiento científico y la generación de datos binacionales en estos sistemas acuíferos transfronterizos podrían servir a tomadores de decisiones en ambos países, como una base de referencia importante para apoyar la toma de decisiones en cada país.

Cuando un sistema acuífero está dividido por una frontera internacional, es provechoso contar con la coordinación de los científicos de ambos países, a fin de hacer posible un amplio entendimiento de las condiciones actuales del sistema, y coadyuvar en el futuro manejo y la administración de los recursos de agua subterránea en cada país.

Para facilitar esto, el Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos fue iniciado oficialmente el 19 de agosto del 2009, con la firma de los ingenieros principales mexicano y

estadounidense de la CILA del *"Informe Común de los Ingenieros Principales Referente al Proceso de Cooperación Conjunta México-Estados Unidos para el Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos"*. Este documento constituye el marco de referencia para la coordinación y diálogo entre México y Estados Unidos para desarrollar estudios conjuntos sobre los acuíferos transfronterizos. El documento aclara varios detalles sobre el programa, tales como los antecedentes, los objetivos, las responsabilidades, el financiamiento, la relevancia de los tratados internacionales sobre el agua y el uso de la información generada o recopilada como parte de éste. El compartir datos e información en ambos países crea la base para la cooperación y para un entendimiento común en apoyo a la utilización sostenible y la protección de los recursos hídricos en ambos países, así como el logro de un desarrollo económico sostenible. Asimismo, la interacción intelectual e interpersonal mejora las relaciones necesarias para convivir en armonía a nivel local e internacional.

El equipo técnico para este estudio de los acuíferos de Arizona-Sonora incluyó a personal de los dos gobiernos federales (CONAGUA y USGS) y dos universidades estatales (la Universidad de Sonora y la Universidad de Arizona), quienes trabajaron juntos bajo los auspicios de la CILA. Entre los participantes de este esfuerzo de Sonora-Arizona se incluyen además expertos del personal académico del Departamento de Geología de la UNISON y del Centro de Investigación sobre Recursos Hídricos de la Universidad de Arizona,

haciendo posible un significativo avance en el entendimiento binacional del acuífero. La participación de las dos universidades en el aspecto académico, incorpora una cultura de transparencia y apertura común a la academia en todo el mundo. Esta colaboración académica trajo consigo flexibilidad al intercambio de información y al establecimiento de un marco de entendimiento mutuo que beneficia a ambos gobiernos federales.

Tomando en cuenta las características del acuífero que se describen en este Estudio, es importante mencionar que la información binacional estaba disponible para estimar los parámetros del clima y vegetación regionales, sin embargo no existían mapas binacionales integrados con información para suelos, geología, geofísica, piezometría, parámetros hidráulicos o de la calidad del agua. Las diferencias en ambos lados de la frontera en la información sobre hidrografía, hipsometría y pendientes del terreno fueron causadas, al menos en parte, por las diferencias en la resolución de los modelos digitales de elevación. Por ello, uno de los resultados más importantes durante la preparación de este informe fue crear, por primera vez para el acuífero del Río San Pedro, mapas binacionales y bases de datos para muchos de los elementos necesarios para un análisis hidrológico regional. La geología superficial y la información geofísica (electromagnética, gravimétrica, magnética y sísmica) se utilizaron para desarrollar el modelo conceptual de la hidrogeología. Los datos disponibles del clima, parámetros hidráulicos, piezometría e hidrogeología se pueden utilizar en

el futuro para actualizar un modelo de flujo de agua subterránea. Este proceso también ha servido para identificar la ausencia de datos y la importancia del monitoreo a un nivel binacional. Solamente la información sobre los tipos de suelo no fue posible integrarla de una manera “binacional” debido a que cada país utiliza un sistema de clasificación claramente diferente. Esta integración uniforme y conjunta, requeriría de un proyecto complejo y de largo plazo que incluya métodos bilateralmente negociados y la participación de un equipo de campo binacional especializado en cartografía de suelos. Con esta excepción, fue posible la integración de datos transfronterizos, aunque hubo ocasiones en que ésta requirió de una interpretación conjunta y del diálogo entre científicos de ambos países.

## **9.2 Resumen de Resultados Técnicos**

La CBSP se localiza en el lado oriental de la frontera entre Arizona y Sonora, en una zona considerada como la transición entre los Desiertos de Sonora y Chihuahua, con altitudes que van de 1,100 msnm en la parte más septentrional de la cuenca hasta 2,620 msnm al este de Cananea, y sobre los 2,700 msnm en las montañas Huachuca. Hay numerosos afluentes del Río San Pedro que son importantes para la recarga del acuífero. Los suelos en la CBSP se han clasificado utilizando diferentes criterios en cada lado de la frontera, y por lo tanto son difíciles de comparar. En base al sistema de clasificación de suelos de la FAO, la superficie del acuífero del Río San Pedro en Sonora se compone de ocho tipos de suelo. Para la

Sub-cuenca Sierra Vista en Arizona (SSVA), los suelos fueron clasificados por el NRCS, que es un organismo dependiente del USDA, clasificándolos en grupos o asociaciones de tipos de suelos. Hay ocho tipos de suelo diferentes en la SSVA que varían dependiendo de la topografía, la apariencia, precipitación, temperatura, vegetación, roca fuente, y otros factores. Al igual que los suelos, la vegetación en la CBSP se clasifica de forma diferente en cada lado de la frontera; sin embargo hay similitudes, incluyendo las clasificaciones de bosque de encino-pino y bosque siempre verde, pastizales y matorrales.

El clima en la CBSP es árido a semiárido y es considerada una zona templada, con veranos cálidos y una temperatura media anual que oscila entre 12 y 18°C. Temperaturas superiores a 38°C ocurren con frecuencia en las zonas de baja altitud durante el verano, pero éstas son poco frecuentes en las elevaciones más altas de la región. En invierno, la temperatura mínima promedio es cercana a los 0°C. La precipitación ocurre principalmente durante el verano y el invierno, con precipitaciones de verano generalmente de mayor magnitud que las de invierno. Medidores de precipitación ubicados en áreas topográficamente más altas suelen registrar valores más altos que los ubicados en elevaciones más bajas. La evaporación potencial media anual estimada varía entre 1.5 y 2 metros. Hay una serie de estaciones de aforo de caudal en el lado estadounidense, tanto en el Río San Pedro como en sus afluentes, pero ninguna actualmente en Sonora. Las pendientes son generalmente de 0-3% en los valles y se

incrementan hasta un 65% en las montañas. El orden de corrientes del Río San Pedro dentro del área de estudio varía de 4 a 7; mientras que para los afluentes es típicamente de orden 4-5. Los usos principales de suelo en la SSVA son: doméstico, comercial, industrial y agrícola. La mayor parte del territorio de la SSVA es propiedad de los gobiernos federal y estatal. La base militar Fort Huachuca abarca casi 42,000 hectáreas a través de propiedad o arrendamiento. El USFS gestiona extensas áreas en las montañas y en las zonas adyacentes, en donde el uso de suelo incluye la recreación, la ganadería y la producción de madera. Otra agencia federal, la BLM, también controla un porcentaje importante en esta región de Arizona, incluyendo el Área de Conservación Ribereña Nacional de San Pedro (SPRNCA) que cubre cerca de 23,000 hectáreas. El gobierno del estado también controla un gran porcentaje de las tierras en el lado de Arizona. El uso de suelo en Sonora es principalmente para la agricultura, el turismo y la minería. Algunas partes de la porción sureste de la cuenca se encuentran dentro de la Reserva Forestal y de Fauna Silvestre Ajos-Bavispe. Un mapa binacional del uso de suelo ha sido publicado por la USEPA.

La geología en la CBSP es producto de una compleja evolución tectónica. La diversidad de estos eventos tectónicos y las deformaciones experimentadas produjeron una región con una gran complejidad geológica. Dentro de la porción noreste de Sonora y la parte sureste de Arizona, las rocas más antiguas forman un basamento precámbrico caracterizado por el Esquisto Pinal

(1680 Ma) y las intrusiones graníticas del Mesoproterozoico, el cual está cubierto por secuencias de plataformas sedimentarias, principalmente carbonatadas, depositadas prácticamente durante todo el Paleozoico. Las rocas más antiguas del Mesozoico dentro de esta región están representadas por una secuencia vulcano-sedimentaria de edad jurásica, la cual se encuentra expuesta principalmente en las Montañas Huachuca en Arizona y en la Sierra Mariquita en Sonora. Las rocas del Cretácico-Terciario están ampliamente distribuidas en ambas partes de la CBSP y representan el producto de una serie de procesos geológicos que ocurrieron durante este tiempo. La geología de la región en la que se encuentra el acuífero dentro de la CBSP está representada por rocas intrusivas, metamórficas, vulcano-sedimentarias, sedimentarias y volcánicas. Con el fin de simplificar el mapeo y la descripción de estas unidades en ambos lados de la frontera, se propusieron una serie de unidades litoestratigráficas y litodémicas informales que de manera general agrupan a aquellas que tienen una litología y edad similar. La historia tectónica de la región ha sido compleja en todo el Fanerozoico. Durante el Fanerozoico temprano a medio varios eventos compresivos afectaron la región generando estructuras compresionales (cabalgamientos y pliegues); mientras que para el Cenozoico, las discontinuidades mayores y más representativas que se encuentran en la cuenca son fallas normales extensionales. Estas estructuras extensionales dentro de la CBSP aparecen como

fallas normales que emergen como grupos con dos orientaciones preferenciales, la primera como un sistema nornoroeste-sur sureste, y la segunda orientada al noreste-sur oeste.

En el lado estadounidense de la CBSP, se han llevado a cabo una serie de estudios geofísicos orientados a determinar la estructura de la cuenca, entre ellos: levantamientos electromagnéticos, gravimétricos y magnéticos, así como estudios hidrogeológicos que incluyeron modelos de cortes transversales y del subsuelo. Muy poco trabajo previo se ha realizado para determinar las características del subsuelo en la parte mexicana de la cuenca; sin embargo, en este estudio se presentan avances sustanciales como el levantamiento y modelado de datos electromagnéticos y gravimétricos. En base a sus datos gravimétricos y magnetométricos, se propuso que el lado estadounidense de la CBSP está orientada noroeste-sureste con 1.5 Km de profundidad máxima cerca de la frontera. Además se identificaron dos sub-cuencas principales en el lado oeste del Río San Pedro, separadas por un basamento levantado por debajo de la ciudad de Sierra Vista. En la SASPS, el modelado de varios perfiles gravimétricos permitieron interpretar la profundidad al basamento en cada una de las estaciones; de dos de estos perfiles se puede establecer que la profundidad al basamento es muy variable, y que las mayores, entre 430 y 510 m, se encuentran en la frontera norte cerca del poblado José María Morelos. Además, el basamento tiene la geometría de fosas tectónicas delimitadas por altos estructurales, donde la

elevación más importante se encuentra hacia la porción sur de la cuenca a lo largo de la carretera Cananea-Agua Prieta. El relleno sedimentario dentro de la parte estadounidense de la CBSP se ha dividido en dos unidades informales, llamadas Relleno Inferior de la Cuenca (*Lower Basin Fill*) y Relleno Superior de la Cuenca (*Upper Basin Fill*) que fueron depositados en cuencas estructurales entre las montañas durante el Plio-Pleistoceno. Aunque en la porción mexicana de la cuenca no existen estudios previos detallados sobre la estratigrafía de estos sedimentos, los cuales representan también al acuífero aluvial principal regional, las características físicas obtenidas a partir de las descripciones litológicas de pozos sugieren una equivalencia con la división presentada en la SSVA. Con los datos obtenidos a partir de la descripción litológica de pozos, sondeos eléctricos verticales y otros métodos geofísicos, investigadores anteriores identificaron una zona limo-arcillosa dentro del Relleno Superior de la Cuenca en ambos lados de la frontera, con un espesor estimado de entre 10 y 300 m, principalmente a lo largo del cauce del Río San Pedro, con los límites inferiores y superiores de esta zona en las elevaciones entre los 1400 y 1100 msnm. Los sondeos TEM realizados en el lado mexicano de la cuenca corroboran la presencia de esta zona limo-arcillosa, ya que las características de resistividad de estos sedimentos finos (<12 Ohm-m) están claramente detectadas en varios de los perfiles. En un perfil de resistividad orientado oeste-este, en la frontera sur de la SASPS, el límite inferior de esta zona está a una

altitud de 1,100 m.s.n.m, mientras que el límite superior está aproximadamente a los 1400 m.s.n.m, lo cual va en acuerdo con estimaciones previas. La función hidrológica de esta zona arcillosa en la SASPS no ha sido estudiada, pero debido a su continuidad espacial con la zona arcillosa de Arizona, ésta probablemente funcione de manera similar con respecto a la recarga, condiciones de confinamiento y direcciones del flujo subterráneo.

El número de pozos en la CBSP es mayor de 5000, la mayoría de los cuales están cerca y al sur de la ciudad de Sierra Vista, contando aproximadamente 2300 de éstos con una profundidad mayor a los 100 m. Una serie de hidrógrafos se incluyen como ejemplos de procesos hidrológicos particulares y/o entornos geográficos. Algunos pozos, especialmente los que están cerca de los frentes de montaña o de cauces fluviales, muestran cambios estacionales en el nivel estático del agua en respuesta a eventos de recarga. Los niveles de agua cerca de Sierra Vista, Fort Huachuca, y en el área de desarrollo no regulado al sur y al este de Sierra Vista, están experimentando abatimientos, mientras que los pozos cercanos al río son generalmente estables. La recarga en la EOP está potencialmente estabilizando estos niveles aguas abajo de su ubicación. Los niveles estáticos más superficiales dentro de la CBSP se encuentran típicamente cerca del Río San Pedro y otros canales de flujo, así como en las faldas de las montañas cerca de las zonas de recarga. En el lado estadounidense de la frontera, dentro de los límites de la ciudad de

Sierra Vista, la profundidad al agua es a menudo superior a 100 m. Las elevaciones del nivel estático indican conos de depresión en y cerca de las ciudades de Sierra Vista y Tombstone. Se han producido incrementos de los niveles de agua en los pozos influenciados por la EOP y en lugares cerca del río donde el bombeo agrícola cesó a mediados del año 2000.

La extracción de agua subterránea en la SSVA inició a principios del siglo XX y aumentó de manera relativamente constante, llegando a una tasa estimada de entre 40 y 60 hm<sup>3</sup>/año en los 25 años anteriores al 2002. Varios sectores son responsables de la mayoría del bombeo de la CBSP, incluyendo el minero, municipal, agrícola-ganadero, industrial y doméstico. Los pozos registrados en el REPDA 2012 dentro de la SASPS tienen un volumen total concesionado de 24.3 hm<sup>3</sup> al año, de los cuales cerca de 8.20 hm<sup>3</sup> (34%) se utiliza para actividades agrícolas, 1.8 hm<sup>3</sup> (7%) para público-urbano, 13.8 hm<sup>3</sup> (57%) en el sector industrial, 0.53 hm<sup>3</sup> (2%) para satisfacer las necesidades del ganado, y el restante 0.01 hm<sup>3</sup> (0.04%) es utilizado para propósitos domésticos. En la SSVA en 2012, los usos municipales y de empresas de agua representaron 11.77 hm<sup>3</sup> (78%), y en orden decreciente, pozos rurales exentos 1.78 hm<sup>3</sup> (11.8%), industrial hm<sup>3</sup> 1.41 (9.3%), ganadero 0.070 hm<sup>3</sup> (0.5%), hm<sup>3</sup>, riego 0.068 (0.4%). Combinando estos valores binacionalmente, el volumen de extracción total fue de 39.4 hm<sup>3</sup>. La mayoría fue de uso industrial con 15.2 hm<sup>3</sup> (38.5%), seguido por el uso de agua pública municipal de 13.56 hm<sup>3</sup> (34.4%), el agrícola/riego

de 8.27 hm<sup>3</sup> (21%), los pozos domésticos / rural exentos de 1.79 hm<sup>3</sup> (4.5%) y el ganadero de 0.60 hm<sup>3</sup> (1.5%).

Las pruebas de bombeo en el lado estadounidense son escasas, aunque se ubicaron dos que se realizaron previamente en pozos en el Fuerte Huachuca. Para este estudio se llevaron a cabo 13 pruebas de bombeo en Sonora. Los valores calibrados del modelo de conductividad hidráulica saturada varían entre 0.0001 y 12.50 m/d. La anisotropía vertical fue más baja en las rocas y en el relleno sedimentario indiferenciado (3.5 a 9.4) y más alta en otras rocas intercaladas y en los sedimentos limo-arcillosos del relleno de la cuenca (27.3 y 122.5). Los valores calibrados de almacenamiento específico para los acuíferos varían poco en la CBSP, desde  $1.0 \times 10^{-6}$  m<sup>-1</sup> hasta  $6.7 \times 10^{-6}$  m<sup>-1</sup>, con los valores más altos encontrados en el Relleno Inferior de la Cuenca. En la CBSP, el rendimiento específico (Sy) oscila de un mínimo de 0.001 en roca dura a 0.3 en las gravas y arenas del relleno sedimentario de la cuenca y de los aluviones, con un valor de 0.09 medido con microgravedad y niveles de agua en pozos cercanos al Arroyo Garden Canyon.

Los límites de flujo de agua subterránea y el basamento hidrogeológico de la CBSP están constituidos principalmente por secuencias sedimentarias y vulcano-sedimentarias del Paleozoico al Mesozoico, así como por las intrusiones de rocas graníticas del Terciario. Las zonas de baja resistividad a profundidad fueron interpretadas como zonas potenciales de fractura, pero esto no ha sido confirmado por otros

métodos. Tanto la unidad volcánica félsica como las secuencias vulcano-sedimentarias conglomeráticas del Terciario en ambos lados de la frontera se consideraron parte del basamento, pero existe la posibilidad de que estas zonas pueden estar lo suficientemente fracturadas y conectadas hidráulicamente de manera tal que pueden llegar a ser una parte importante del sistema acuífero. Se propuso una nueva clasificación unificando las descripciones de unidades hidroestratigráficas en ambos lados de la frontera en base a las diferencias en la distribución del tamaño de partícula, definiendo las siguientes 3 unidades:

Unidad Hidroestratigráfica 1: Corresponde a la fracción granular más gruesa del relleno sedimentario de la cuenca representado por gravas y arenas. Incluye a las porciones hidráulicamente más conductivas del Relleno Superior e Inferior de la Cuenca. La unidad tiene la más alta conductividad hidráulica, aunque a profundidad ésta probablemente disminuye, ya que típicamente a mayor profundidad se tiene un mayor grado de compactación y cementación.

Unidad Hidroestratigráfica 2: Esta unidad incorpora los sedimentos finos con baja conductividad hidráulica que se incluyen principalmente el Relleno Superior de la Cuenca. Estas unidades de limos y arcillas de baja conductividad hidráulica, se encuentran principalmente en la porción

central de la cuenca. Es posible que estos sedimentos sean responsables de crear las condiciones de confinamiento que se encuentran en la Unidad Hidroestratigráfica 1. El grado de las condiciones de confinamiento está en función de la extensión de esta unidad en el subsuelo.

Unidad Hidroestratigráfica 3: Se encuentran incluidas en esta unidad aquellas unidades rocosas que podrían ser agrupadas como acuíferos de roca fracturada, entre las cuales se encuentran las capas conglomeráticas de la Formación Báucarit, la unidad Tc, y las rocas volcánicas félsicas del Terciario que las cubren, así como también las porciones fracturadas o erosionadas del basamento, como las calizas, las cuales posiblemente podrían contener agua subterránea.

Desde el punto de vista de la extracción de agua, las rocas cristalinas y sedimentarias precenozoicas almacenan poca agua en la CBSP; sin embargo, éstas representan las zonas de recarga más importantes para los acuíferos aluviales primarios ya que forman las montañas donde cae más precipitación. El conglomerado Terciario (Tc) en la porción estadounidense de la cuenca es localmente importante y productivo como fuente de agua subterránea, que lo identifica como un acuífero en roca a través de redes de fracturas (Unidad Hidroestratigráfica 3). Las aguas subterráneas en la cuenca fluyen principalmente en las capas no consolidadas de sedimentos

gruesos que actúan como el relleno sedimentario de la cuenca (Unidad Hidroestratigráfica 1), y en los depósitos superficiales Plio-Cuaternarios asociados con terrazas y depósitos aluviales, por lo que éstos actúan como los acuíferos principales de la cuenca. Este acuífero funciona como un acuífero no confinado, principalmente en los sedimentos del Relleno Superior de la Cuenca, donde los sedimentos se encuentran saturados y asociados con la facies proximales y medias de abanicos aluviales; sin embargo, los sedimentos del Relleno Inferior de la Cuenca, que tienen espesores mayores hacia el centro de la cuenca, están confinados por sedimentos ricos en arcilla (Unidad Hidroestratigráfica 2). Esta zona limo-arcillosa es un factor importante que afecta fuertemente el flujo de agua en la cuenca, incluyendo la comunicación hidrológica entre el agua superficial en el Río San Pedro y los acuíferos regionales. Las unidades que conforman las terrazas y los depósitos aluviales del Pleistoceno tardío actúan como acuíferos secundarios importantes.

La Hidrogeoquímica es también un factor importante en la comprensión de la condición hidrológica de la CBSP. En la SSVA, el ADWR y el USGS visitan anualmente un pequeño conjunto de pozos para hacer mediciones. Además de estos datos básicos sobre la calidad del agua en Arizona, hay muchos más datos generados por agencias estatales, locales y federales, así como por organizaciones no gubernamentales. Las muestras de calidad del agua para la porción mexicana de la CBSP se recogieron durante un estudio de

muestreo geoquímico del acuífero del Río San Pedro realizado por el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora en julio de 2011, durante este trabajo se tomaron 20 muestras, de las cuales todas eran de pozos de bombeo. Se realizaron mediciones de conductividad eléctrica, pH y temperatura en cada muestra. No se tomaron muestras nuevas en Arizona. La temperatura en la porción mexicana de la cuenca varió de 19.6 a 27.6°C, con un promedio de 23.6°C, mientras que todos los valores de pH estuvieron dentro de los niveles máximos permisibles descritos en la Norma Oficial Mexicana para el agua destinada al consumo humano, de 6.5 a 8.5. En la SSVA, las temperaturas de las aguas subterráneas variaron desde 14.5 hasta 26.5 °C, con un promedio de 23°C; mientras que los valores de pH se tuvieron entre 6.2 y 8.2. En la SASPS, los sólidos disueltos totales fueron generalmente menores a los 500 mg/L. El tipo de agua subterránea en el acuífero binacional es la bicarbonatada cálcica, generalmente alcalina y de baja salinidad. Las concentraciones de calcio y magnesio en las aguas del Río San Pedro y en los sedimentos del Holoceno en general son menores a los que se tienen en las aguas del acuífero regional. La distribución geográfica de los iones en el agua subterránea indica altas concentraciones de calcio y magnesio cerca de las montañas, y las mayores concentraciones de sodio y potasio se encuentran cerca del río. En la SSVA, los valores de conductividad específica de las aguas superficiales dan un promedio de 558  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , oscilando desde 235 hasta 610  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con valores en general

decrecientes en la dirección del flujo superficial. En la SASPS, se observaron valores en general menores a 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , incrementándose hacia el norte. Patrones de isótopos estables en la SSVA indican que las aguas subterráneas en el lado oeste del río están dominadas en gran medida por la recarga de precipitación de latitudes altas de las Montañas Huachuca. Las aguas subterráneas que descargan al río se mezclan con el agua de México que tiene valores relativamente más grandes (más positivos) de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ . Las tendencias de mezclas de isótopos indican que, desde Palominas (aproximadamente 3 millas al norte de la frontera) hasta el puente de Charleston (cerca de 17 millas aguas abajo), una porción cada vez mayor de agua en el río se deriva de las aguas subterráneas. El agua subterránea en Arizona al este del río y en México, se compone en gran parte por la recarga en las partes de elevación baja y/o por las precipitaciones que ocurren durante el verano.

El comportamiento hidrodinámico de la cuenca está determinado por factores clave, tales como el clima, la geología y el tiempo. La recarga es mayor en las elevaciones más altas, no sólo debido a la cantidad de precipitación, sino también a la baja tasa de transpiración a través de las plantas, y a la evaporación de las superficies y suelos. La recarga del sistema de montaña se produce a través de la infiltración y percolación profunda a través de rocas permeables de la porción montañosa, así como en el frente de montaña donde los canales de flujo convergen con sedimentos aluviales de alta permeabilidad en las laderas. Otra fuente importante de recarga se

produce en arroyos perenes y ríos, así como en los canales efímeros, donde se concentra el agua y los sedimentos permeables facilitan la infiltración. En los sedimentos aluviales de la cuenca, el agua subterránea fluye hacia las zonas de descarga a lo largo de tramos perennes o intermitentes de arroyos y ríos, a través de la ET por freatofitas, así como en áreas bajas adyacentes. Los manantiales de montaña se producen con mayor frecuencia en las elevaciones más bajas, en los cañones que cruzan fallas o capas de arenisca o caliza que recubren los materiales de baja permeabilidad. Esta situación se encuentra con más frecuencia en la Sierra San José y en las Montañas Huachuca y Mule. Las zonas de descarga en elevaciones más bajas se encuentran a menudo donde la red de drenaje cruza los sedimentos saturados que recubren capas gruesas de arcilla y limo. Estos puntos de descarga pueden ser tanto tramos de arroyo como de río, o manantiales ubicados en terrazas en las laderas del Río San Pedro. También hay descarga de aguas subterráneas en la Subcuenca Benson en Arizona a través de los sedimentos aluviales. Como se demuestra por la forma del nivel estático del agua, la mayor parte del agua subterránea cruza la frontera cerca y al este del Río San Pedro. El caudal base está en declive en los cuatro medidores ubicados a lo largo del Río San Pedro. Trabajos recientes que involucran modelados numéricos puntualizan que múltiples causas, como los ciclos climáticos y el bombeo, son los que juegan un papel importante.

A continuación se incluyen varias recomendaciones técnicas, reconociendo que la

disponibilidad de recursos limitará lo que es factible llevar a cabo a corto plazo. Sin embargo, lo que es posible y deseable para realizar a largo plazo también se menciona, con el fin de iniciar el diálogo que permita establecer prioridades para estas recomendaciones técnicas. Recomendamos que el grupo técnico binacional del *Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos México-EUA*, en consulta con las partes interesadas, elabore planes detallados para los próximos pasos propuestos como "Fase 2" de este estudio.

### 9.3 Recomendaciones Técnicas

Tanto el monitoreo periódico como continuo son críticos para la comprensión del movimiento del agua a través de la CBSP, ya que es influenciado por efectos espaciales y de variación temporal del clima, de los seres humanos y de otros organismos (vegetación, castores, etc.). La siguiente es una lista de los tipos de monitoreo sugeridos.

Componentes del Balance Hídrico – La estimación de los componentes del balance hídrico es crítica para entender la evolución de entradas, salidas y almacenamiento de agua en la CBSP, pero los datos necesarios para estimar estos componentes no necesariamente se recopilan con regularidad ni la extensión espacial apropiada. Las siguientes cinco categorías representan una discusión de los componentes del balance hídrico y detalles sobre la utilidad y necesidad de hacer estimados para cada componente y los datos requeridos para apoyarlo.

Uso y Extracción de agua subterránea - A un nivel binacional, una red de monitoreo que incluya las principales extracciones de agua subterránea en el área de estudio mejoraría la información sobre los volúmenes de extracción de aguas subterráneas. La recolección e intercambio puntual de esta información coadyuvará a fortalecer aún más la base de datos existente, o las que se generen en el futuro, más robustas, aún en los casos en donde no existen actualmente modelos matemáticos de simulación de flujo. Algunos de los datos de consumo de agua son recopilados tanto por el USGS como por la CONAGUA, pero los métodos, categorías y frecuencia de la colección y publicación de datos difieren.

Medir niveles piezométricos – Formación de un equipo técnico binacional para tomar medidas piezométricas en toda la cuenca dos veces al año, o anualmente como mínimo, sería de utilidad para caracterizar la variabilidad en el almacenamiento del acuífero y los efectos de los flujos hacia y desde el sistema de aguas subterráneas. Debido a que algunos flujos varían en escalas de tiempo mucho menores que ésta, las mediciones anuales o bianuales podrían ser complementadas con mediciones continuas, (mensuales o semanales) en aquellos sitios cercanos a los cauces de los ríos o arroyos, en represas, y en cuencas de detención. Esta información permitiría caracterizar los cambios en los niveles piezométricos asociados con eventos de lluvia, y variaciones en la extracción de aguas subterráneas asociadas con el hábitat ribereño y la infraestructura humana. Siempre que sea posible, las lecturas del nivel

estático del agua deben llevarse a cabo cuando las bombas de los pozos no estén en operación.

Medir el flujo superficial - Este estudio identificó un desequilibrio importante en las mediciones binacionales de los medidores de caudal en la CBSP; ya que no hay este tipo de medidores en la SASPS. La ausencia de estaciones de aforo activas para medir el caudal en el territorio de Sonora representa una limitante para la caracterización hidrológica fundamental de la cuenca. Es necesario contar con la medición de caudal para obtener una mayor certidumbre en las interacciones cauce superficial – acuífero, y la confianza en las estimaciones de recarga y en el balance hídrico de la cuenca. La instalación de estaciones de aforo en lugares clave como el Río Los Fresnos, en los principales afluentes que surgen en la Sierra Mariquita y en la sierra Los Ajos, y en las cabeceras del Río San Pedro, cerca de la comunidad de Cananea, ofrecerían una mejor perspectiva en este aspecto.

Expandir la Red de Observación del Clima – Incrementar el número de estaciones meteorológicas para recolectar datos sobre temperatura, humedad, humedad del suelo, velocidad del viento y la precipitación en ambos lados de la frontera, tendría beneficios significativos para la comprensión del cambio climático, las estimaciones de la recarga natural, y los cálculos de balance de agua. La falta de un sistema de radar meteorológico con aplicaciones binacionales en las cuencas San Pedro y Santa Cruz limita la utilidad de la información hidrológica disponible. Los datos generados por

una estación meteorológica Doppler podrían proporcionar información científica clave para el desarrollo de modelos hidrológicos. Asimismo, sería importante contar con un sistema de radar situado en el lado mexicano que pudiera generar datos clave para una emisión más precisa y temprana de advertencia pública sobre inundaciones, lo que resulta en alertas más eficaces por parte de las instancias de protección civil en ambos lados de la frontera. Es posible la instalación de un sólo sistema de radar meteorológico Doppler en la sierra El Pinito, ubicada al sureste de la ciudad de Nogales, Sonora, el cual podría proporcionar una cobertura al arroyo Nogales, así como a las cuencas de los ríos Santa Cruz y San Pedro. Dicha información meteorológica funcionaría mejor en conjunto con el las mediciones de caudal mencionadas anteriormente.

Estudios de la evapotranspiración y cambio en la vegetación – El USGS ha llevado a cabo un estudio de las necesidades hidrológicas y la ET a través del funcionamiento hidrológico del hábitat ribereño en la porción de Arizona del Río San Pedro (Leenhouts et al, 2006; Tillman et al, 2012), en parte, para tener una mejor comprensión de los efectos potenciales del desarrollo y el cambio climático. El estudio realizado por Leenhouts et al (2006) examinó la ET, los requisitos de conectividad hidrológica de diferentes plantas y la relación entre el régimen hidrológico de un tramo particular, la estructura y la diversidad de la vegetación, así como la presencia de agua a diferentes profundidades y las fluctuaciones

anuales en el manto freático para una mejor comprensión de las necesidades de agua del hábitat ribereño. Asimismo, la Universidad de Arizona ha realizado varios estudios en el Río Santa Cruz para definir la interacción hidrológica entre el acuífero, el caudal y el hábitat ribereño (McCoy 2009, Treese 2009). Los estudios binacionales en curso podrían ser implementados a fin de documentar los cambios en el uso del suelo, y en el tipo y distribución de vegetación. Estos estudios podrían incluir el análisis de datos satelitales y el establecimiento y seguimiento de las parcelas de vegetación a largo plazo, tales como los de Scott et al (2014). Dicha información también se traduciría en una mejor comprensión del sistema no saturado como parte del sistema hidrológico y su importancia como un vehículo para la transmisión de recarga y el suministro de agua para los ecosistemas binacionalmente compartidos.

Muestreo de la calidad del agua e isótopos estables - Monitorear la calidad del agua subterránea a nivel binacional utilizando estándares y métodos uniformes es importante por varias razones científicas y prácticas. Los datos históricos y los estudios de este tipo son necesarios para comprender y explicar la mezcla y las tendencias en el agua de diferentes fuentes, tales como las fuentes del flujo base en el Río San Pedro (Gungle et al, en revisión). Sería especialmente útil contar con una base de datos más extensa en áreas como la Cuenca del San Pedro, donde los cambios en los usos del suelo o las actividades antropogénicas, por ejemplo la

minería, pueden alterar la calidad del agua en la región. Los estudios que utilizan isótopos estables en conjunto con otros parámetros de calidad del agua serían muy útiles para lograr una mejor comprensión acerca de la recarga del acuífero, de las direcciones de los flujos del agua subterránea, de la mezcla de agua de diferentes fuentes, y sobre la disponibilidad de agua a largo plazo.

Métodos Geofísicos y de Percepción Remota – Se recomienda el desarrollo de estudios binacionales utilizando métodos geofísicos para refinar el entendimiento de la distribución temporal y espacial del agua y la distribución espacial de los materiales geológicos. Algunas consideraciones para la aplicación de estos métodos son: el parámetro de medición, la resolución, la disponibilidad de equipos de medición, la experiencia, el costo, el tiempo, y la facilidad de instalación y ejecución. Estos métodos incluyen magnetismo, gravimetría, electromagnética, y técnicas sísmicas y eléctricas. Existen disponibles para plataformas aéreas, superficiales y en barrenos. La resonancia magnética nuclear es una técnica relativamente nueva que se puede aplicar para estimar la conductividad hidráulica y el rendimiento hídrico del aluvión. Se recomienda utilizar tecnología LiDAR y fotogrametría (terrestre, con dron o avión) para proporcionar información sobre topografía y vegetación. Estos datos pueden ser utilizados para estimar ET y para la modelación numérica de interacción agua superficial-subterránea. Los métodos y productos basados en satélites pueden ser utilizados para estimar la

variabilidad temporal y espacial de la geología, vegetación, temperatura, capa de nieve, y humedad del suelo (Tillman et al., 2012; van der Meer et al., 2012; Schmugge et al., 2002).

El uso de microgravimetría ha demostrado en Arizona ser un método muy útil para medir los volúmenes de cambio de almacenamiento de agua en el subsuelo. En regiones caracterizadas por la escasez o ausencia de pozos, esta tecnología de geofísica puede aportar información sobre cambios estacionales o anuales en el almacenamiento del acuífero, permitiendo una evaluación relativamente rápida y económica a escala regional y local. En sitios con pozos, se puede utilizar la microgravimetría no solamente para determinar el cambio de almacenamiento, sino también para estimar la captura de agua subterránea y las propiedades de almacenamiento. La aplicación de esta tecnología en ambos lados de la frontera de manera coordinada podría ser provechoso para evaluar los cambios de almacenamiento y definir sus posibles causas y los efectos correspondientes; por ejemplo, los cambios en el almacenamiento ocasionados por las actividades antropogénicas y sus impactos potenciales sobre el caudal base.

Perforación investigativa – La perforación brinda información detallada sobre la variabilidad de material geológica dentro de un barreno, la cual es difícil obtener mediante otros métodos. Suplementa la información geofísica al verificar en campo la interpretación de las mediciones geofísicas. De hecho, todos los métodos geofísicos (y muchos otros) pueden ser realizados dentro en

un barreno. Además, la variabilidad temporal y espacial del almacenamiento y la química del agua en el acuífero y la zona no saturada, se pueden estudiar con técnicas como medición de flujos, muestreo de calidad de agua, y monitoreo local de niveles de agua, tirante y componentes químicos. Muestras y núcleos de los barrenos pueden ser analizados y probados para una amplia variedad de parámetros incluyendo mineralogía, propiedades hidráulicas y físicas (densidad, conductividad hidráulica y distribución granulométrica), parámetros químicos (tales como pH y salinidad). Sugerimos realizar perforaciones en sitios clave alrededor de la CBSP para llenar los vacíos existentes en el conocimiento hidrológico.

Carta Edafológica Binacional – Actualmente no existe ninguna carta edafológica binacional debido a que los métodos estándares difieren de manera significativa entre los dos países. Los levantamientos de suelo muchas veces son demorados y costosos pero la decisión sobre si se escoge una norma existente o si se desarrolla un nuevo estándar o uno combinado, y de ser necesario el proceso de desarrollar nuevas normas también, requerirá tiempo y recursos. Un primer paso lógico sería de consultar con las entidades normativas a nivel nacional en cada país a las que se encargan esta responsabilidad. En los Estados Unidos, el desarrollo de métodos, levantamientos a gran escala e inventarios normalmente son realizados por el NRCS y el Servicio Forestal. En México, el Levantamiento Nacional más reciente fue realizado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

Estandarización de bases de datos – Actualmente no existen estándares binacionales de bases de datos para la revisión y almacenamiento de los diferentes tipos de datos mencionados en este estudio. La falta de estándares también sucede en cada país con respecto a ciertos tipos de datos. El desarrollo de estándares binacionales de datos relacionadas con la revisión y almacenamiento de datos ayudaría a facilitar la búsqueda, integración y comparación de datos.

Estudios de Interacciones entre Aguas Subterráneas y Superficiales – La relación entre agua subterránea y agua superficial en esta región has sido documentada en varias investigaciones. Sin embargo, dada la importancia a nivel continental de los sistemas ripario y acuático del río San Pedro, una mejor comprensión de la evolución de las interacciones entre agua superficial y subterránea en el tiempo en los acuíferos binacionales aluviales y regionales permitiría un entendimiento más profundo por parte de los investigadores y mejoraría las herramientas disponibles para el manejo y administración del agua. Es posible diseñar modelos numéricos de esta área de estudio (ver la sección de modelación numérica a continuación) que incluyan la capacidad de analizar las interacciones entre agua subterránea y superficial, para el beneficio de la toma de decisiones en el manejo del recurso hídrico.

Modelación Numérica – La investigación futura beneficiaría a la creación de un modelo avanzado binacional que combine agua superficial y subterránea con uno de los códigos disponibles

(GSFLOW (Markstrom et al., 2008), MODFLOW-OWHM (Hanson et al., 2014), HydroGeoSphere (Brunner and Simmons, 2012)), lo cual es una meta científica importante para el acuífero del Río San Pedro. Al igual que Pool y Dickinson (2007), se recomienda que el modelo matemático para el acuífero del Río San Pedro abarque todo el área de estudio considerada en este estudio binacional. Los estudios de modelación recomendados requieren mayor cantidad y calidad de información de la que existe actualmente. Es importante contar con los datos y la información técnica para poder estar adecuadamente preparados al momento de realizar el esfuerzo técnico de la modelación binacional. Las recomendaciones técnicas presentadas en este capítulo pueden contribuir a la modelación pero no son prerequisites para la modelación. Es posible realizar la modelación en “modo de aprendizaje” como laboratorio virtual aún con la falta de toda la información requerida para investigar cuestiones fundamentales. Una forma muy importante en la que se pueden aplicar los modelos es para identificar sitios para medición y monitoreo que maximizarán la comprensión hidrológica y minimizar la incertidumbre. Esto puede proporcionar una reducción significativa de costos al eliminar los sitios que proporcionarían poca información para el proceso, así como preguntas que han sido identificadas como las más pertinentes o significativas para un estudio en particular.

De igual manera, los esfuerzos para realizar estudios técnicos no deben depender de la

aprobación para el modelo binacional. Representan opciones para la continuación de la cooperación binacional con el objetivo de mejorar el conocimiento de los sistemas hidrológicos en los acuíferos compartidos por Sonora y Arizona. El equipo binacional que elaboró este estudio recomienda que no se pierda el impulso

importante que se generó durante su elaboración. Este grupo técnico considera adecuado resumir y evaluar las condiciones del acuífero binacional del Río San Pedro al menos cada tres años, iniciando en el 2016, para evaluar su progreso, y definir y planear los estudios o etapas siguientes.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Aguinaga, J., G.**, 2002, Modelación Hidrológica del Acuífero del Río San Pedro: Tesis Profesional para Obtener el Título de Geólogo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Hermosillo, Sonora.
- Alley, W.M.**, ed., 2013, Five-year interim report of the United States-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program: 2007–2012: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1059, 31 p. (Available at <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1059/>.)
- Anderson, M.P.**, 2005, Heat as a Ground Water Tracer, *Ground Water*, Vol. 43, No. 6, pp. 951–968)
- Anderson, T.H., Silver, L. T.**, 1977, U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora: *Economic Geology*, v. 72; 827-836.
- Anderson, T.W., Freethy, G.W., and Tucci, P.**, 1992, Geohydrology and water resources of alluvial basins in south-central Arizona and parts of adjacent states: U.S. Geological Survey Professional Paper 1406-B, 67 p.
- Anning, D.W., and Leenhouts, J.M.**, 2010, Section 9. Conceptual Understanding and Groundwater Quality of the Basin-Fill Aquifer in the Sierra Vista Subbasin of the Upper San Pedro Basin, Arizona, in Thiros, S.A., Bexfield, L.M., Anning, D.W., and Huntington, J.M., eds., 2010, Conceptual understanding and groundwater quality of selected basin-fill aquifers in the Southwestern United States: U.S. Geological Survey Professional Paper 1781, p. 13–24.
- Araujo-Mendieta, J., Estavillo-González, C. F.**, 1987, Evolución tectónica sedimentaria del Jurásico Superior y Cretácico Inferior en el NE de Sonora, México: Instituto Mexicano del Petróleo, Revista, v. 19, num. 3, 4-36
- Arizona Department of Water Resources (ADWR)**, 2005, Upper San Pedro Basin active management area report, March 2005: Phoenix, Arizona Department of Water Resources, 146 p., appendices-M.
- Arizona Department of Water Resources**, 2009, Arizona water atlas, Volume 3, Southeastern Arizona planning area: 598p.
- Arizona Department of Water Resources**, Ground Water Site Inventory, accessed January 2013, at <http://www.gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx>
- Arizona Department of Water Resources**, Well Registry (Wells55), accessed January 2016, at <https://gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/>
- Baillie, M.N., J.F. Hogan, B. Ekwurzel, A.K. Wahi, and C.J. Eastoe**, 2007, Quantifying water sources to a semiarid riparian ecosystem, San Pedro River, Arizona using geochemical tracers, *J. Geophys. Res. – Biogeosciences*, 112(G3). west-central United States: *Society of Economical Paleontologists and Mineralogists*, 51-62.
- Blasch, K.W., Constantz, J., and Stonestrom, D.A.**, 2007, Thermal methods for investigating ground-water recharge, in Stonestrom, David A., Constantz, Jim, Ferre, Ty P.A., and Leake, A., eds., *Ground-water recharge in the arid and semiarid southwestern United States: U.S. Geological Survey Professional Paper 1703*, 1, p. 351-373.
- Bontemps, S., Defourny, P., Van Bogaert, E., Arino, O., Kalogirou, V., RamosPerez, J.**, 2011, GLOBCOVER 2009-Products Description and Validation Report. Université Catholique de Louvain and the European Space Agency, 53p. accessed January 19, 2015 at: [http://due.esrin.esa.int/globcover/LandCover2009/GLOBCOVER2009\\_Validation\\_Report\\_2.2.pdf](http://due.esrin.esa.int/globcover/LandCover2009/GLOBCOVER2009_Validation_Report_2.2.pdf)
- Boykin, K.G., A. Ernst, T. S. Schrader, and A. Nour El Sadek.**, 2008, Land Cover and Associated Datasets for the San Pedro River Basin Final Report. New Mexico Cooperative Fish and Wildlife Research Unit. Technical Assistance Final Report.

- Brown, S.G., Davidson, E.S., Kister, L.R, and Thomsen, B.W.**,1966, Water resources of Fort Huachuca Military Reservation, southeastern Arizona: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper1819–D, p. D1–D57.
- Brown and Caldwell**, 2009, Sierra Vista Water Reclamation Facility ground water modeling study: Brown and Caldwell Project#:134159, Tucson, Arizona, 68p.
- Bryan, Kirk, Smith, G. E. P., and Waring, G. A.**, 1934, Ground-water supplies and irrigation in San Pedro Valley, Arizona: D. S. Geol. Survey open-file report, 167 p.
- Bultman, M.W., Gettings, M.E., and Wynn, J.**,1999, An interpretation of the 1997 airborne electromagnetic (AEM) survey, Fort Huachuca vicinity, Cochise County, Arizona, with digital data: US Geological Survey Open-File Report 99-7-A (CD-ROM).
- Bultman, M.W. and Gray, F.**, 2011, Transient electromagnetic study of basin fill sediments in the Upper San Pedro Basin, Mexico: *Environ Earth Sci* (2011) 64:2091–2106, DOI 10.1007/s12665-011-1031-y
- Bultman, M.W., Gray, F., Fleming, J.B., Callegary, J.B., and Kleinkopf, M.D.**, 2006, Transient Electromagnetic Study of Basin Fill Sediments, Upper San Pedro Basin, Mexico: American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, December 10-14, 2007.
- Brunner, P. and Simmons, C.T.** (2012). "Hydro Geosphere: A Fully Integrated, Physically Based Hydrological Model". *Groundwater* 50 (2): 170–176. doi:10.1111/j.1745-6584.2011.00882.x
- Busby, C.T., Bassett, K., Steiner, M.B., Riggs, N.R.**, 2005, Climatic and tectonic controls on Jurassic intra-arc basins related to northward drift of North America: *Geological Society of America Special Paper* 393-13; 359-376
- Callegary, J.B., Megdal, S.B., Scott, C.A., Vandervoet, P.L.**, 2013, Arizona/Sonora Section of the Transboundary Aquifer Assessment Program *In*: Alley, W.M., ed.,2013, Five-year interim report of the United States – Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program : 2007–2012 : U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1059,31p.
- Clark I.D., Fritz P.**, 1997, Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New York.
- Coes, A.L., and Pool, D.R.**, 2005, Ephemeral-stream channel and basin-floor infiltration and recharge in the Sierra Vista subwatershed of the Upper San Pedro Basin, southeastern Arizona: U.S. Geological Survey Open-File Report 2005–1023, 67 p.
- Coes, A.I., D.J. Gellenbeck and D.C. Towne.**, 1999, Groundwater quality in the Sierra Vista sub basin, Arizona, 1996-1997: USGS Water Resources Investigations Report 99-4056, 50 p.
- Coes, A.L.**, 1997, Geochemical constraints on ground-water flow in the Sierra Vista Basin, Arizona, with special emphasis on ground-water/surface-water interaction: University of Arizona, M.S. thesis, 137 p.
- CONAFOR**, 2009, Inventario Nacional Forestal y de Suelos México 2004-2009: Accessed November 24, 2015 at: <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Inventario-Nacional-Forestal-y-de-Suelos.pdf>
- CONAGUA.**, 2010, Gerencia Regional del Noroeste. Archivos Climatológicos Históricos por Estación: [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42&Itemid=75](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)
- CONAGUA**, 2009, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2616) Río San Pedro, estado de Sonora. Editado por CONAGUA, 32p.
- CONAGUA**, 2012, Registro Público de Derechos de Agua. REPDA. <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx>
- Consultores en Agua Subterráneas. A. para Mexicana de Cananea, S.A. de C.V.**, 2000, Actualización del estudio geohidrológico de las cuencas del Río San Pedro y norte del Río Sonora en Cananea, Son: Consultant Report
- Contreras, F. M.**, 1986, Comportamiento del Acuífero del Río San Pedro, Cananea, Sonora: Tesis Profesional para Obtener el Título de Geólogo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Hermosillo, Sonora.

- Corell, S.W., Corkhill, F., Lovvik, D., and Putman, F.**, 1996, A groundwater flow model of the Sierra Vista subwatershed of the upper San Pedro Basin, southeastern Arizona: Phoenix, Arizona Department of Water Resources Modeling Report No. 10, 107 p.
- Damon, P.E., Clark, K.C., Shafiqullah, M.**, 1983, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1052-1071.
- Daughton, C.G.**, 2004, Non-regulated water contaminants: emerging research: Environmental Impact Assessment Review, 24: 711 – 732.
- Davidson, E. S., and White, N. D .**, 1963, San Pedro River valley, in Annual report on ground water in Arizona, spring 1962 to spring 1963, by N. D. White, R. S. Stulik. E. K. Morse, and others: Arizona State Land Dept. Water-Resources Rept. 15, p. 68-76.
- Dickinson, W.R.**, 1986, Provenance and sediment dispersal in relation to paleotectonics and paleogeography of sedimentary basin, in K.L. Kleinspehn and C. Paola (eds.), New perspectives in basin analysis, Springer Verlag, p. 27-42.
- Dickinson, J.E., Hanson, R.T., Ferré, T.P.A., Leake, S.A.**, 2004, Inferring time-varying recharge from inverse analysis of long-term water levels: Water Resources Research, Vol. 40, No. 7, W07403, 15p.
- Dowman, C.E., Ferré, T.P.A., Hoffmann, J.P., Rucker, D.F., and Callegary, J.B.**, 2003, Quantifying ephemeral streambed infiltration from downhole temperature measurements collected before and after streamflow: Vadose Zone Journal, v. 2, p. 595–601.
- Drever, J.I.**, 1997, The geochemistry of natural waters: surface and groundwater. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 436 p.
- Drewes, H.**, 1980, Tectonic Map of Southeast Arizona: U.S. Geological Survey MI-Map 1109, 2 plates with text.
- Dumble, E.T.**, 1902, Notes on the geology of southeastern Arizona: American Institute of Mining Engineers Transactions, v. 31, 696-715.
- Eastoe, C.J. and Dettman, D.L.**, 2014, Stable oxygen and hydrogen isotope data of individual rain events: UA collection site, Tucson, Arizona. University of Arizona Geosciences, Environmental Isotope Laboratory Data Repository, accessed August 20, 2014 at: <http://www.geo.arizona.edu/node/154>
- Emmons, S.F., 1910**, Cananea mining district of Sonora, Mexico: Economic Geology, v.5, p. 312-356.
- Epis, R. C.**, 1956, Geology of the Pedregosa Mountains, Cochise County, Arizona [Ph.D. dissertation]: Berkeley, Univ. California, 263 p
- Esparza, J. G.**, 2002, Modelación geohidrológica del acuífero del Río San Pedro. Professional thesis in geology, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, Mexico.
- Fenneman, N. M.**, 1931, Physiography of Western United States: New York, McGraw-Hill Book Co., Inc.
- Ferrari, L. Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, M.T., Petrone, Ch.M., Jacobo-Albarrán, J., López-Martinez, M.**, 2005, Geology, geochronology and tectonic setting of late Cenozoic volcanism along the southwestern Gulf of Mexico: The eastern alkaline province revisited, Journal of Volcanology and Geothermal research, 146, 284-306.
- Fisheries and Aquaculture Department of the Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 1987, Soil quality considerations in the selection of sites for aquaculture, FAO Report, 36 pp. <http://www.fao.org/docrep/field/003/AC172E/AC172E00.htm>
- Freethy, G.W.**, 1982, Hydrologic analysis of the upper San Pedro Basin from the Mexico-United States international boundary to Fairbank, Arizona: U.S. Geological Survey Open-File Report 82–752, 52 p.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A.**, 1979, Groundwater: Englewood cliffs, N.J., Prentice Hall, 604p.
- Garfin, G., Jardine, A., Merideth, R., Black, M., and LeRoy, S., eds.** 2013, Assessment of Climate Change in the Southwest United States: A Report Prepared for the National Climate Assessment: Southwest Climate Alliance. Washington, DC: Island Press.

- Gesch, D., Evans, G., Mauck, J., Hutchinson, J., Carswell Jr., W.J.**, 2009, The National Map—Elevation: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2009-3053, 4 p.
- Gettings, M. E. and B.B. Houser**, 2000, Depth to bedrock in the Upper San Pedro Valley, Cochise County, southeastern Arizona: Open-File Report 00-138, 39 p.
- Gómez, A. A., Villalba-Atondo, A., Burgos-Flores, D., Sortillón-Valenzuela, M. Kulatilake, P.H.S.W.**, 1997, Estudio preliminar de la calidad de agua en la cuenca hidrológica del Rio San Pedro, Sonora, México. Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Sonora, México.
- González-León, C.M.**, 1986, Estratigrafía del Paleozoico de la Sierra del Tule, noreste de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 6, núm. 2, p. 117–135.
- González-León, C.M., Lawton, T.F.**, 1995, Stratigraphy, depositional environments, and origin of the Cabullona basin, northeastern Sonora: Studies on the Mesozoic of Sonora and Adjacent Areas, Jacques-Ayala, C.; González-León, C.M., Roldán-Quintana, J. (Eds.) Geological Society of America Special Paper 301, 121-142.
- González-León, C.M.**, 1994, Early Cretaceous tectonosedimentary evolution on the south western margin of the Bisbee basin: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 11, 139–146.
- González-León, C.M., Scott, R.W., Loeser, H., Lawton, T.F., Robert, E., Valencia, V.A.**, 2008, Upper Aptian-Lower Albian Mural Formation: stratigraphy, biostratigraphy and depositional cycles on the Sonoran shelf, northern Mexico: Cretaceous Research, V.29, p. 249-266.
- Goode, T.C., and Maddock, T.**, 2000, Simulation of groundwater conditions in the Upper San Pedro Basin for the evaluation of alternative futures: Tucson, University of Arizona, Hydrology and Water Resources Report no. 00-030, 113 p.
- Graeme, J.**, The Queen of the Copper Camps: Bisbee History: City of Bisbee, accessed September 19, 2014 at: [http://www.cityofbisbee.com/bisb\\_history.html](http://www.cityofbisbee.com/bisb_history.html)
- Gray, F., Page, W.R., Kleinkopf, M.D., Pool, D.R., Callegary, J., Wynn, J.C., Maldonado, F., Miller, R.J.**, 2005, Geological and geophysical studies of the headwaters of the San Pedro River in northern Sonora, Mexico: Geological Society of America, Annual Meeting, October 16-19, Salt Lake City, vol.35, no.4, p. 60.
- Gray, F., Page, W.R., Wynn, J.C., Callegary, J.B., Maldonado, F., Poole, D.R., Miller R.J., Villaseñor, F., and Norman, L.M.**, 2004, Integration of Multispectral Imagery with Aeromagnetic and Geologic Map Data to Understand the Tectonic Framework of the San Pedro River Headwaters, Sonora, Mexico: VI Seminario Minero Internacional, Sonora, October 19–23, 2004, Hermosillo, Sonora, Libro de Resúmenes, p.20-21.
- Gungle, B., Callegary, J.B., Kennedy, J., Paretti, N.V., Turner, D.**, *In review*, Efforts to achieve sustainable yield of groundwater in the Sierra Vista Subwatershed: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report XXXX, pp.
- Han, W., Yang, Z., Di, L., Mueller, R.**, 2012, CropScape: a webservice based application for exploring and disseminating US conterminous geospatial cropland data products for decision support: Comput.Electron.Agric., 84 (2012), pp.111–123, doi: 10.1016/j.compag.2012.03.005.
- Hanson, R.T., Dettinger, M.D., and Newhouse, M.W.**, 2006, Relations between climate variability and hydrologic time series from four alluvial basins across the southwestern United States: Hydrogeology Journal, Vol.14, No. 7, pp. 1122-1146
- Hanson, R.T., Boyce, S.E., Schmid, W., Hughes, J.D., Mehl, S.M., Leake, S.A., Maddock, T., III, and Niswonger, R.G.**, 2014, MODFLOW-One-Water Hydrologic Flow Model (OWHM): U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A51, 122p. (<http://pubs.usgs.gov/tm/tm6a51/>)
- Haxel, G., Wright, J.E., May, D.J., Tosdal, R.M.**, 1980, Reconnaissance geology of the Mesozoic and lower Cenozoic rocks of the southern Papago Indian Reservation, Arizona: a preliminary report. Studies in Western Arizona, Jenney, J.P., Stone, C. (Eds.): Arizona Geological Society Digest 12, 17-29.

- Hem, J.D.**, 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water, 3rd ed. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, vol. 2254. Washington, DC.
- Hendricks, D.M., Krausman, P.R., Mannan, R.W., Hole, F.D., Peirce, H.W., Levine, S.J., Post, D.F., Guernsey, S.W., Havens, Y.H., Jay, J.E., Richardson, M.L.**, 1985, Arizona Soils, The University of Arizona, Tucson, AZ, 244 pp., accessed April 8, 2014 at: <http://southwest.library.arizona.edu/azso/index.html>
- Henry, C.D., Aranda-Gómez, J.J.**, 2000, Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range: Tectonophysics, 318, 1-26.
- Heindl, L.A.**, 1952, Upper San Pedro basin, Cochise County *in* L.C. Halpenny and others, Ground water in the Gila River basin and adjacent areas, Arizona-a summary, U.S. Geol. Survey open-file report, p. 69-86.
- Hereford, R.**, 1993, Entrenchment and widening of the upper San Pedro River, Arizona: Geological Society of America Special Paper 282, 46p.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A.**, 2005, Very high resolution interpolated climate surface for global land areas: *Int.J.Climatol.*25:1965–1978, DOI: 10.1002/joc.1276.
- Hollyday, E. F.**, 1963, A geohydrologic analysis of mine dewatering and water development, Tombstone, Cochise County, Arizona: Arizona Univ., unpublished master's thesis, 90 p.
- Homer, C.H., Fry, J.A., and Barnes C.A.**, 2012, The National Land Cover Database: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2012-3020, 4 p.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal**, 2014, Cananea, Estado de Sonora: Enciclopedia del Municipios y Delegaciones de Mexico: accessed September 19, 2014 at: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM26sonora/municipios/26019a.html>
- IBWC-CILA**, 2009, Joint Report of the Principal Engineers Regarding the Joint Cooperative Process United States - Mexico for the Transboundary Aquifer Assessment Program: 11p., August 19, 2009.
- Kennedy, J.R., and Gungl, B.**, 2010, Quantity and Sources of Base Flow in the San Pedro River near Tombstone, Arizona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5200, 43p.
- Kolpin, D.W., Furlong, E.T., Meyer, M.T., Thurman, E.M. Zaugg, S.D., Barber, L.B., and Buxton, H.T.**, 2002, Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams,1999-2000: A national reconnaissance: *Environmental Science & Technology*, v. 36, no.6, p.1202-1211.
- Konieczki, A.D.**, 1980, Maps showing ground-water conditions in the upper San Pedro Basin area, Pima, Santa Cruz, and Cochise counties, Arizona; 1978: USGS Open-File Report: 80-1192
- King, R.E.**, 1939, Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico: *Geol. Soc.Am. Bull*, 50, p. 1625-1722
- Lacher, L.J.**, 2012, Simulated near-stream recharge at three sites in the Sierra Vista subbasin, Arizona: Tucson, Lacher Hydrologic Consulting, Task 2-4 Report, 62 p.
- Lacher, L.J.**, 2011, Simulated groundwater and surface water conditions in the Upper San Pedro Basin 1902-2105: Preliminary baseline results: Lacher Hydrologic Consulting, Task 1 Report, 71 p.
- Leake, S. A., Pool, D. R., Leenhouts, J. M.**, 2008, Simulated effects of ground-water withdrawals and artificial recharge on discharge to streams, springs, and riparian vegetation in the Sierra Vista subwatershed of the upper San Pedro Basin, southeastern Arizona: U. S. Geological Survey Survey Scientific Investigations Report 2008-5207, 14 p.
- Leake, S.A., and Gungl, Bruce**, 2012, Evaluation of simulations to understand effects of groundwater development and artificial recharge on the surface water and riparian

- vegetation Sierra Vista subwatershed, Upper San Pedro Basin, Arizona: U.S. Geological Survey Open-File Report 2012–1206, 11 p.
- Lee, W. T.**, 1905, Notes on the underground water of the San Pedro Valley, Arizona. in Third annual report of the Reclamation Service, 1903-04: -U. S. 58th Cong., 3d sess., H. Doc. 28, 2d ed., p. 165-170.
- Leenhouts, J. M., Stromberg, J.C., and Scott, R.L., eds.**, 2006, Hydrologic requirements of and consumptive ground-water use by riparian vegetation along the San Pedro River, Arizona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005–5163, 154 p.
- Lincicome, A.D.**, 2011, DRASTIC groundwater vulnerability assessment of the Santa Cruz and San Pedro aquifers: The University of Arizona, Soil, Water, and Environmental Sciences, Master's Thesis.
- Lincicome-Noriega, A.D., Callegary, J.B., and Brusseau, M.L.**, 2011, Analysis of Pollution Potential of the Upper San Pedro and Upper Santa Cruz Aquifers: The University of Arizona Institute of the Environment-Environmental Research Grad Blitz.
- Lucas, S.G., Kues, B. S., y González-León, C. M.**, 1995, Paleontology of the Upper Cretaceous Cabullona Group, northeastern Sonora: Geological Society of America Special Paper,301, 143-165.
- Markstrom, S.L., Niswonger, R.G., Regan, R.S., Prudic, D.E., and Barlow, P.M.**, 2008, GSFLOW-Coupled Ground-water and Surface-water FLOW model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular Ground-Water Flow Model (MODFLOW-2005): U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-D1, 240 p.
- Mazor, E.**,1997, Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, The applied Approach, second edition: Revised and expanded Marcel Dekker, Inc, Halsted Press a Division of John Wiley and Sons, U.S.A. p. 413.
- McGuire, C.E.**, 1997, Soil survey of San Pedro Valley, Arizona, Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 22 maps, 343 p.
- Minjárez, J.I., Monreal, R., Rangel, M., Grijalva, F., Ochoa, J, A, Tapia, E.**, 2011, Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Río San Pedro en el Estado de Sonora, Primera Etapa. Informe para CILA.
- National Oceanic and Atmospheric Administration**, 2013, Global Historical Climatology Network (GHCN): <http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/land-based-station-data/land-based-datasets/global-historical-climatology-network-ghcn>
- Norman, L.M., Callegary, J.B., Gray, F., Van Riper, C.**, 2010, The Border Environmental Health Initiative—Investigating the Transboundary Santa Cruz Watershed: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2010-3097
- Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center**, DAYMET: Daily surface weather and climatological summaries, Accessed February 2015.
- Page, W.R., Gray, F., Iriondo, A., Miggins, D., Blodgett, R.B., Maldonado, F., and Miller, R.J.**, 2010, Stratigraphy and Mesozoic – Cenozoic tectonic history of the Northern Sierra Los Ajos and Adjacent areas, Sonora, Mexico: Journal of South American Earth Sciences, v.29, p557-571
- Peel M.C., Finlayson B.L. and T.A. McMahon**, 2007, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1633-1644, 2007.
- Pool, D.R.**, 2008, The utility of gravity and water-level monitoring at alluvial aquifer wells in southern Arizona: Geophysics 73: WA49-WA59, 10.1190/1.2980395
- Pool, D.R.**, 2005, Variations in climate and natural recharge in southeast Arizona: Water Resources, 41, W11403, doi: 10.1029/2004WR003255, 24 p.
- Pool, D., Gray, F., Callegary, J. B.**, 2005, Geology and geophysical surveys to infer the structure of the upper San Pedro River basin, Sonora, Mexico for use in a ground-water-flow model: Eos. Trans. AGU, 86(18), Jt. Assem. Suppl., Abstract H21C-04.

- Pool, D.R., and Coes, A.L.**, 1999, Hydrogeologic investigations of the Sierra Vista subwatershed of the Upper San Pedro Basin, Cochise County, southeast Arizona. USGS Water-Resources Investigations Report 99-4197, 41 p.
- Pool, D.R., Dickinson, J.E.**, 2007, Ground-waterflow model of the Sierra Vista Subwatershed and Sonoran portions of the upper San Pedro Basin, southeastern Arizona, United States, and northern Sonora, Mexico: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5228, 48p.
- PRISM Climate Group**, Climate Data: Oregon State University, <http://prism.oregonstate.edu>, accessed February 2013.
- Putnam, F., Mitchell, K., and Bushner, G.**, 1988, Water Resources of the Upper San Pedro Basin, Arizona: Arizona Department of Water Resources Hydrology Division, 158 p.
- Rangel, M., Grijalva, F., Sosa, O., Ochoa, J.A., Minjárez, J.I., Monreal, R.** 2005, Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo piezométrico del Estado de Sonora. Reporte final de Convenio, para CONAGUA.
- Ransome, F.L.**, 1904, Geology and mineral deposits of the Bisbee Quadrangle; Arizona: U.S. Geological Survey Professional Paper 21, 167.
- Riggs, N.R., Haxel, G.B.**, 1990, The Early to Middle Jurassic magmatic arc in southern Arizona: Plutons to sand dunes, Geologic Excursions Through the Sonoran Desert Region, Arizona and Sonora, Gehrels, G.E., Spencer, J.E. (Eds.): Arizona Geological Survey Special Paper 7, 90-103.
- Roeske, R.H., and Werrell, W.L.**, 1973, Hydrologic Conditions of the San Pedro River Valley, Arizona, 1971. Arizona Water Commission, Bulletin 4, 82 p.
- Rounds, S.A.**, 2006, Alkalinity and acid neutralizing capacity, in Techniques of Water-Resources Investigations (3<sup>rd</sup>ed.):U.S. Geological Survey, Book 9, Chapter A6, Section 6.6.
- Rueda-Gaxiola, J.**, 2004, A triple junction in the Gulf of México: Implications for deep petroleum exploration: Geofísica Internacional, Julio-septiembre, año/vol. 43/003; Universidad Nacional Autónoma de México; 395-414.
- Schmerge, D., Corkhill, F., and Flora, S.**, 2009, Water-level conditions in the Upper San Pedro Basin, Arizona, 2006: Arizona Department of Water Resources, A.D.W.R. water level change map series report no. 3, 3 p.
- Schmugge, T.J., Kustas, W.P., Ritchie, J.C., Jackson, T.J., Rango A.**, 2002, Remote sensing in hydrology: Advances in Water Resources 25.8: 1367-1385.
- Scott, Christopher and S.B.Megdal**, 2011, The Challenge of Binational Decision-Making in Arizona-Sonora Transboundary Watersheds, UCOWR/NIWR Annual Conference Planning for Tomorrow's Water: Snowpack, Aquifers, and Reservoirs, Boulder, CO.
- Scott, R.L., Huxman, T., Barron Gafford, B., Jenerette, G., Young, J., Hamerlynck, E.P.**, 2014. When vegetation change alters ecosystem water availability. *Global Change Biology*. 20:2198-2210.
- Scott, R.L., Cable, W.L., Huxman, T.E., Nagler, P.L., Hernandez, M., Goodrich, D.C.**, 2008. Multiyear riparian evapotranspiration and groundwater use for a semiarid watershed. *Journal of Arid Environments* 72, 1232e1246.
- Scott, R.L., Williams, D.G., Goodrich, D.C., Cable, W.L., Levick, L.R., McGuire, R., Gazal, R.M., Yopez, E.A., Ellsworth, P., and Huxman, T.E.**, 2006, Determining the riparian ground-water use within the San Pedro Riparian National Conservation Area and the Sierra Vista Subwatershed, Arizona, chap D of Leenhouts, J. M., Stromberg, J.C., and Scott, R.L., eds., Hydrologic requirements of and consumptive ground-water use by riparian vegetation along the San Pedro River, Arizona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5163, 154 p.
- Secretaría de Salud de México**, 2014, Norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y

- tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización". Accessed August 19, 2014 at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
- Serrat-Capdevila, A., Valdés, J.B., Pérez, J.G., Baird, K., Mata, L.J., Maddock III, T.,** 2007, Modeling climate change impacts – and uncertainty – on the hydrology of a riparian system: The San Pedro Basin (Arizona/Sonora): *Journal of Hydrology* 347, 48-66.
- Smith, C.** 1983, Thermal hydrology and heat flow of Beowawe geothermal area, Nevada: *Geophysics*, 48, 618–626, DOI:10.1190/1.1441492
- Somarathne, N., and Frizenschaf, J.,** 2013, Geological Control upon Groundwater Flow and Major Ion Chemistry with Influence on Basin Management in a Coastal Aquifer, South Australia. *Journal of Water Resource and Protection*, 2013, 5, 1170-1177: <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.512124>
- Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation Service,** United States Department of Agriculture. Web Soil Survey. Available online at <http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/>. Accessed December 10, 2014.
- Steiger, R.H., Jäger, E.,** 1977, Subcommittee on Geochronology: Convention on the use of decay constants in Geo and Cosmochronology: *Earth and Planetary Sciences Letters*, 36 (3), 359-362.
- Stewart, A.M., J. B. Callegary, C.F. Smith, H.V. Gupta, J.M. Leenhouts, R.A. Fritzinger.** 2012. Use of the continuous slope-area method to estimate runoff in a network of ephemeral channels, southeast Arizona, USA, *Journal of Hydrology Vols. 472-473*, pp 148-158, Nov. 2012.
- Stewart, A.M.,** 2014, Estimation of urban-enhanced infiltration and groundwater recharge, Sierra Vista Subbasin, southeast Arizona USA: The University of Arizona, Hydrology and Water Resources, Dissertation.
- Stone, J.J., Nichols, M.H., Goodrich, D.C., Buono, J.,** 2008, Long-term runoff database, Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, United States: Water Resources Research, DOI: 10.1029/2006WR005733
- Strahler, A.N.,** 1957, Quantitative analysis of watershed geomorphology: *Tans.Am.Geophys. Union*, Vol.38, p.931.920.
- Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas,** 2010, SAHRA: Final Report. The University of Arizona, Hydrology and Water Resources, 214 p., accessed August 25, 2014 at: [http://web.sahra.arizona.edu/publications/documents/SAHRA\\_FinalReport.pdf](http://web.sahra.arizona.edu/publications/documents/SAHRA_FinalReport.pdf)
- Taliaferro, N.L.,** 1933, An Occurrence of Upper Cretaceous Sediments in Northern Sonora Mexico: *Jour Geol.* Vol. 41 No. 91, 12-37.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. y Keys, D.A.,** 1984, *Applied Geophysics*: Cambridge University Press: 860 pp.
- Terrell, C.R., and Perfetti, P.B.,** 1989, *Water Quality Indicators Guide: Surface Waters*. USDA SCS, 129 p.
- Thomas, B.E., Pool, D.R.,** 2006, Trends in Streamflow of the San Pedro River, Southeastern Arizona, and Regional Trends in Precipitation and Streamflow in Southeastern Arizona and Southwestern New Mexico: U.S. Geological Survey Professional Paper 1712, 79 p.
- Tillman, F.D., Callegary, J.B., Nagler P.L., and E.P.Glenn,** 2012, A simple method for estimating basin-scale groundwater discharge by vegetation. *Journal of Arid Environments*, 82: 44-52.
- Tillman, F.D, Cordova, J.T., Leake, S.A., Thomas, B.E., and Callegary, J.B.,** 2011, Water availability and use pilot: methods development for a regional assessment of groundwater availability, southwest alluvial basins, Arizona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5071, 118 p.
- Uliana, M.M., and Sharp, J.M.,** 2001, Tracing regional flow paths to major springs in Trans-Pecos Texas using geochemical data and geochemical models. *Chemical Geology*, 179: 53-72.
- UNESCO,** 2007, *Sistemas Acuíferos Transfronterizos en las Américas – Evaluación Preliminar*, 2007. Serie ISARM Américas Libro no 1; 178 pp.

- UNESCO**, 2008, Marco Legal e Institucional en la Gestión de los Sistemas Acuíferos Transfronterizos de las Américas. Serie ISARM Américas Libro no 2; 111 pp.
- UNESCO**, 2010, Aspectos Socioeconómicos, Ambientales, y Climáticos de los sistemas Acuíferos Transfronterizos de las Américas. Serie ISARM Américas Libro no 3; 544 pp.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)**, 2014, Drinking Water Contaminants: National Secondary Drinking Water Contaminants. Accessed August 18, 2014 at: <http://water.epa.gov/drink/contaminants/index.cfm#Secondary>
- U.S. Geological Survey**, National Water Information System, Accessed 2013 (various dates) at: <http://nwis.waterdata.usgs.gov/usa/nwis/>
- U.S. Geological Survey**, 2004 Southwest Regional Gap Analysis Project, 2004, SWREGAP Land Cover Legend, Accessed January 25, 2015 at: <http://swregap.nmsu.edu/AssociatedProducts.htm>
- U.S. Geological Survey (USGS)**, variously dated, National field manual for the collection of water-quality data: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chaps. A1-A9, accessed February 18, 2014 at <http://pubs.er.usgs.gov/publication/twri09>.
- U.S. Natural Resource Conservation Service (NRCS)**, 2014, Conservation Practice Standard: Salinity and Sodic Soil Management (Ac.) CODE 610. Accessed August 18, 2014 at: <http://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/NM/610std.pdf>
- Upper San Pedro Partnership**, 2012, Water management of the regional aquifer in the Sierra Vista Subwatershed, Arizona—2010 report to Congress: Washington, D.C., U.S. Department of Interior.
- Upper San Pedro Partnership**, 2010, Water management of the regional aquifer in the Sierra Vista Subwatershed, Arizona—2009 report to Congress: Washington, D.C., U.S. Department of Interior.
- Upper San Pedro Partnership**, 2009, Water management of the regional aquifer in the Sierra Vista Subwatershed, Arizona—2009 report to Congress: Washington, D.C., U.S. Department of Interior.
- Upper San Pedro Partnership**, 2007, Water management of the regional aquifer in the Sierra Vista Subwatershed, Arizona—2009 report to Congress: Washington, D.C., U.S. Department of Interior.
- Upper San Pedro Partnership**, 2006, Water management of the regional aquifer in the Sierra Vista Subwatershed, Arizona—2009 report to Congress: Washington, D.C., U.S. Department of Interior.
- Upper San Pedro Partnership**, 2005, Water management of the regional aquifer in the Sierra Vista Subwatershed, Arizona—2009 report to Congress: Washington, D.C., U.S. Department of Interior.
- Upper San Pedro Partnership**, 2004, Water management of the regional aquifer in the Sierra Vista Subwatershed, Arizona—2009 report to Congress: Washington, D.C., U.S. Department of Interior.
- Valentine, W.G.**, 1936, Geology of the Cananea Mountains, Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 47, 53-86.
- Vander Meer, F.D., Vander Werff, H. M., van Ruitenbeek, F.J., Hecker, C.A., Bakker, W.H., Noomen, M.F., van der Meidje, M., Carranza, E.J.M., Woldai, T.**, 2012, Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 14(1), 112-128.
- Vandervoet, P.**, 2009, TAA Pingthesources: Santa Cruz database creation for the Transboundary Aquifer Assessment Program: Santa Cruz River Researchers' Day, Tucson, Ariz.
- Vionnet, L.B., and Maddock, Thomas, III**, 1992, Modeling of groundwater flow and surface water/groundwater interactions in the San Pedro River Basin—Part I—Cananea, Mexico to

- Fairbank, Arizona: University of Arizona, Department of Hydrology and Water Resources, HWR No. 92-010, 96 p.
- Wahi, A.K.** 2005. Quantifying mountain system recharge in the Upper San Pedro Basin, Arizona, using geochemical tracers. M.S. thesis, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Wahi, A.K., J.F. Hogan, B. Ekwurzel, M.N. Baillie and C.J. Eastoe,** 2008, Geochemical quantification of semiarid mountain recharge: *GroundWater*, vol.46, pp.414-425, 2008.
- Weiner, E.R.,** 2012, Applications of Environmental Aquatic Chemistry: A Practical Guide, 3<sup>rd</sup> Ed., CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 583.
- Wilson, J.L., and Guan, H.,** 2004, Mountain-Block Hydrology and Mountain-Front Recharge *in* Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States, edited by J.F. Hogan, F.M. Phillips, and B.R. Scanlon, Water Science and Applications Series, vol.9, American Geophysical Union, Washington, D.C., 159-184.
- Wodzicki, W.A.,** 1995, The evolution of Laramide Igneous rocks an Porphyry Copper mineralization in the Cananea District, Sonora, Mexico: Arizona, U.S.A: The University of Arizona in Tucson, Doctoral Thesis,181.
- Wodzicki, W.A.,** 2001, The evolution of magmatism and mineralization in the Cananea district, Sonora, Mexico *in* Albinson, T, Nelson, C.E. (eds.), New Mines and Discoveries in Mexico and Central America: Boulder, Society of Economic Geologists, Special Publication, 8,243-263.
- Wynn, Jeff,** 2006, Mapping Ground Water in Three Dimensions- An Analysis of Airborne Geophysical Surveys of the Upper San Pedro River Basin, Cochise County, Southeastern Arizona: USGS Professional Paper1674,46p.
- Wynn, J.C., Gray, F., Nordstrom, T.E., Liu,D., Reed, E.V., Villasenor, F.A., Connard, G.,** 2003, Using analytic signal analysis on aeromagnetic data to constrain AMT inversions, Sonora San Pedro Basin, Mexico: U. S. Geological Survey, Vancouver, WA, United States; Zonge Engineering, United States; SEMARNAT, Mexico; NGA, United States.
- Wynn, J.C., Mars, J.L., Gray,F., Schultz, A.P., Maldonado, F.A., Villaseñor, F.A., Brady-Norman, L. M.,** 2003, ASTER imagery and aeromagnetic data; powerful tools to aid reconnaissance geologic mapping of the Sierra San Jose Mountain Range, northern Sonora State, Mexico: U. S. Geological Survey, Vancouver, WA, United States; SEMARNAT, Mexico.

## Mapas Temáticos e Información Cartográfica

- Servicio Geológico Mexicano (2004); Carta Geológico-Minera Nogales, H12-02, escala 1:250,000**
- Servicio Geológico Mexicano (2004); Carta Geológico-Minera Agua Prieta H12-03, escala 1:250,000**
- Servicio Geológico Mexicano (2004); Carta Geológico-Minera Cananea H12-05, escala 1:250,000**
- INEGI (2000); Carta Topográfica La Noria, H12-B32, escala 1:50,000.**
- INEGI (2000); Carta Topográfica Los Corrales, H12-B33, escala 1:50,000.**
- INEGI (2000); Carta Topográfica Naco, H12-B34, escala 1:50,000.**
- INEGI (2000); Carta Topográfica Santa Cruz, H12-B42, escala 1:50,000.**
- INEGI (2000); Carta Topográfica José María Morelos y Pavón, H12-B43, escala 1:50,000.**
- INEGI (2000); Carta Topográfica Cuauhtémoc, H12-B44, escala 1:50,000.**
- INEGI (2000); Carta Topográfica 16 de Septiembre, H12-B52, escala 1:50,000.**

**INEGI (2000); Carta Topográfica Cananea, H12-B53, escala 1:50,000.**

**INEGI (1980); Carta Climas, escala 1:1, 000,000.**

**INEGI (2005); Carta Fisiográfica, escala 1:1,000,000.**

**USGS National Elevation Data: [www.ned.usgs.gov](http://www.ned.usgs.gov)**

**WoldClim Climatic Information Database: [www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)**

**Well Locations Arizona Department of Water Resources:**

**[www.gisweb.azwater.gov/waterresoucedata/GWSI.aspx](http://www.gisweb.azwater.gov/waterresoucedata/GWSI.aspx)**

**Geochemical ParametersADWR-GWSI: [ww.gisweb.azwater.gov/waterresoucedata/GWSI.asp](http://ww.gisweb.azwater.gov/waterresoucedata/GWSI.asp)**

## 11. APÉNDICES

### 11.1 Estaciones de Aforo

Número sitio	Nombre	Dato inicio	Dato final	Latitud decimal	Longitud decimal	Datum horizontal	Altitud (m)	Datum altitud
9470500	Palominas	5/31/1930	NA	31.38010095	-110.1111882	NAD27	1276	NGVD29
9470520	Greenbush Draw	6/1/2000	9/30/2004	31.38027778	-110.0716667	NAD83	1305	NAVD88
9470700	Banning Creek	2/9/2001	NA	31.50347220	-110.0052778	NAD83	1453	NAVD88
9470750	Ramsey Canyon	5/1/2000	NA	31.44666667	-110.3058333	NAD83	1684	NAVD88
9470800	Garden Canyon	10/1/1959	NA	31.47287518	-110.3478588	NAD27	1646	NAVD88
9471000	Charleston	3/29/1904	NA	31.62592644	-110.1745226	NAD27	1205	NGVD29
9471040	Charleston-Mesquite	10/1/2001	6/3/2002	31.66583333	-110.1786111	NAD83	1186	NGVD29
9471070	Boquillas	11/21/2001	6/3/2002	31.69027778	-110.1847222	NAD83	1210	NGVD29
9471300	Huachuca Canyon	10/1/1961	9/30/1964	31.51120705	-110.3923037	NAD27		
9471310	Huachuca Canyon	5/12/2000	NA	31.51805556	-110.3872222	NAD83	1707	NAVD88
9471380	Upper Babocomari	7/9/2000	NA	31.63500000	-110.4247222	NAD83	1676	NAVD88
9471400	Lower Babocomari	3/18/2000	NA	31.70027778	-110.2263889	NAD83	1213	NAVD88
9471500	Fairbank	10/1/1926	9/30/1928	31.72508990	-110.1922996	NAD27		
9471550	Tombstone	4/18/1967	NA	31.75092240	-110.2011882	NAD27	1152	NGVD29

Tabla 11. 1 Estaciones de aforo en la CBSP. Los datos han sido derivados del USGS National Water Information System.

(<http://waterdata.usgs.gov/az/nwis/>). NA indica que los datos no están disponibles al tiempo de publicación.

### 11.2 Suelos

La clasificación de suelos en la USPSS está basada en las propiedades físicas y químicas de los horizontes de suelo del área. Una descripción de las unidades del suelo y sus subtipos son dadas abajo:

**Cambisol (Bc+Re/1/G):** Este subtipo de suelo es un Cambisol crómico que se desarrolla con un subtipo de Regosol éutrico, de clase textural gruesa y de composición gravosa. Estas son unas unidades con una subsuperficie que a simple vista es muy diferente en color y textura sobre la capa superficial; puede ser oscura y de más de 25 cm de espesor, con ocasionalmente un pobre contenido de nutrientes. La subclasificación crómica indica que cuando es húmedo toma un color café oscuro a rojizo. El Regosol éutrico es formado a través de la degradación física y química de materiales parentales; su origen es el resultado del intemperismo y erosión de rocas topográficamente más elevadas. Es muy rica en nutrientes (Ca, Mg, K y Na). Contiene un alto porcentaje de arenas en los 30 cm superiores y es un suelo con alto contenido de grava en los primeros 100 cm de profundidad, mide desde 0.2 hasta 7.5 en sus ejes mayores.

**Feozem (Hh+Re/2/G):** Este es un tipo de suelo Feozem háplico y subtipo Regosol éutrico, de clase textural media y fase física gravosa, lo cual significa que tiene una capa superficial rica en materia orgánica y nutrientes o bases de Ca, Mag, K y Na. En cuanto al Regosol éutrico parece que esta porción está formada de la erosión de rocas ígneas ácidas y básicas, así como algunos conglomerados y pizarras arenosas, incluyendo algunos restos coluviales. Es un suelo rico en nutrientes que localmente presenta horizontes de carbonato de calcio; es muy similar al material parental, excepto que posee una capa superficial café amarillento a café rojiza, que pertenece al horizonte A ócrico y su falta de estructura. Es usualmente muy pobre en materia orgánica, conteniendo abundante arena, y es caracterizada por un porcentaje de sodio intercambiable mayor al 15%. Sus rangos texturales van de arenas a areno-limosa y alto contenido de arcilla.

**Litosol (I+Re+Rc/1):** Este tipo de suelo aparece como Litosol crómico con subtipos de Regosol éutrico y calcárico de clase textural gruesa, que indica un espesor menor a los 10 cm. En cuanto al Regosol éutrico, parece que esta porción está formada de la erosión de rocas ígneas ácidas y básicas, así como de algunos conglomerados y pizarras arenosas, incluyendo restos aluviales, coluviales y eólicos. Es un suelo rico en nutrientes y locamente presenta horizontes de carbonato de calcio; es muy similar al material parental, excepto que posee una capa superficial de color café amarillenta a café rojiza, que pertenece al horizonte A ócrico y su poca estructura. Es usualmente muy pobre en materia orgánica, contiene abundante arena y está caracterizado por un porcentaje de sodio intercambiable mayor al 15 %. Sus rangos texturales van de arenas a areno-limosa y alto contenido de arcilla. El subtipo Regosol calcárico indica que está débilmente desarrollado; además, tiene un alto contenido de arena, de una apariencia gravosa y su textura tiende a ser areno-limosa en superficie hasta arcillo-limoso en los horizontes subsuperficiales, compuesto de un balance de arcillas, limos y arenas.

**Luvisol (Lc+Re/2/L):** Este tipo de suelo está identificado como Luvisol crómico y se presenta con un subtipo de Regosol éutrico, de clase textural media y fase física lítica. Este suelo es generalmente fértil, con una alta acumulación de arcilla en la subsuperficie; posee un color café oscuro a rojizo cuando está húmedo. Contiene un horizonte argílico, es ligeramente ácido, bajo en materia orgánica y potencialmente rico en

minerales. El Regosol éútrico fue formado por el intemperismo de roca ácidas, básicas, conglomerados y pizarras arenosas; su origen puede ser aluvial, coluvial y aún eólico; posee un balance de arcillas, limos y arenas en los 30 cm superiores, con rocas duras a profundidades menores a los 50 cm.

**Planosol ( $We+XI+Xh/2/n$ ):** El tipo de suelo Planosol éútrico se encuentra en el área de estudio con dos subtipos de Xerosol, lúvio y háptico; presente una clase textural media y una fase química sódica. Este suelo generalmente se desarrolla en áreas de bajo relieve que pueden llegar a inundarse en alguna época del año; es bastante profundo en la mayoría de los casos, entre 50 y 100 cm, se encuentre principalmente en climas templados y semi-áridos. Su vegetación natural es de tipo pradera. Se caracteriza por tener, por debajo de la capa superior, una capa relativamente delgada, estéril de material limpio que contiene generalmente menos arcilla que las capas por encima y por debajo de ella; por debajo de esta capa existe una subsuperficie muy arcillosa o roca muy impermeable. Proporciona rendimientos moderados y es usado para ganado bovino, ovino, caprino y ganadería en general; es altamente susceptible a la erosión, especialmente en las capas superficiales y generalmente se encuentra en las depresiones topográficas. Tiene una subsuperficie arcillosa que decrece el drenaje considerablemente y es muy rico en nutrientes. Los subtipos indican que, debido a una considerable acumulación de arcilla en la subsuperficie, puede presentar restos de caliza o yeso a profundidades más grandes. Usualmente contiene un balance de arenas, limos y arcillas en los 30 cm superiores y su alta acumulación de sodio reduce la fertilidad.

**Regosol ( $Re+Rc/1/n$ ):** El Regosol éútrico desarrolló un subtipo calcárico de clase textural gruesa y fase química sódica. Esto significa que puede formarse de la erosión de rocas ígneas ácidas y básicas, así como de conglomerados y pizarras arenosas, incluyendo restos aluviales, coluviales y eólicos. Es un suelo rico en nutrientes que localmente desarrollan horizontes de carbonato cálcico; es muy similar al material parental, respecto a su capa superficial café amarillenta o café rojiza, la cual pertenece al horizonte A ócrico y su falta de estructura. Es usualmente muy pobre en materia orgánica, contiene abundante arena y está caracterizado por un porcentaje de sodio intercambiable mayor al 15 %. Sus rangos texturales varían desde arenas hasta arenas limosas.

**Vertisol ( $Vc/3G$ ):** Los Vertisoles son suelos mezclados con arcillas pesadas con una alta proporción de arcillas expansivas; están caracterizados a profundidad con amplias grietas que se desarrollan durante la época seca; son muy arcillosos y pegajosos cuando están mojados, duros cuando están secos. Además, tiene una baja susceptibilidad a la erosión. Su clasificación crómica y fase física indica la presencia de arcillas pesadas con colores oscuros dentro de la capa en los primeros 50 centímetros bajo la superficie; en temporada seca, cuando no existe irrigación, los vertisoles son visibles por sus fracturas que se extienden a profundidades menores de 50 centímetros.

**Xerosol ( $Xk+Rc/2/G$ ):** Este es un tipo de suelo Xerosol cálcico con un subtipo de Regosol calcárico, clase textural media y fase física gravosa. El Xerosol es característico de regiones áridas y tiene una capa

superficial llamada horizonte a ócrico; claro en color, y el porcentaje de materia orgánica es muy bajo, en este suelo los procesos de acumulación de arcilla ocurren en la capa sub-superficial dando origen al horizonte B. En otros casos estas acumulaciones son de carbonato de calcio, el subtipo Regosol calcáreo está débilmente desarrollado; además tiene un alto contenido de áreas, apariencia gravosa y la textura tiende a ser arenolimoso en la superficie a arcillo arenosa en los horizontes sub-superficiales, con un balance de arcillas, limos y arenas.

**Asociación MH1 Casto-Martínez-Canelo:** Esta asociación consiste de suelos profundos con una textura muy fina y suelos profundos gravosos con una textura fina y moderadamente fina, próximos a nivel de superficie se presentan en abanicos disectados. Estos suelos se originan a partir de antiguos aluviones derivados de rocas sedimentarias e ígneas. El rango de las pendientes varía desde 2% sobre las mesetas hasta 40% sobre las colinas y mesetas, tienen un relieve vertical entre 8 - 60 metros. La precipitación media anual oscila entre 410 y 510 mm, y la temperatura media anual del suelo varía entre 12 a 15°C.

**Asociación MH2 Lithic Haplustolls-Lithic Argiustolls-Rock Outcrop:** Esta asociación consiste en suelos oscuros, someros y muy someros, gravosos y peñascos, con textura moderadamente gruesa a fina, se encuentra en acumulaciones superficiales suavizadas a escarpadas sobre cerros y montañas. Estos suelos residuales y coluviales se formaron de colinas y montañas ígneas y sedimentarias. El rango de las pendientes va desde el 5 al 60%. La precipitación media anual presenta un rango entre los 410 a 630 mm y la temperatura media anual del suelo varía entre los 8 y 15 °C.

**Asociación TS2 Torrifluvents:** Esta asociación consiste de suelos que tienen texturas entre moderadamente gruesa y fina, cercano al nivel de superficie a ligeramente inclinado sobre las planicies de inundación y los abanicos aluviales. Estos suelos formados por la mezcla de aluviones recientes del Río San Pedro y sus tributarios. Los rangos de pendientes van desde los 0 a 3%. Los rangos de precipitación media anual se encuentran entre los 230 y 300 mm, y la temperatura media anual del suelo varía entre 16 y 22 °C.

**Asociación TS3 Tubac-Sonoita-Grabe:** Esta asociación consiste de suelos bien drenados que presentan texturas entre moderadamente gruesas a finas, sobre superficies próximas al nivel hasta fuertemente inclinadas de las tierras más altas, entre las escorrentías, los valles y las amplias planicies de inundación. El rango de las pendientes oscila entre 0 y 8%, con algunos casos de 15%. Los rangos de la precipitación media se encuentra entre 250 y 400 mm y la temperatura media anual del suelo varía entre 16 y 22 °C.

**Asociación TS4 White House-Bernardino-Hathaway:** Esta asociación consiste de suelos profundos y bien drenados, que tienen texturas entre moderadamente gruesa y fina en los niveles próximos a la superficie a pendientes moderadamente pronunciadas. Se encuentra en abanicos aluviales, planicies aluviales montañosas y antiguas terrazas disectadas que se formaron de un antiguo aluvión derivado de rocas graníticas, volcánicas y sedimentarias. El rango de las pendientes va desde 1 a 20%, pero superior a 50%

donde están los suelos Hathaway. Los rangos de la precipitación media anual oscilan entre 300 y 460 mm y la temperatura media anual del suelo varía entre 15 y 21 °C.

**Asociación TS6 Lithic Torriorthents-Lithic Haplustolls-Rock Outcrop:** Esta asociación consiste de suelos someros, pedregosos y gravosos sobre superficies rocosas muy inclinadas. Los suelos son están bien drenados sobre superficies semiáridas, en colinas y montañas de media elevación. Estos suelos fueron formados por el intemperismo residual, originado de gneiss granítico, riolita, andesita, tobas, calizas, areniscas y basaltos. Las pendientes normalmente varían entre 20 y 50 %, pero el rango completo oscila entre 10-70%. La precipitación media anual está entre 250 a 510 mm y la temperatura media anual del suelo varía entre 15 y 22 °C.

**Asociación TS9 Latene-Nickel-Pinaleno:** Esta asociación se compone de suelos profundos y ásperos, así como de suelos calcáreos de textura moderadamente gruesa a fina, a nivel casi de superficie muy empinada y depositados en profundidad; se formaron diseccionando abanicos aluviales y terrazas, derivados de un antiguo aluvión procedente de rocas de granito, gneis, caliza y otras sedimentarias. Sus pendientes varían de 1 a 60%. La precipitación media anual oscila entre 250 y 410 mm y la temperatura media anual del suelo varía entre 16 y 22 °C.

**Asociación TS14 Nickel-Latene-Cave:** Esta asociación de suelo consiste de suelos profundos y someros, calcáreos y gravosos, mediano a moderadamente grueso, se ubican sobre antiguos abanicos aluviales disectados y también sobre terrazas escarpadas, tanto a nivel de superficie como a profundidad. Ampliamente distribuidos a lo largo del Río San Pedro, habiéndose formado de un antiguo aluvión calcáreo derivado de rocas ígneas y sedimentarias. La mayoría de las pendientes varían entre 5 y 30 %, pero el rango completo es de 0 a 60%. Los rangos de la precipitación media anual está entre 250 y 360 mm y la temperatura media anual del suelo varía entre 18 y 22 °C.

### 11. 3 Datos Meteorológicos

En orden para determinar las variables climáticas dentro de la cuenca transfronteriza, la base de climática global WorldClim fue utilizada (<http://www.worldclim.org/>). Registros de temperatura, precipitación y ET para el período 1970-2010 fueron obtenidos de tres estaciones climáticas en el área. Dos de ellas están localizadas en México y una en E.U. (Minjárez et al., 2011). Esta base de datos fue obtenida de los registros históricos de CONAGUA. Los datos climáticos diarios del Centro Climático Regional del Oeste de estados Unidos proveyeron una adecuada cobertura para la porción norte del acuífero en Sonora. La selección de las estaciones climáticas fue basada en la distribución espacial dentro de la cuenca, así como en la disponibilidad y consistencia de datos del período de registro. Las estaciones climáticas analizadas son mostradas en la tabla de abajo. Todos los datos registrados de cada estación climática fueron analizados, incluyendo temperatura y

precipitación. Las medias acumuladas y mensuales fueron desarrolladas para precipitación. Para la temperatura, sólo media mensual y promedio anual fueron considerados.

**Tabla 11. 2Estaciones climáticas analizadas**

<b>CÓDIGO</b>	<b>ESTACIÓN</b>	<b>ESTADO</b>	<b>Y</b>	<b>X</b>	<b>Z</b>
<b>26057</b>	NACO	SONORA	3466651	599895	1390
<b>26164</b>	SANTA CRUZ	SONORA	3455165	539047	1350
<b>26013</b>	CANANEA	SONORA	3427602	567796	1600
<b>22140</b>	CORONADO NATL-M	ARIZONA	3468454	571338	1331

## Estación Naco

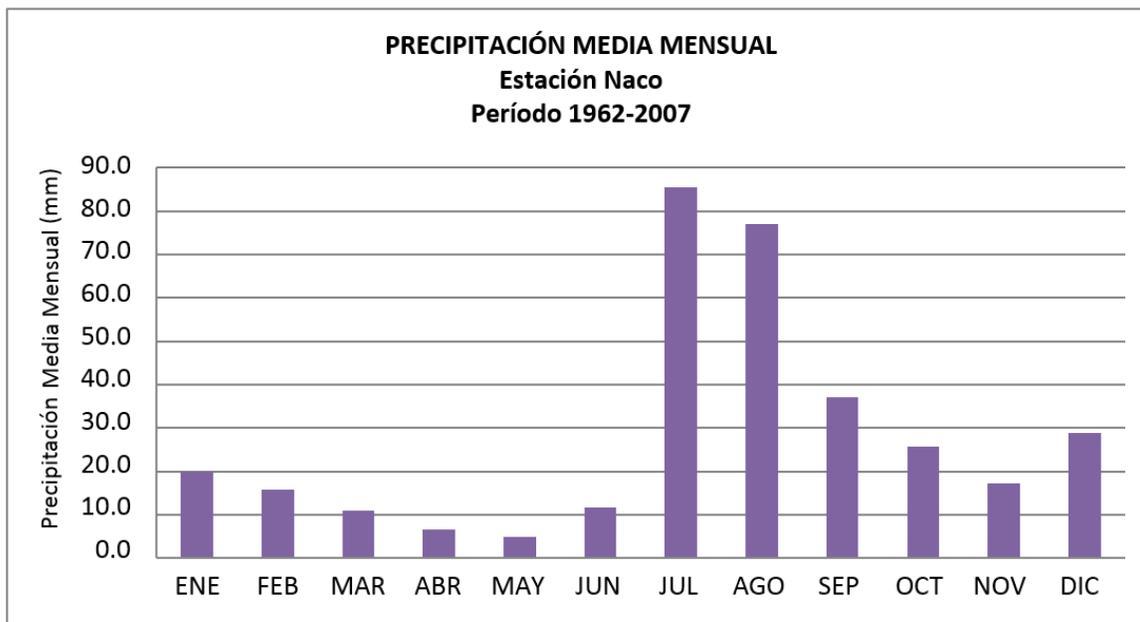


Figura 1. Precipitación Media Mensual, Estación Naco, Período 1962-2007

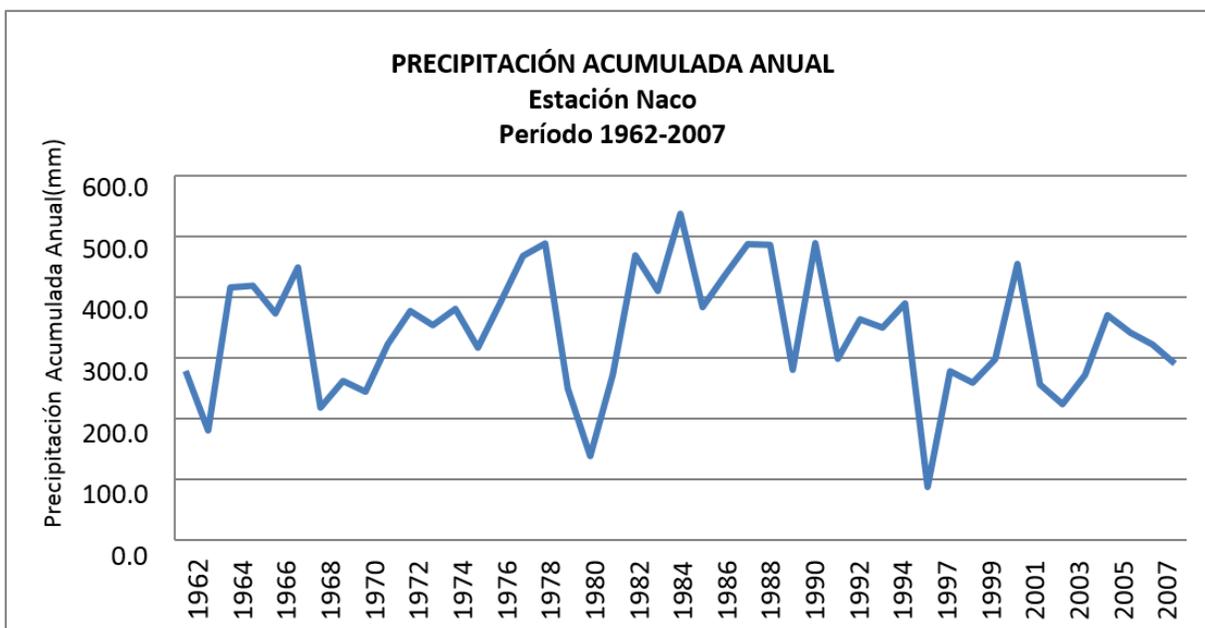
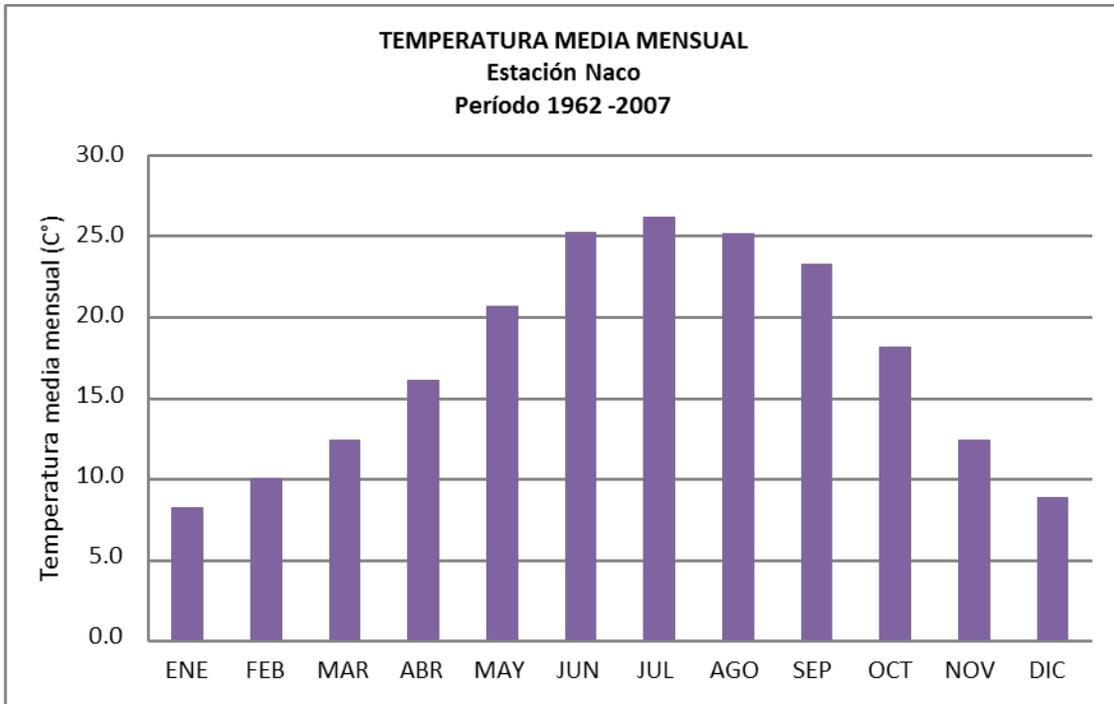
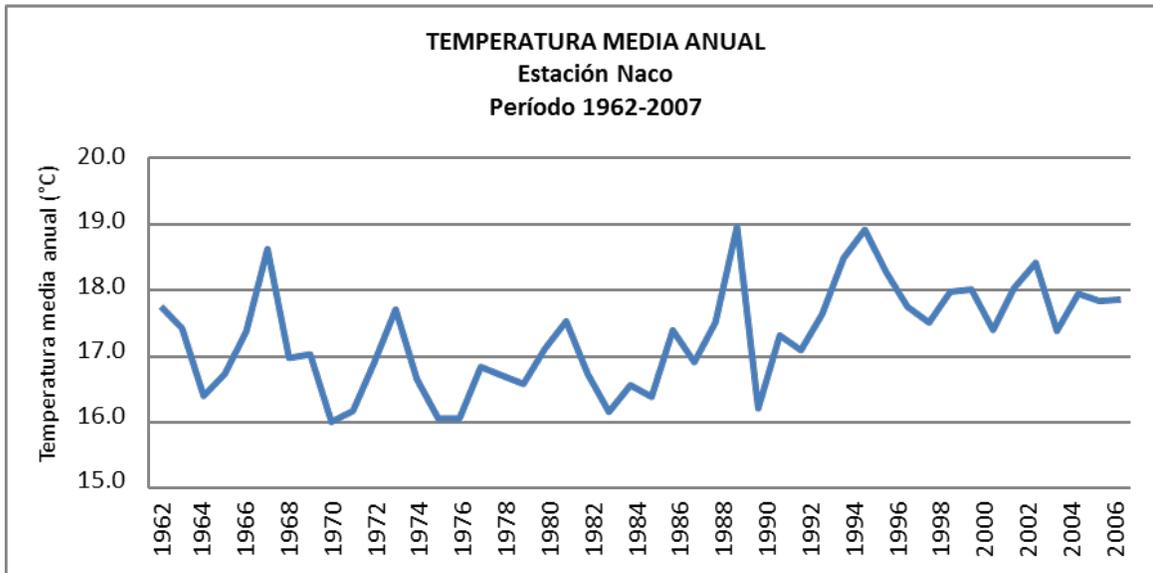


Figura 2. Precipitación Acumulada Anual, Estación Naco, Período 1962-2007

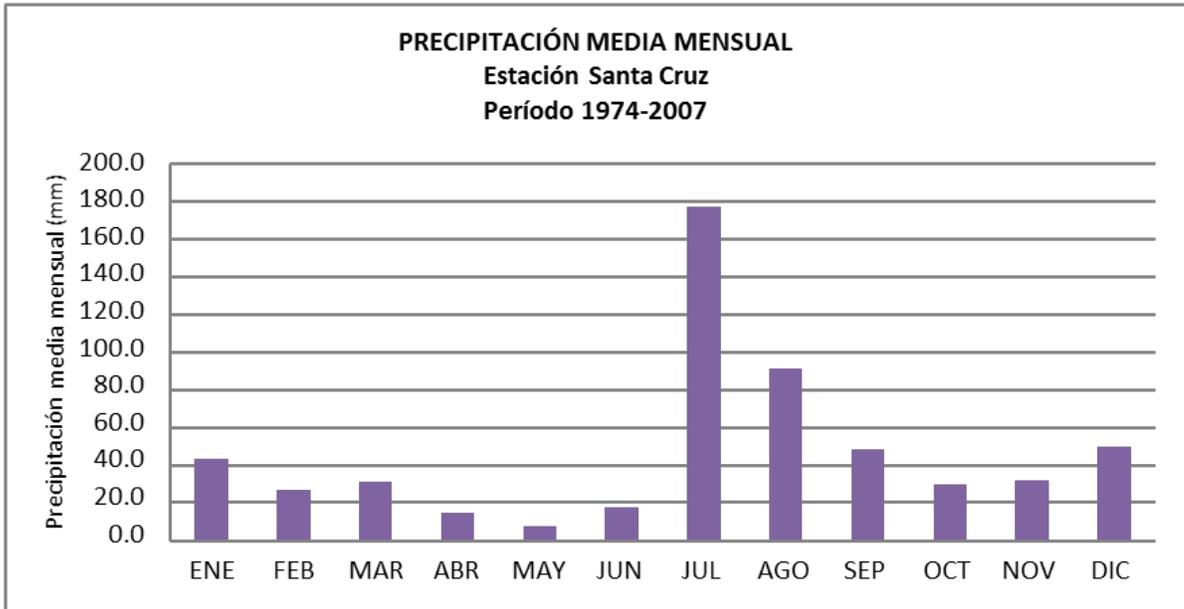


**Figura 3. Temperatura Media Mensual, Estación Naco, Período 1962-2007**

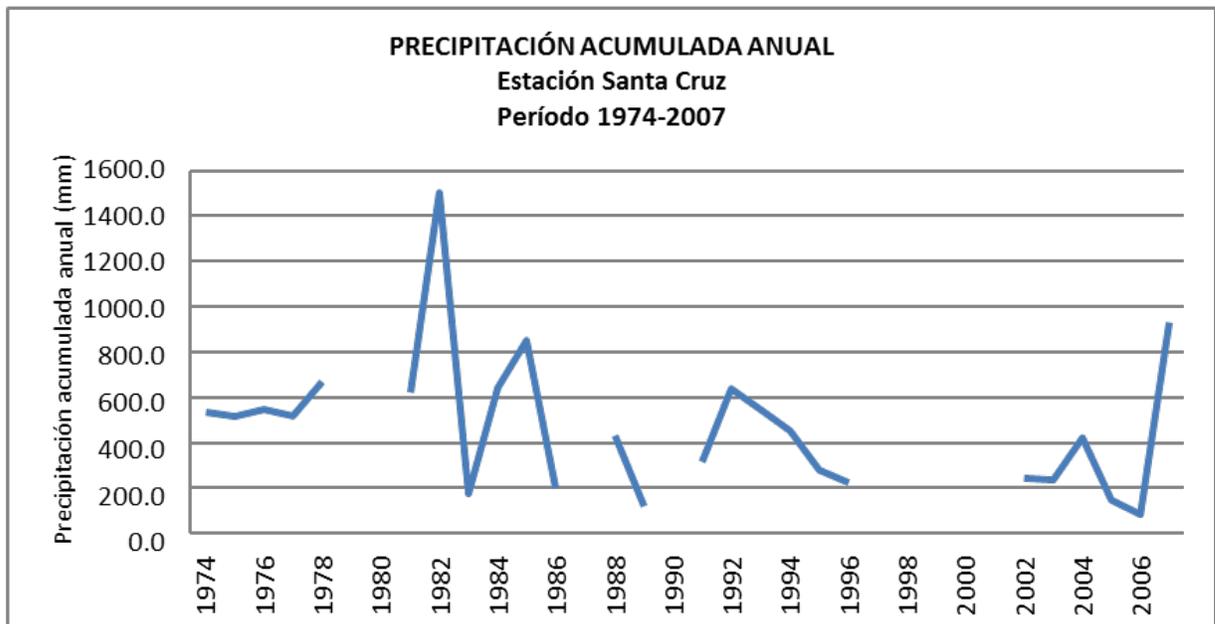


**Figura 4. Temperatura Media Anual, Estación Naco, Período 1962-2007**

**Estación Santa Cruz**



**Figura 5. Precipitación Media Mensual, Estación Santa Cruz, Período 1974-2007**



**Figura 6. Precipitación Acumulada Anual, Estación Santa Cruz, Período 1974-2007**

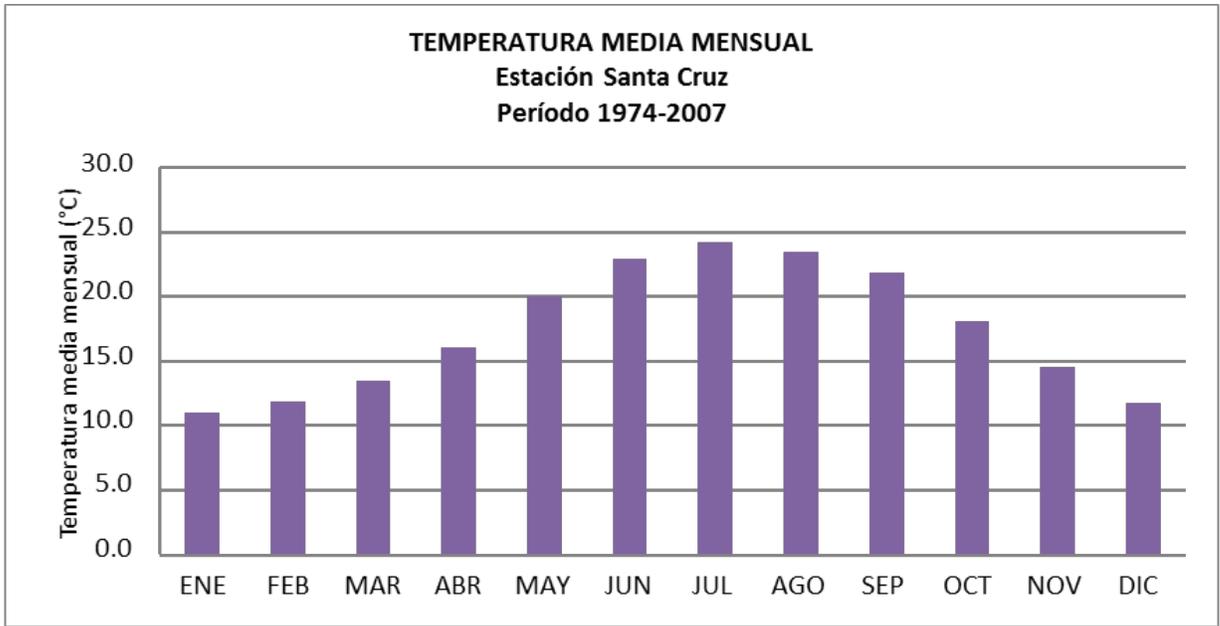


Figura 7. Temperatura Media Mensual, Estación Santa Cruz, Período 1974-2007

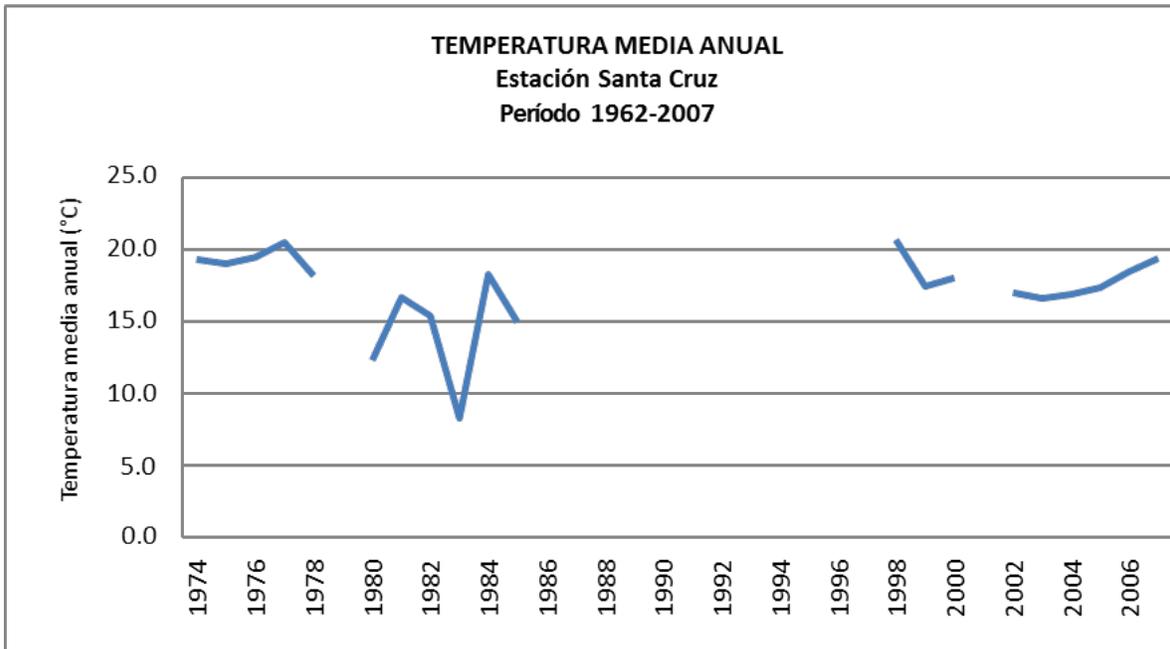
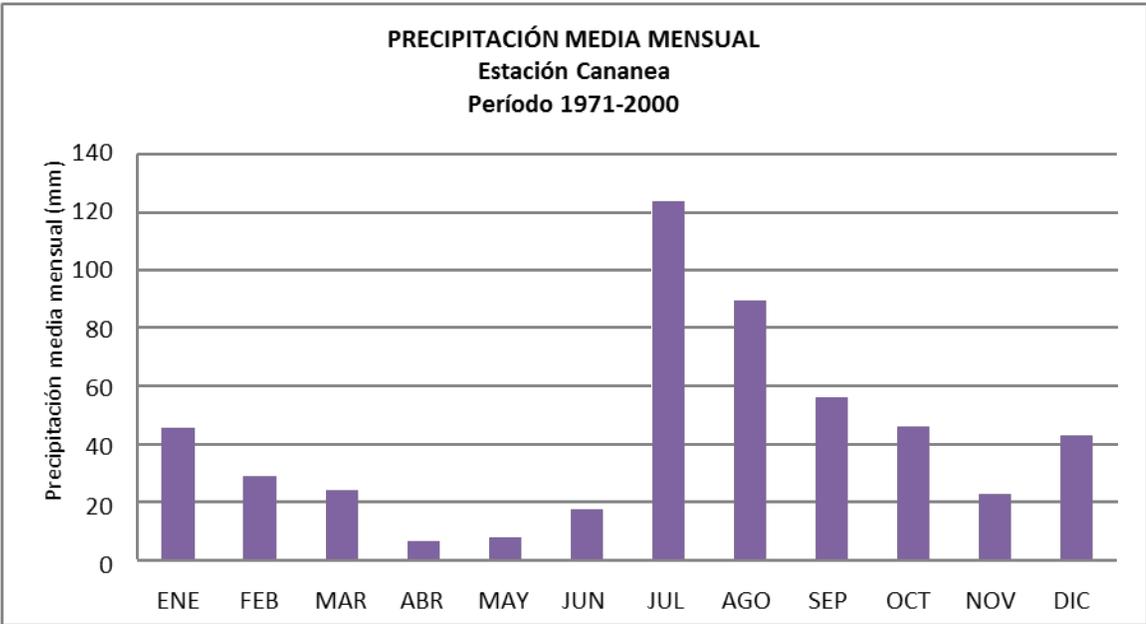
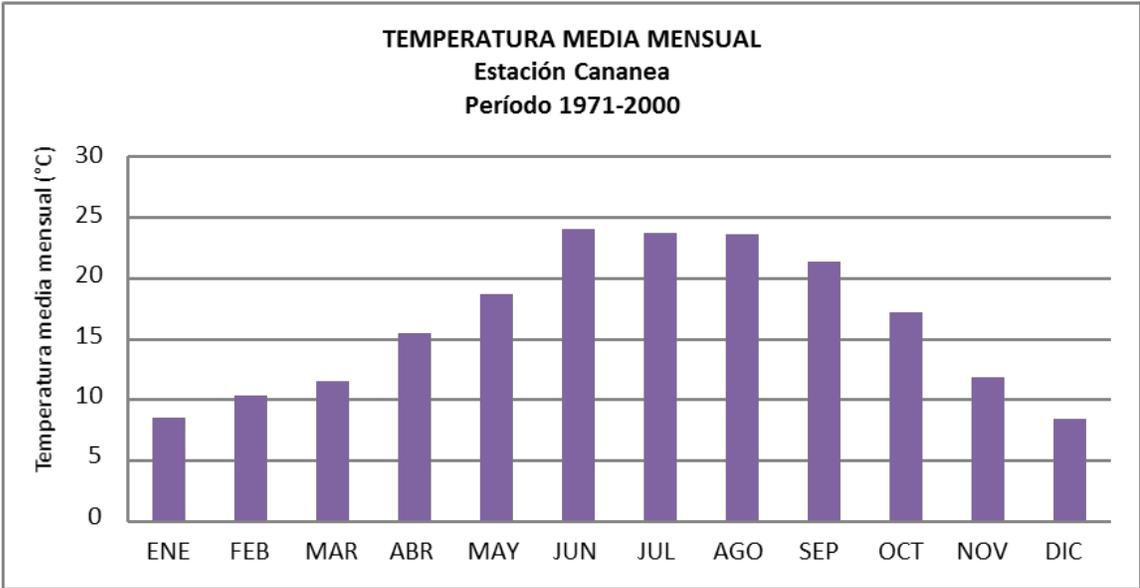


Figura 8. Temperatura Media Anual, Estación Santa Cruz, Período 1974-2007

**Estación Cananea**

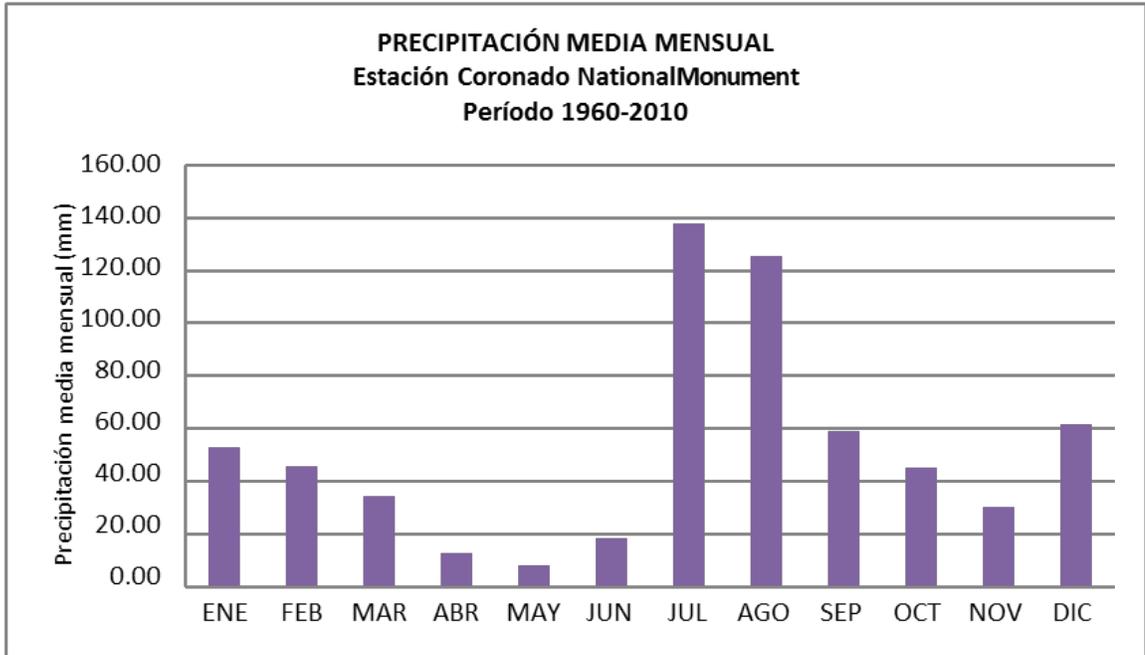


**Figura 9. Precipitación Media Mensual, Estación Cananea, Período 1971-2000**

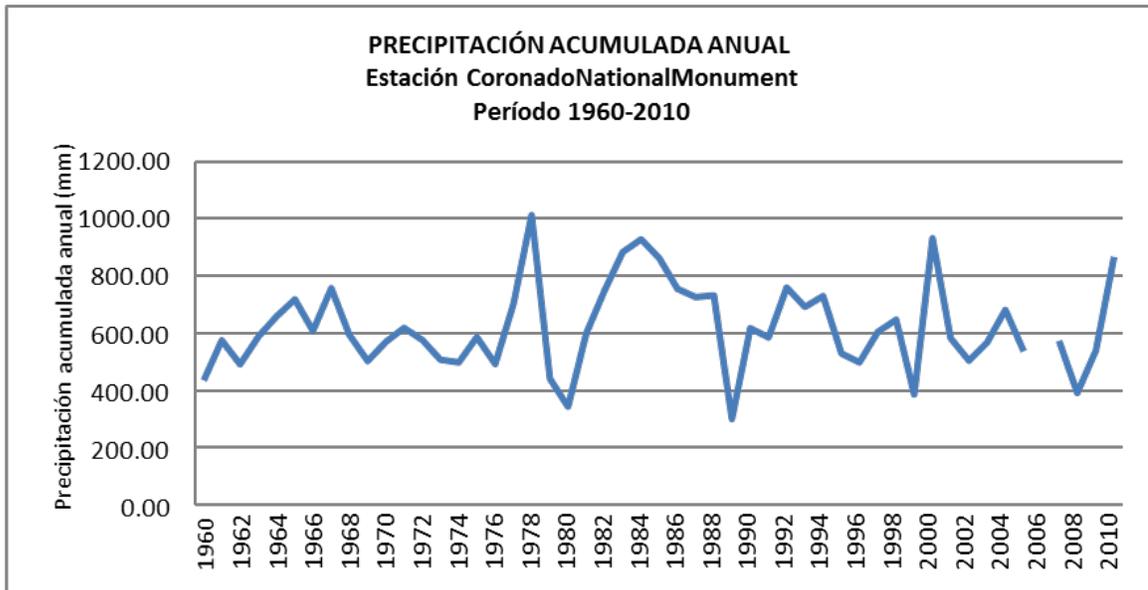


**Figura 10. Temperatura Media Mensual, Estación Cananea, Período 1971-2000**

**Estación Coronado National Monument**



**Figura 11. Precipitación Media Mensual, Estación Coronado National Monument, Período 1960-2010**



**Figura 12. Precipitación Acumulada Anual, Estación Coronado National Monument, Período 1960-2010**

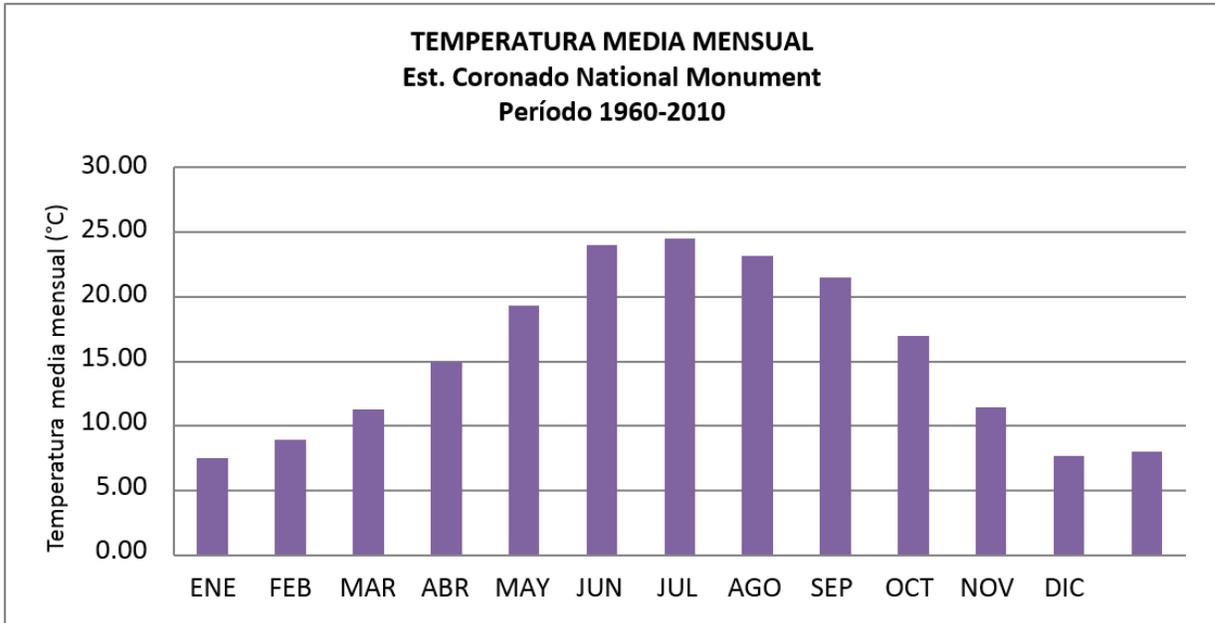


Figura13. Temperatura Media Mensual, Estación Coronado National Monument, Período 1960-2010

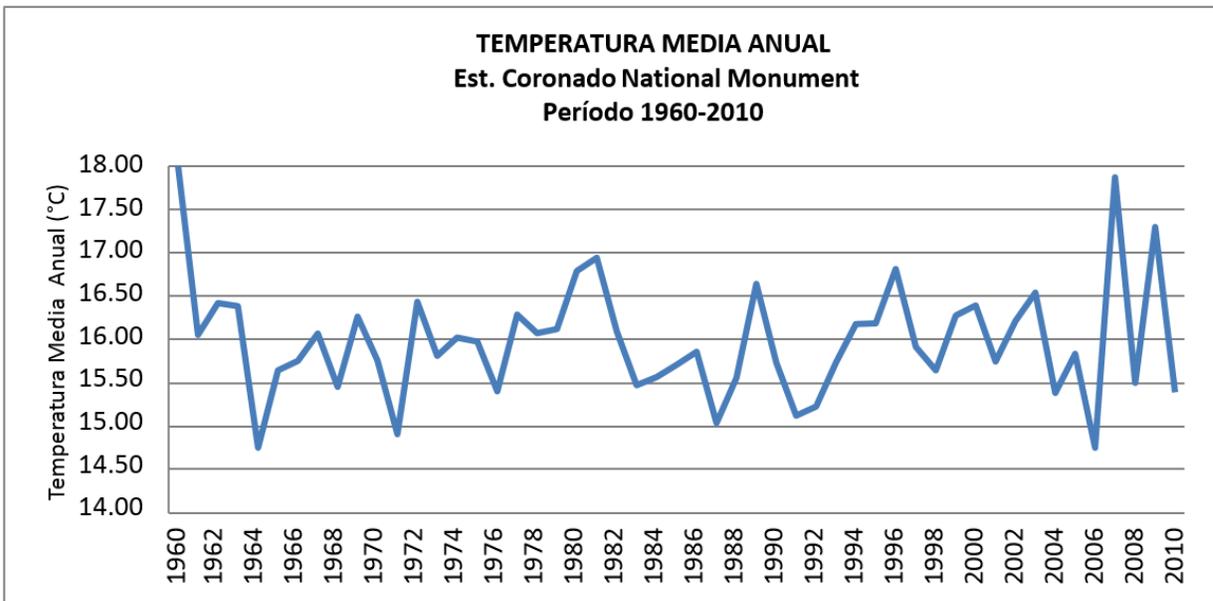


Figura 14. Temperatura Media Anual, Estación Coronado National Monument, Período 1960-2010

#### 11.4 Clases de vegetación y descripciones

Código SP	Código SWReGAP	Clase de vegetación (Boykin et al., 2014)	Descripción (Modificada de Southwest Regional Gap Analysis Project (U.S. Geological Survey, 2004)	Porcentaje (%)
1	N80	Agricultura	Combinación de N81 (Pastos/Heno) y N82 (Cultivos). N81: áreas de gramíneas, legumbres o mezcla de gramíneas-legumbres plantadas para el pastoreo de ganado, producción de semillas o cultivos de heno, como maíz, soya, vegetales, tabaco y algodón, y también cultivos boscosos perennes como huertos y viñedos. Incluye toda la tierra que está siendo activamente labrada. Pasto/heno y /o cultivos de vegetales mayores al 20% del total de la vegetación.	0.201%
2	N21	Espacios abiertos desarrollados de baja intensidad	Espacio abierto: incluye áreas con una mezcla de algunos materiales para la construcción, pero principalmente vegetación en forma de hierbas. Superficies impermeables cuentan menos del 20% del total cubierto. Estas áreas mayormente incluyen grandes lotes de unidades familiares individuales, parques, cursos de golf y vegetación plantada para el desarrollo de actividades recreativas, control de erosión o propósitos estéticos.	1.286%
3	N22	Espacios abiertos desarrollados de media-alta intensidad	Incluye áreas con una mezcla de materiales construidos y vegetación. Superficies impermeables cuentan del 50-79 % de la cubierta total. Estas áreas comúnmente incluyen unidades habitacionales individuales.	1.294%
4	N11	Agua		0.023%
10	S010	Plateau del Colorado. Meseta y cañones sobre roca	La distribución de este sistema ecológico está centrada sobre la Meseta Colorado, compuesto paisajes áridos y escasos de vegetación (generalmente menor al 10% de la cobertura de plantas) de escarpados acantilados, cañón es estrecho y necesidad abiertas de rocas predominantemente sedimentarias, como arenisca, pizarra y caliza. Especies comunes incluyen <i>Pinus edulis</i> , <i>Pinus ponderosa</i> , <i>Juniperus spp.</i> , <i>Cercocarpus intricatus</i> , y otras especies de arbustos pequeños y herbáceas, que utilizan la humedad acumulada en las grietas del suelo.	0.015%

16	S016	Desierto cálido norteamericano. Acantilado y afloramientos rocosos	Este sistema ecológico es encontrado desde las elevaciones sub alpinas hasta el pie de las colinas e incluyen paisajes áridos y de escasa vegetación (generalmente con una cobertura menor al 10%) de acantilados escarpados, cañón es estrecho y afloramientos rocosos pequeños de variedad ígnea, sedimentaria y basamento metamórfico. También incluye rocas y taludes de pendientes de inestables que típicamente ocurren en acantilados escarpados. Las especies presentes son diversas y pueden incluir <i>Bursera microphylla</i> , <i>Fouquieria splendens</i> , <i>Nolina bigelovii</i> , <i>Opuntia bigelovii</i> , y otras.	0.798%
19	S019	Desierto cálido norteamericano de rocas volcánicas	Este sistema ecológico ocurre a través de los desiertos cálidos de Norteamérica y es restringido a los sustratos volcánicos áridos y de pobre vegetación (menor al 10% de cobertura de plantas), como lava basáltica (malpaís) y toba. La vegetación es variable e incluye una diversidad de especies dependiendo de las condiciones ambientales locales, como por ejemplo la elevación, la edad y el tipo de sustrato. Típicamente dispersado <i>Larrea tridentata</i> , <i>Atriplex hymenelytra</i> , y otros arbustos desérticos están presentes.	0.022%
20	S020	Desierto cálido norteamericano- Arroyos	Este sistema ecológico está restringido a las planicies de inundación intermitentes o arroyos, que disectan bajadas, mesas, planicies y pisos de la cuenca en todos los desiertos cálidos de Norteamérica. Aunque frecuentemente están secos, los procesos fluviales intermitentes definen este sistema, los cuales es tan frecuentemente asociados a láminas rápidas y flujos de barranco. La capa boscosa era típicamente intermitente para abrirse y puede estar dominada por arbustos y pequeños árboles como <i>Acacia greggii</i> , <i>Brickellia laciniata</i> , <i>Baccharis sarothroides</i> , <i>Chilopsis linearis</i> , <i>Fallugia paradoxa</i> , <i>Hymenoclea salsola</i> , <i>Hymenoclea monogyra</i> , <i>Juglans microcarpa</i> , <i>Prosopis</i> spp., <i>Psoralea argemonea</i> , <i>Psoralea argemonea</i> , <i>Prunus fasciculata</i> , <i>Rhus microphylla</i> , <i>Salazaria mexicana</i> , o <i>Sarcobatus vermiculatus</i> .	0.252%
21	S021	Desierto cálido Norteamericano. Pavimento	Este sistema ecológico ocurre mucho en los desiertos cálidos de Norteamérica y está compuesto de paisajes sin vegetación a pobremente vegetados (menor al 2% de cobertura de plantas), directamente en cuencas planas donde la temperatura externa y el viento desarrollan superficies finas a medio gravosas del suelo, llamado barniz desértico. Tiene una muy baja cobertura de arbustos desérticos, especies como <i>Larrea tridentata</i> o <i>Eriogonum fasciculatum</i> usualmente están presentes.	0.020%

23	S023	Bosque de álamos de las Montañas Rocallosas	Este sistema ecológico es más común en la parte sur y central de las Montañas Rocallosas, pero ocurre en el oeste de Estados Unidos y norte de Canadá, en las zonas montañosas sub alpinas. El rango de las elevaciones generalmente va desde los 1525 a los 3050 metros (5,000-10,000 pies) pero su ocurrencia puede ser encontrada en algunas regiones a bajas elevaciones. Estos bosques de tierras altas están dominados por <i>Populus tremuloides</i> sin un significativo componente de coníferas (menor al 25% relativo de cobertura de árboles).	0.014%
35	S035	Bosque de Encino-pino madrense y arbolado	Este sistema ocurre sobre las montañas y mesetas de la Sierra Madre Occidental y Sierra Madre Oriental en México, Trans-Pecos Texas, sur de nuevo México y las partes sur y central de Arizona, desde el sureste del Mogollon Rim hasta las Islas Sky. Estos bosques están compuestos de pinos madrenses ( <i>Pinus arizonica</i> , <i>Pinus engelmannii</i> , <i>Pinus sleiophylla</i> o <i>Pinus strobiformis</i> ) y encinos ( <i>Quercus arizonica</i> , <i>Quercus emoryi</i> , o <i>Quercus grisea</i> ) entremezclado con parches de arbustos sobre las pendientes de elevaciones medias (1500-2300 m).	0.372%
36	S036	Bosque de pino ponderosa de las Montañas Rocallosas	Este amplio sistema ecológico es muy común en toda la cordillera de las Montañas Rocallosas. También se encuentran en la Meseta del Colorado, dispersado hacia las localidades de la Gran Cuenca, norte y sur de la Columbia Británica. Estos bosques ocurren en la línea baja de los árboles entre los pastos o arbustos y los bosques de coníferas que se encuentran típicamente en sitios cálidos, secos y expuestos. El rango de las elevaciones es desde menos de 500 metros en la Columbia Británica hasta 2800 metros en las montañas de Nuevo México.	0.019%
38	S038	Bosque pino-junípero de las Montañas Rocallosas	Este sistema ecológico del sur de las Montañas Rocallosas ocurre sobre las montañas secas y al pie de las colinas en el sur de Colorado, en las montañas y mesetas del norte de Nuevo México y Arizona, y se tiene sobre las calizas fracturadas en las grandes planicies. Los suelos de este sistema varían en rangos de textura desde pedregoso, limos arenogrosos a limo arcillosos o arcillas. Los <i>Pinus edulis</i> y/o <i>Juniperus monosperma</i> dominan las copas de los árboles. <i>Juniperus scopulorum</i> pueden codominar o reemplazar en las altas elevaciones al <i>Juniperus monosperma</i> .	0.018%

51	S051	Encinal madrense	El Encinal madrense ocurre sobre el pie de las colinas, cañones, bajadas y mesetas de las Sierras Madre Oriental y Madre Occidental en México, extendiéndose hacia el norte en Trans-Pecos Texas, sur de Nuevo México y Mogollon Arizona. Estos bosques son dominados por encinos Madrean a lo largo de la transición de una pendiente baja de los bosques de pino-encino Madrean (CES305.796) y el bosque Pinyon-Juniper Woodland (CES305.797). Especies comunes de encinos incluyen <i>Quercus arizonica</i> , <i>Quercus emoryi</i> , <i>Quercus intricata</i> , <i>Quercus grisea</i> , <i>Quercus oblongifolia</i> , <i>Quercus toumeyi</i> y en México <i>Quercus chihuahuensis</i> y <i>Quercus albocincta</i> .	10.007%
57	S057	Chaparral Mogollon	Este sistema ecológico ocurre a través de Arizona central (Mogollon Rim), o de Nuevo México, suroeste de Utah y sureste de Nevada. Frecuentemente domina en las elevaciones medias de transición desde Mojave, Sonora y norte del desierto chihuahuense hacia las montañas (1000-2000 m). Está frecuentemente asociado a sustratos de textura gruesa como calizas, basaltos o aluvión, especialmente en las áreas de transición de mesas boscosas. Las partes moderadamente densas de arbustos incluyen especies como <i>Quercus turbinella</i> , <i>Quercus toumeyi</i> , <i>Cercocarpus montanus</i> , <i>Canotia holacantha</i> , <i>Ceanothus greggii</i> , <i>Forestiera pubescens</i> (= <i>Forestieraneomexicana</i> ), <i>Garrya wrightii</i> , <i>Juniperus deppeana</i> , <i>Purshia stansburiana</i> , <i>Rhusovata</i> , <i>Rhus trilobata</i> y <i>Arctostaphylos pungens</i> and <i>Arctostaphylos pringlei</i> elevaciones altas.	2.218%
58	S058	Matorrales y mezaquite de tierras altas Apacheriano- Chihuahuense	Este sistema ecológico ocurre en las tierras altas de arbustos de extensos pastos, en la transición de las colinas y pie de monte en el desierto chihuahuense. Se extiende hacia la región Sky Island al oeste y la meseta Edwards al este. Los sustratos está directamente derivados de aluvión sin el desarrollo de un horizonte de suelo argílico o cálcico que limitaría la infiltración y almacenamiento de las precipitaciones de invierno en las capas de suelo más profundo. La vegetación es típicamente dominada por <i>Prosopis glandulosa</i> o <i>Prosopis velutina</i> .	16.739%
61	S061	Matorral del Desierto Chihuahuense	Este sistema ecológico se encuentra el desierto chihuahuense sobre las pendientes coluviales, bajadas superiores, laderas y mesetas. La vegetación está caracterizada por una alta cobertura de especies como <i>Agave lechuguilla</i> , <i>Euphorbia antisyphilitica</i> , <i>Fouquieria splendens</i> , <i>Opuntia engelmannii</i> , <i>Opuntia imbricata</i> , <i>Opuntia spinosior</i> , <i>Yucca baccata</i> , <i>Yucca elata</i> and many others. La abundancia de este sistema es diagnosticada por los arbustos, los arbustos en este desierto son usualmente presentes.	0.216%

63	S063	Matorral cactáceo Sonorense Palo Verde	Este sistema ecológico ocurre sobre las colinas, mesas y bajadas superiores del sur de Arizona y el extremo sureste de California. La vegetación está caracterizada por una escasa y emergente capa de árboles de <i>Carnegia gigantea</i> (3-16m de alto) y/o un escaso a moderadamente denso de arbustos xeromórficos caducos y arbustos alto de hoja perenne como <i>Parkinsonia microphylla</i> y <i>Larrea tridentata</i> with <i>Prosopis</i> sp., <i>Olneya tesota</i> , y <i>Fouquieria splendens</i> menos prominente. Otros arbustos comunes y enanos incluyen <i>Acacia greggii</i> , <i>Ambrosia deltoidea</i> , <i>Ambrosia dumosa</i> (indriersites), <i>Calliandra eriophylla</i> , <i>Jatropha cardiophylla</i> , <i>Krameria erecta</i> , <i>Lycium</i> spp., <i>Menodora scabra</i> , <i>Simmondsia chinensis</i> , y muchos cactus incluyendo <i>Ferocactus</i> spp., <i>Echinocereus</i> spp., y <i>Opuntia</i> spp. (ambos conocidos como cholla y pera espinosa).	0.002%
67	S067	Matorral espinoso de gobernadora Chihuahuense	Este Sistema ecológico está limitado a las partes bajas y extremadamente secas en la amplitud de la Cuenca del desierto chihuahuense. Los sustratos son gravosos, no salinos y típicamente cubiertos por pavimento del desierto. La vegetación es una abierta zona de arbustos dominados por <i>Larrea tridentatas subspecies</i> codominantes comunes en el piedemonte y abanicos aluviales. <i>Parthenium incanum</i> o <i>Tiquilia hispidissima</i> pueden ser codominantes.	11.381%
68	S068	Matorral de dunas estabilizadas y planicies Chihuahuense	Este Sistema ecológico incluye arbustos y matorral de dunas y zonas arenosas que se encuentran en el Desierto Chihuahuense. Usualmente dominado por <i>Prosopis glandulosa</i> pero incluye <i>Atriplex canescens</i> , <i>Ephedra torreyana</i> , <i>Ephedra trifurca</i> , <i>Poliomintha incana</i> , y <i>Rhus microphylla</i> matorral arbustivo con el 10-30% del total de la cubierta vegetal. <i>Yucca elata</i> , <i>Gutierrezia sarothrae</i> , y <i>Sporobolus flexuosus</i> están comúnmente presentes.	1.372%
69	S069	Matorral desértico de Hierba de la flecha Gobernadora Sonora-Mojave	Este Sistema ecológico forma la matriz de la vegetación en los amplios valles, bajadas inferiores, planicies y Colinas bajas en los desiertos de Mojave y Sonora. Este desierto de arbustos está caracterizado por una escasa a moderadamente densa capa de micrófilos xeromórficos (2-50%) y una amplia distribución de arbustos. <i>Larrea tridentata</i> y <i>Ambrosia dumosa</i> son típicamente dominantes, pero también presenta muchos diferentes tipos de arbustos, arbustos enanos y cactus pueden codominar o formas típicas de escasos bosques.	0.015%

77	S077	Pastos semidesérticos de pie de monte y estepa Apacheriano Chihuahuense	Este Sistema ecológico está ampliamente definido por el desierto de pradera, mezclado con arbustos y sabana de árboles xeromórficos, que es típico de la frontera de Arizona, Nuevo México y norte de México (región Apalache), pero se extiende al Desierto de Sonora y todo el Desierto de Chihuahua. Especies comunes de pastos incluyen <i>Bouteloua eriopoda</i> , <i>Bouteloua hirsuta</i> , <i>Eragrostis intermedia</i> , <i>Muhlenbergia porteri</i> , <i>Muhlenbergia setifolia</i> , <i>Pleuraphis jamesii</i> , <i>Pleuraphis mutica</i> , y <i>Sporobolus airoides</i> , especies de <i>Agave</i> , <i>Dasyliirion</i> , <i>Yucca</i> , y arbustos altos/pequeñas especies de árboles como <i>Prosopis</i> y varios encinos (como por ejemplo, <i>Quercus grisea</i> , <i>Quercus emoryi</i> , <i>Quercus arizonica</i> ).	28.992%
94	S094	Desierto cálido norteamericano montano ribereño arbolado y matorral	Este Sistema ecológico ocurre en cañones y valles del sur de Arizona y Nuevo México, también en zonas adyacentes a México; consiste de elevaciones medias a bajas (110-1800 m) a lo largo de las riberas perennes y de corrientes intermitentes. Entre los árboles dominantes se incluye <i>Populus angustifolia</i> , <i>Populus deltoides ssp. wislizeni</i> , <i>Populus fremontii</i> , <i>Platanus wrightii</i> , <i>Juglans major</i> , <i>Fraxinus velutina</i> y <i>Sapindus saponaria</i> . Los arbustos dominantes que presentan son <i>Salix exigua</i> , <i>Prunus spp.</i> , <i>Alnus oblongifolia</i> y <i>Baccharis salicifolia</i> .	0.094%
97	S097	Desierto cálido norteamericano ribereño arbolado y matorral	Este Sistema ecológico consiste de elevaciones bajas (menores a 1200 m) a lo largo de las riberas medias y grandes corrientes perennes por los cañones y valles desérticos del suroeste de los Estados Unidos y México. La vegetación es una mezcla de árboles y arbustos ribereños. Los árboles dominantes incluyen <i>Acer negundo</i> , <i>Fraxinus velutina</i> , <i>Populus fremontii</i> , <i>Salix gooddingii</i> , <i>Salix laiolepis</i> , <i>Celtis laevigata var. reticulata</i> y <i>Juglans major</i> . Entre los arbustos dominantes se tiene <i>Salix geyeriana</i> , <i>Shepherdia argentea</i> y <i>Salix exigua</i> .	0.001%
98	S098	Desierto cálido norteamericano ribereño, bosque de mezquite	Este Sistema ecológico consiste de bajas elevaciones (menor a 1100 m) en los corredores ribereños de corrientes intermitentes en valles del sur de Arizona, Nuevo México y áreas adyacentes a México. Los árboles dominantes en el área son <i>Prosopis glandulosa</i> y <i>Prosopis velutina</i> . Los arbustos dominantes son <i>Baccharis salicifolia</i> , <i>Pluchea sericea</i> y <i>Salix exigua</i> . Respecto a la vegetación, especialmente los mezquites, aprovechan las aguas subterráneas que escurren por debajo del lecho del río cuando el escurrimiento se detiene.	0.269%

100	S100	Estero emergente árido del oeste norteamericano	La amplitud de este Sistema ecológico ocurre en toda la región árida y semiárida de oeste de Norteamérica. Esteros naturales pueden ocurrir en depresiones del terreno (estanques) como meandros alrededor de los lagos, así como en corrientes de bajo flujo y ríos. Los suelos tienen características que resultan de largos periodos de condiciones anaeróbicas, (como por ejemplo, suelos saturados, de alto contenido orgánico, rasgos redoximórficos). Vegetación emergente común y flotante incluye especies de <i>Scirpus</i> y <i>Schoenoplectus</i> , <i>Typha</i> , <i>Juncus</i> , <i>Potamogeton</i> , <i>Polygonum</i> , <i>Nuphar</i> , además de <i>Phalaris</i> .	0.004%
109	S109	Desierto Chihuahuense basal y pradera -Ciénegas	Este Sistema ecológico ocurre en todo el norte del Desierto Chihuahuense, en las Islas Sky y Desierto de Sonora, así como en los límites de las Grandes Planicies del sur y Meseta Edwards en depresiones sobre amplias mesetas y llanuras, y fondo de los valles que reciben escurrimientos de áreas adyacentes. La vegetación está típicamente dominada por <i>Pleuraphis mutica</i> u otras gramíneas como <i>Pascopyrum smithii</i> , <i>Panicum obtusum</i> , <i>Sporobolus airoides</i> o <i>Sporobolus wrightii</i> .	13.521%
111	S111	Bosque madreano superior de coníferas y arbolado	Este Sistema ocurre en las elevaciones superiores de las Sierras Madre Oriental y Occidental. En los Estados Unidos, se restringe a los sitios norte y este a altas elevaciones (1980-2440 m) en las Islas Sky (montañas Chiricahua, Huachuca, Pinaleno, Santa Catalina y Santa Rita) y a lo largo de Nantanes Rim. La vegetación está caracterizada por grandes y pequeños parches de bosque y zonas arboladas dominadas por <i>Pseudotsuga menziesii</i> , <i>Abies coahuilensis</i> o <i>Abies concolor</i> and Encino madreano como <i>Quercus hypoleucoides</i> y <i>Quercus rugosa</i> .	0.460%
112	S112	Bosque madreano pino-junípero	Este Sistema ocurre sobre el pie de los cerros, montañas y mesetas en las Sierras Madre Oriental y Occidental en México, Trans-Pecos Texas, sur de Nuevo México y la parte sur-central de Arizona, desde Mogollon Rim, sur de las Islas Sky. Los sustratos son variables, pero los suelos son generalmente secos y rocosos. La presencia de <i>Pinus cembroides</i> , <i>Pinus discolor</i> u otros árboles madreanos y arbustos son el diagnóstico de este sistema.	7.031%
113	S113	Planicies arenosas semidesérticas de pradera chihuahuense	Este sistema ecológico ocurre a través del Desierto Chihuahuense y se extiende al sur de las Grandes Planicies donde los suelos tienen un alto contenido de arena. Estas praderas secas o estepas se encuentran como planicies arenosas y mesetas de arenisca. La capa graminoide está dominada o codominada por <i>Achnatherum hymenoides</i> , <i>Bouteloua eriopoda</i> , <i>Bouteloua hirsuta</i> , <i>Hesperostipa neomexicana</i> , <i>Pleuraphis jamesii</i> , <i>Sporobolus cryptandrus</i> o <i>Sporobolus flexuosus</i> .	0.025%

115	S115	Sabana madreana junípera	Este Sistema ecológico ocurre en las partes bajas de las colinas y planicies del sureste de Arizona, sur de Nuevo México extendiéndose hacia el este de Texas y México. Estas sabanas tienen enebros maduros ampliamente espaciados y de moderada a alta cobertura de gramíneas (>25% de cobertura). La presencia de Madrean <i>Juniperus</i> spp., así como <i>Juniperus coahuilensis</i> , <i>Juniperus pinchotii</i> , y/o <i>Juniperus deppeana</i> .	0.050%
116	S116	Desierto salado mixto chihuahuense	Este sistema incluye extensos matorrales de cuencas abiertas típicamente salinas en el Desierto Chihuahuense. Frecuentemente ocurren sobre llanos aluviales y alrededor de las playas. Los sustratos generalmente están finamente texturados y de suelo salino. La vegetación está compuesta de una o más especies de <i>Atriplex</i> como <i>Atriplex canescens</i> , <i>Atriplex obovata</i> o <i>Atriplex polycarpa</i> con una variedad de <i>Allenrolfea</i> , <i>Flourensia</i> , <i>Salicornia</i> , <i>Suaeda</i> u otras plantas halófitos.	2.619%
129	S129	Desierto sonoreño de elevaciones medias	Este Sistema desértico transicional ocurre a lo largo del límite del Desierto de Sonora en una franja de baja pendiente de la región Mogollon Rim/Central Highlands entre 750-1300 m. Se localiza en las montañas de Bradshaw, Hualapai y Superstition entre otros rangos desérticos y se encuentra encima de los desiertos Sonoreño Paloverde-Mixed Cacti (CES302.761) y bajo Chaparral Mogollon (CES302.741).	

### 11.5 Localización de pozos en Sonora y Arizona del levantamiento piezométrico

P	E	X	Y	Pr	E	P	E	X	Y	Pr	E
2	S	58	34	5	13	D-18-	A	57	352	1	10
3	S	57	34	4	14	D-23-	A	57	347	7	14
3	S	57	34	4	13	D-22-	A	54	348	1	15
3	S	57	34	4	13	D-16-	A	56	354	2	10
4	S	57	34	2	14	D-18-	A	57	352	2	11
4	S	57	34	5	13	D-22-	A	57	348	4	12
4	S	58	34	6	14	D-21-	A	58	349	3	12
5	S	58	34	7	13	D-21-	A	53	349	1	15
5	S	57	34	4	14	D-20-	A	54	350	4	14
5	S	57	34	4	14	D-23-	A	58	347	1	12
5	S	57	34	3	14	D-18-	A	56	352	2	14
6	S	57	34	2	14	D-21-	A	57	349	5	12
6	S	57	34	4	14	D-23-	A	58	347	3	12
6	S	57	34	3	14	D-19-	A	58	351	6	11
6	S	57	34	3	14	D-24-	A	58	346	1	12
6	S	57	34	3	14	D-23-	A	57	347	7	12
6	S	57	34	3	14	D-23-	A	57	347	4	13
7	S	58	34	6	14	D-22-	A	56	348	1	15
7	S	58	34	5	14	D-22-	A	58	349	5	12
7	S	58	34	9	14	D-19-	A	59	351	8	13
7	S	58	34	4	14	D-21-	A	54	349	3	14
2	S	57	34	7	13	D-23-	A	58	347	5	12
2	S	58	34	3	15	D-18-	A	56	352	8	12
2	S	59	34	1	15	D-18-	A	58	352	1	11
2	S	59	34	2	15	D-18-	A	56	352	7	13
2	S	59	34	6	16	D-22-	A	57	348	6	12
2	S	59	34	2	16	D-21-	A	56	350	6	12
2	S	59	34	6	16	D-21-	A	56	349	9	12

3	S	58	34	4	14	D-17-	A	57	353	1	11
3	S	57	34	4	12	D-17-	A	58	353	1	11
3	S	57	34	2	13	D-21-	A	57	349	2	12
3	S	57	34	3	13	D-22-	A	56	348	1	13
3	S	57	34	1	13	D-20-	A	58	350	1	12
3	S	57	34	5	13	D-21-	A	57	349	9	12
3	S	57	34	7	13	D-17-	A	56	353	4	10
3	S	57	34	4	13	D-21-	A	56	349	1	12
3	S	57	34	6	13	D-22-	A	57	348	1	12
3	S	57	34	1	13	D-17-	A	55	353	1	11
3	S	57	34	6	13	D-21-	A	56	349	1	12
4	S	56	34	5	14	D-22-	A	57	348	1	12
4	S	56	34	6	14	D-23-	A	58	347	1	12
4	S	55	34	4	14	D-22-	A	56	348	1	12
4	S	57	34	1	13	D-22-	A	56	348	1	12
4	S	57	34	8	13	D-21-	A	56	349	9	12
S	S	58	34	8	13	D-21-	A	56	349	7	12
S	S	58	34	7	13	D-22-	A	58	348	1	12
S	S	58	34	2	12	D-21-	A	56	349	7	12
S	S	57	34	1	13	D-22-	A	57	348	1	12
S	S	58	34	2	13	D-21-	A	56	349	1	12

### 11.6 Localización de pozos en Sonora (levantamiento Geoquímico)

Pozo	Propietario	Localización	Y (UTM)	X(UTM)
29	Minerade Cananea	Patos Norte	577514	3433792
30	Minerade Cananea	Patos Sur	574864	3432016
31	Minerade Cananea	Patos Sur	575545	3432103
35	Minerade Cananea	Patos Sur	576305	3432215
38	Minerade Cananea	Patos Sur	576018	3432826
40	Minera de Cananea		577984	3433384
41	Minera de Cananea	Patos Norte	576646	3433430
43	Minera de Cananea	Patos Norte	576943	3434156
47			582486	3438029
50	Ej.EmilianoZapata	Patos Norte	577562	3436186
51			581651	3435705
53			581090	3437265
70	Minerade Cananea	Zona Zaragoza	584482	3438052
71	Minerade Cananea	Zona Arroyo Claro	585956	3440072
75			584313	3442400
383	Ej.JoséM.Morelos	Galera del Pedregón 10	578663	3460835
418	EjidoSanPedro	La Milpona	575389	3453883
483			573483	3453902
Barrilito			572713	3431248
El Texano			574409	3464479

## 11.7 Metadatos del SIG

<i>Figuras</i>	<b>Capas</b>	<b>Fuente Original de los Datos</b> <b>Shapefile o cobertura</b>
<i>Caracterización de Suelos</i>	Sombreado NED Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Tipo de Suelo, AZ	<a href="http://www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/san_pedro">www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/san_pedro</a>
	Tipo de Suelo, MX	Ismael Minjárez (UNISON)
<i>Vegetación Natural</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
		EPA Río San Pedro Basin Browser ( <a href="http://case.nmsu.edu/CASE/SanPedro/gisdata.htm">http://case.nmsu.edu/CASE/SanPedro/gisdata.htm</a> )
<i>Temperatura Media Anual</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Temperatura Media Anual	<a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a>
<i>Temperatura Mínima del Mes más frío</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Temperatura Mínima del Mes más frío	<a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a>
<i>Temperatura Máxima del Mes más Cálido</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ

	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Temperatura Máxima del Mes más cálido	<a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a>
<i>Precipitación Media Anual (mm)</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Precipitación Media Anual	<a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a>
<i>Precipitación Media Mensual, Enero (mm)</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Precipitación de Enero	<a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a>
<i>Precipitación Media Mensual, Agosto (mm)</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y UNISON
	Precipitación de Agosto	<a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a>
<i>Drenaje Superficial, Orden 1- 7</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Drenajes Principales, Orden	Hans Huth, ADEQ

	4 - 7	
<i>Porcentaje de Pendiente (%)</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Porcentaje de Pendiente (%)	ned.usgs.gov
<i>Cobertura de Suelo</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Cobertura de Suelo	fwscase12.nmsu.edu/SanPedro/data/SPCART_Landcover2.htm
<i>Propiedad de Suelo</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y UNISON
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ Para U.S.: Arizona State Land Dept, Arizona Land Resource Information System
	Propiedad de Suelo	Para Mex: Ismael Minjárez, UNISON
<i>Geología</i>	Geología	Francisco Grijalva, Floyd Gray, Ismael Minjárez and Rogelio Monreal
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y UNISON
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
<i>Profundidad de Basamento (km)</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Profundidad de Basamento (km)	USGS Open-File Report 2000-138 por Gettings and Houser
<i>Residual</i>	Residual	Francisco Grijalva, UNISON
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files

	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
<i>Mapas de Resistividad a Diferentes Elevaciones</i>	Mapas de Resistividad a Diferentes Elevaciones	
		Francisco Grijalva, UNISON
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
<i>Ubicación de Pozos</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Pozos	Minjárez, 2011 (UNISON); ADWR Groundwater Site Inventory y USGS National Water Information System
<i>Hidrogramas</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Hidrogramas	Minjárez, 2011 (UNISON); ADWR Groundwater Site Inventory y USGS National Water Information System
<i>Profundidad del Nivel Estático (m)</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Profundidad del Agua (m)	gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx
	Profundidad del Agua (m), MX	Minjárez, 2011 (UNISON)
	Configuración de la Profundidad del Agua	Elia M. Tapia (UNISON)
<i>Elevación del Nivel Estático (m)</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ

	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y UNISON
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Elevación del Agua (m)	gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx
	Elevación del Agua (m), MX	Minjárez, 2011 (UNISON)
	Configuración de la Elevación del Agua	Elia M. Tapia (UNISON)
<i>Capacidad Específica</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Capacidad Específica	Brown et al., 1966
<i>Transmisividad</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Transmisividad	Digitalizado por la UNISON, tomado de Pool y Dickinson, 2007.
<i>Sondeos Geoquímicos</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y Minjárez, 2011 (UNISON)
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx; Minjárez, 2011 (UNISON)
	Sondeos Geoquímicos	Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Temperatura del Agua Subterránea</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y UNISON
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Drenaje Principal	Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;

	Pozo, Temperatura ©	Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>pH del Agua Subterránea</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y UNISON
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
<i>Alcalinidad del Agua Subterránea</i>	Drenaje Principal	Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx; Minjárez, 2011 (UNISON)
	Pozo, pH	Hans Huth, ADEQ
		WRRC/Project NEMO y UNISON
		WRRC/Project NEMO files
		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;
		Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Conductividad Específica</i>		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ
		WRRC/Project NEMO y UNISON
		WRRC/Project NEMO files
		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;
		Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Concentración de Na</i>		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ
		WRRC/Project NEMO y UNISON
		WRRC/Project NEMO files
		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;
		Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Concentración de Ca</i>		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ
		WRRC/Project NEMO y UNISON
		WRRC/Project NEMO files
		Hans Huth, ADEQ

		Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;
		Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Concentración de Mg</i>		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ
		WRRC/Project NEMO y UNISON
		WRRC/Project NEMO files
		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;
		Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Concentración de K</i>		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ
		WRRC/Project NEMO y UNISON
		WRRC/Project NEMO files
		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;
		Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Concentración de Cl</i>		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ
		WRRC/Project NEMO y UNISON
		WRRC/Project NEMO files
		Hans Huth, ADEQ
		Hans Huth, ADEQ
		GWSI WQ reports,; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx; Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Concentración de SO4</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ
	Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y UNISON
	Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
	Cananea	Hans Huth, ADEQ
	Drenaje Pricipal	Hans Huth, ADEQ, GWSI WQ reports; gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;
	Pozo, Concentración de SO4	Minjárez, 2011 (UNISON)
<i>Concentración de HCO3</i>	Sombreado NED	Hans Huth, ADEQ
	Río San Pedro	Hans Huth, ADEQ

Límite del Área de Estudio	WRRC/Project NEMO y UNISON
Poblaciones Aledañas (>Pob. 1000)	WRRC/Project NEMO files
Cananea	Hans Huth, ADEQ
Drenaje Pricipal	Hans Huth, ADEQ GWSI WQ reports;
Pozo, Concentración de HCO3	gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx;Minjárez, 2011 (UNISON)