



**EL COLEGIO
DE SONORA**

**REUSO DEL AGUA.
UN ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD EN LOCALIDADES DEL RÍO
SONORA**

**Tesina para obtener el diploma de
Especialidad en Gestión Integrada
de Cuencas Hidrológicas**

**Presenta
Jesús Policarpo Leyva Martínez**

**Director
Dr. José Luis Moreno Vázquez**

Hermosillo, Sonora

Enero de 2007

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y CONCEPTOS BÁSICOS	3
	Antecedentes	3
	Objetivo general	4
	Objetivos específicos	4
	Conceptos básicos	4
III.	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	8
	Cuenca del río Sonora	8
	Hidrografía	9
	Fisiografía	12
	Clima	12
	Precipitación	12
	Información socioeconómica	13
	Agricultura y vegetación	14
IV.	CONTROL HIDROMÉTRICO	15
	Estación hidrométrica El Orégano	15
	Estación hidrométrica El Cajón	16
	Sistema de presas del río Sonora	18
	Presas Rodolfo Félix Valdez (El Molinito)	19
	Presas Abelardo Rodríguez Luján	20
V.	DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO SONORA	22
	Análisis de disponibilidad según NOM-011-CNA-2000	23
	Análisis de disponibilidad según el Modelo matemático de oferta-demanda de agua	26
VI.	CARACTERIZACIÓN Y EFECTOS DE LA SEQUÍA	29
	Análisis de la sequía	29
	Resultados del análisis del SPI	30
	Efectos de la sequía	32
	Impactos en la agricultura	32
	Sistemas de riego presurizado	34
	Eficiencia de riego	35
	Impactos en la ganadería	37
	Impactos al medio ambiente	38

VII.	DIAGNÓSTICO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO	41
	Aconchi, Sonora	42
	Arizpe, Sonora	46
	Bacoachi, Sonora	50
	Banámichi, Sonora	52
	Baviácora, Sonora	54
	Huépac, Sonora	57
	San Felipe de Jesús, Sonora	59
	Ures, Sonora	61
VIII.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
	Aguas tratadas y mitigación de los impactos al medio ambiente	66
	Gasto ecológico	66
	Reforestación	67
	Aguas tratadas y mitigación de los impactos en la agricultura	68
	Cultivo de maguey	68
	Otros cultivos	70
	Aguas tratadas y mitigación de los impactos en la ganadería	71
	BIBLIOGRAFÍA	74

ÍNDICE DE CUADROS

1	Población económicamente activa en RH-09, Sonora Sur	14
2	Escurrecimientos anuales en la estación El Orégano, 1942-2002	16
3	Escurrecimientos anuales en la estación El Cajón, 1974-2002	17
4	Almacenamiento histórico mínimo. Presa Abelardo Rodríguez	20
5	Uso consuntivo del recurso hídrico en la cuenca del río Sonora	22
6	Clasificación de disponibilidad de la cuenca del río Sonora	25
7	Determinación del volumen de consumo directo	27
8	Valores convencionales para sequía según el SPI	29
9	Valores mínimos de SPI para diferentes períodos a partir del año 1995	30
10	Uso del suelo en el estado de Sonora	39
11	Calidad del agua del sistema de lagunas de Aconchi	43
12	Datos de diseño de una laguna facultativa para la localidad de Aconchi, Sonora	44
13	Análisis del efluente del sistema de tratamiento de Arizpe	48
14	Parámetros de diseño de la laguna facultativa para Arizpe, Sonora	49
15	Datos para el diseño de la laguna	51
16	Datos de diseño de una laguna facultativa para la localidad de Banámichi, Sonora	53
17	Datos de diseño de una laguna facultativa para la localidad de Baviácora, Sonora	56
18	Datos de diseño de una laguna facultativa para Huépac, Sonora	58
19	Datos de diseño para la construcción de lagunas en San Felipe de Jesús, Sonora	60
20	Datos de diseño para la construcción de lagunas en Ures, Sonora	62
21	Concentración de coliformes fecales en el río Sonora, 1989-1996	65
22	Productividad estimada en el cultivo de maguey	69
23	Productividad estimada en otros cultivos	71

ÍNDICE DE FIGURAS

1	Localización de la cuenca del río Sonora	9
2	Cuenca del río Sonora	11
3	Comportamiento de las precipitaciones en la cuenca alta del río Sonora, 1968-2005	13
4	Escurrimientos anuales en la estación El Orégano, 1942-2002	15
5	Escurrimientos anuales en la estación El Cajón, 1974-2002	17
6	Sistema de presas del río Sonora	18
7	Evolución del almacenamiento de la presa El Molinito, 1993-2006	19
8	Evolución del almacenamiento de la presa Abelardo Rodríguez, 1952-2006	21
9	Esquema de interconexión de las subcuencas del río Sonora	24
10	Esquema de interconexión de las subcuencas del río Sonora y principales resultados	25
11	Resultados del SPI al mes de diciembre de 2005, 36 meses	31
12	Resultados del SPI al mes de diciembre de 2005, 48 meses	31
13	Superficie agrícola sembrada en la cuenca del río Sonora, 1993-2005	32
14	Volumen de producción agrícola en la cuenca del río Sonora, 1986-2005	33
15	Valor de la producción en la cuenca del río Sonora, 1992-2005	33
16	Evolución de la superficie con sistemas de riego presurizado en la cuenca del río Sonora	35
17	Volumen de agua aplicado en la actividad agrícola de la cuenca del río Sonora, 1994-2005	37
18	Inventario ganadero en la cuenca del río Sonora, 1988-2004	38
19	Degradación de la cobertura vegetal en el estado de Sonora	40
20	Lagunas de oxidación de Arizpe, Sonora	47
21	Descargas de Bacoachi, Sonora	50
22	Descargas de Banámichi, Sonora	52
23	Huépac, Sonora	57
24	Concentración de coliformes fecales en el río Sonora	65

FOTOS

Foto 1	Lagunas de oxidación de Aconchi, Sonora	43
Foto 2	Lagunas de oxidación de Arizpe, Sonora	48
Foto 3	Laguna de la comunidad de Banámichi, Sonora	53
Foto 4	Laguna de oxidación de Baviácora, Sonora	55
Foto 5	Efluente de la laguna de oxidación de Baviácora	55
Foto 6	Laguna de oxidación de San Felipe de Jesús	60

I

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la solución a los problemas del agua se ha centrado en acciones y proyectos encaminados al incremento de la oferta del recurso hídrico, dirigiendo los esfuerzos a la construcción de captaciones superficiales o a la explotación de las aguas subterráneas para satisfacer los requerimientos de las actividades productivas.

Por otra parte, motivados por la situación de sequía que afecta al estado de Sonora, se han establecido programas e incentivos de ahorro o uso eficiente del agua y la energía, pero como respuesta a la escasez y no con un enfoque ambientalista o de aprovechamiento sustentable del recurso. En la agricultura, por ejemplo, se han realizado grandes inversiones para mejorar la eficiencia de conducción, con el revestimiento o entubado de canales, y se ha modificado el patrón de cultivos a otros más redituables económicamente, pero que consumen igual o más cantidad de agua.

Bajo ese enfoque, hemos “recuperado” volúmenes importantes de agua, pero a la vez hemos “perdido” o interrumpido su flujo natural en la cuenca, situación que podemos visualizar en la pérdida de cobertura vegetal y erosión de los suelos. Ambas formas de impacto ambiental alteran el régimen de circulación y la calidad de las aguas.

Si revisamos cualquier forma esquemática del ciclo hidrológico, nos daremos cuenta que el agua se usa, no se consume. Es decir, más de 80 por ciento del agua distribuida retorna al ciclo, entonces nos preocupamos por la parte del suministro, de la “oferta”, y nos olvidamos del saneamiento, que es el comienzo de un nuevo abastecimiento aguas abajo o simplemente es la fuente de vida de un ecosistema.

De esta manera, usar menos agua o de manera eficiente debe plantearse desde el punto de vista de saneamiento y de la gestión integrada del recurso; es decir, nuestras acciones también deben encaminarse a la conservación del suelo y la vegetación, siendo de

notable interés la conservación de la vegetación de ribera ya que, además de aumentar la biodiversidad, funciona como filtro de retención de nutrientes y de numerosos contaminantes.

El desarrollo sostenido o sostenible de los recursos naturales que establece la normativa ambiental, debe ser aquel que compatibilice los usos con la conservación de los ecosistemas.

Consideramos que la solución a los problemas del agua deberá iniciar con la gestión de la demanda y de la gestión integrada del recurso hídrico, fomentando programas que tengan como fin:

- ☞ Reducir el gasto de agua, disminuyendo su consumo o reciclando al máximo el suministro.
- ☞ Extraerla con el menor deterioro posible de los ecosistemas, es decir, dejando una parte para el desarrollo normal de ríos, humedales y acuíferos subterráneos.
- ☞ Devolverla a las aguas naturales en condiciones aceptables para que el impacto sobre los ecosistemas sea mínimo.
- ☞ Depurarla o descontaminarla con un mínimo gasto energético e impacto ecológico.

II

ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y CONCEPTOS BÁSICOS

ANTECEDENTES

Un factor determinante en el desarrollo económico y social de cualquier país es garantizar la disponibilidad de agua. La cantidad de recursos hídricos disponibles en una cuenca o región hidrológica es variable, y cambia dependiendo, principalmente, del clima y de las posibilidades de obtener cantidades adicionales de agua, con la construcción de obras. Pero no se debe olvidar que las acciones o decisiones que se tomen en una parte de la cuenca, afectarán a otros usuarios aguas abajo.

El agua puede obtenerse de fuentes convencionales como son las aguas superficiales o las subterráneas (una u otra según factores económicos). Existen también fuentes no convencionales, como son aguas de mar, salobres y residuales tratadas.

En áreas o regiones áridas o semiáridas como la nuestra, donde el recurso es escaso y la demanda aumenta por encima de la oferta, las aguas residuales tratadas pueden representar un recurso adicional que ayude a superar el déficit hídrico, utilizándolas de manera eficaz en la agricultura, la industria o la recarga de acuíferos.

La descarga de aguas residuales se considera como un componente propio del ciclo hídrico, ya que ha sido una práctica habitual, desde hace tiempo, el verter aguas residuales a los cauces naturales, donde se diluyen con el caudal circulante para después volverlos a reutilizar aguas abajo.

En este trabajo se analiza la factibilidad de reutilizar, de manera directa o indirecta, los afluentes de agua residual de las localidades ubicadas en las márgenes del río Sonora, en respuesta a las crecientes exigencias sanitarias y ambientales sobre la calidad de las aguas de dicho río; y principalmente, a las condiciones de escasez en la región, donde se están volviendo insuficientes las fuentes de abastecimiento tradicionales para afrontar la

demanda que se crea al aumentar la población, las limitaciones ambientales para construir nuevos embalses y las sequías plurianuales.

En la primera parte del documento se analiza la disponibilidad y requerimientos de agua en la cuenca, así como los efectos derivados de la escasez y la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento. En la segunda se analizan las condiciones de operación de la infraestructura de tratamiento existente en las localidades del río Sonora, para finalmente valorar los requerimientos de agua en los diferentes usos y determinar la factibilidad de reuso de las aguas residuales generadas en las localidades de Aconchi, Arizpe, Bacoachi, Banámichi, Baviácora, Huépac y Ures.

OBJETIVO GENERAL

Revisar y analizar las condiciones de operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales de las localidades del río Sonora; cuantificar los requerimientos para los diferentes usos en la zona y determinar la factibilidad de reuso de aguas residuales tratadas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ☞ Analizar la oferta del recurso hídrico en la cuenca del río Sonora considerando los lineamientos NOM-011-CNA-2000, “Conservación del recurso agua- que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”.
- ☞ Analizar la demanda de agua considerando la metodología del Modelo matemático de oferta-demanda de agua.
- ☞ Revisar las condiciones de operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales y determinar la factibilidad de reuso de aguas tratadas en proyectos productivos.

CONCEPTOS BÁSICOS

Antes de abordar aspectos relacionados con la factibilidad de reuso de aguas residuales y de la gestión integrada del recurso hídrico, conviene señalar algunos de los conceptos básicos que se encuentran definidos en el artículo 3 de la Ley de Aguas Nacionales (2004).

Cuenca hidrológica:

Es la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas –aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad–, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aún sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con estos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y éstas últimas están integradas por microcuencas.

De esta manera, concluimos que las cuencas sirven para numerosos tipos de gestión de elementos y recursos naturales, sobre todo el agua, pero también para todos los que coexisten en ella y sus zonas de influencia.

Gestión integrada de los recursos hídricos:

Proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con estos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. Dicha gestión está íntimamente vinculada con el desarrollo sustentable. Para la aplicación de esta Ley en relación con este concepto se consideran primordialmente agua y bosque.

Desarrollo sustentable:

[...] en materia de recursos hídricos, es el proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter hídrico, económico, social y ambiental, que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se fundamenta en las medidas necesarias para la preservación del equilibrio hidrológico, el aprovechamiento y protección de los recursos hídricos, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de agua de las generaciones futuras.

Aquí lo importante a considerar es que, la gestión integrada de cuencas debe incorporar el total de su territorio y las zonas costeras para obtener resultados efectivos, dado que el equilibrio de toda la cuenca depende del equilibrio de sus cuencas menores.

Por otra parte, el desarrollo económico de los últimos años ha sido ampliamente cuestionado por su fuerte impacto en el equilibrio ecológico y en la estabilidad social. La búsqueda del desarrollo sustentable ha llevado a discutir nuevas formas de enfrentar los retos de la conservación ambiental, del desarrollo social, económico y su vinculación con la calidad de vida de toda la población.

Actualmente se acepta la inclusión de tres parámetros básicos en actividades o proyectos que se asuman como sustentables:

- a. Un manejo ambiental de los recursos naturales que garantice su uso y beneficios permanentes.
- b. Una participación directa y en igualdad de condiciones en la planificación y toma de decisiones de todos los sectores sociales, especialmente las comunidades rurales de pequeños productores.
- c. Una rentabilidad económica que permita una condición de vida digna para todos los actores sociales.

El problema de la gestión del agua en la cuenca del río Sonora radica en la gran demanda del recurso y la merma de las fuentes superficiales y subterráneas utilizadas para el abastecimiento. Esta situación se ha agravado tras más de una década de sequía, requiriendo de la acción de los tres niveles de gobierno para solucionarla. Lo anterior ha determinado que el tema de la disponibilidad de agua se convierta en un tema político.

Además, se podría argumentar que la poca disponibilidad de agua y la imposibilidad de cultivar, ha derivado en una desvalorización de la tierra rural generándose patrones de migración campo-ciudad, que han contribuido en el aumento de la pobreza urbana y que, potencialmente, son también detonadores de conflictos sociales.

Así, podemos concluir que la gestión integrada del recurso hídrico es compleja, debido a que alude a dimensiones técnicas, sociales, culturales y políticas, reclamando para su análisis un enfoque interdisciplinario.

III

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

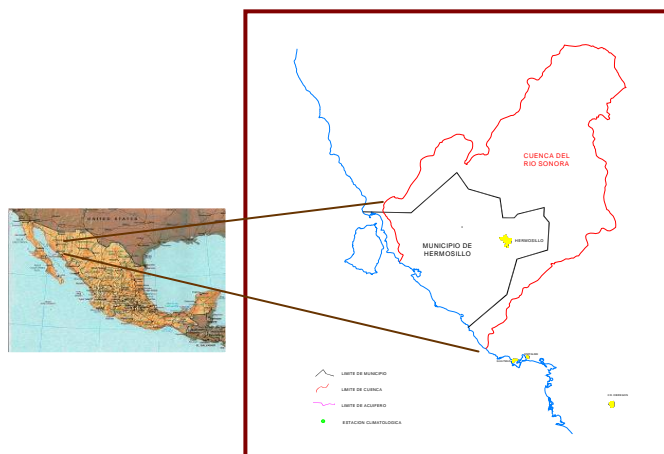
CUENCA DEL RÍO SONORA

La cuenca del río Sonora ocupa el tercer lugar en la región Noroeste en cuanto a extensión y magnitud de aportaciones (véase figura 1). En ella se generan los escurrimientos que capta el sistema de presas del río Sonora, que en conjunto tiene capacidad para almacenar 369.5 millones de metros cúbicos (Mm^3), sin incluir la presa Teópari, los cuales se destinan para uso urbano e industrial, casi en su totalidad. La red de drenaje que da lugar al río Sonora conduce los escurrimientos superficiales de varias subcuencas aportadoras y recarga a los acuíferos aluviales intermontanos, depositados en las zonas de cauce de cada una de las subcuencas.

En su trayectoria hacia el mar, aguas arriba de la presa Abelardo Rodríguez Luján, el río Sonora es fuente de abastecimiento de las poblaciones que se han establecido en sus márgenes.

La ciudad de Hermosillo, capital del estado de Sonora, no habría experimentado el desarrollo urbano que muestra en la actualidad sin la presencia de los recursos hidráulicos, tanto superficiales como subterráneos, que continuamente han sido provistos por el río Sonora. De igual manera, el desarrollo agrícola de la planicie costera de Hermosillo, depende totalmente del acuífero que la subyace.

Figura 1
Localización de la cuenca del río Sonora



HIDROGRAFÍA

La corriente principal de la zona es el río Sonora, el cual ocupa el tercer lugar en la región en cuanto a extensión de cuenca y magnitud de aportaciones, que se almacenan y regularizan en las presas Rodolfo Félix Valdez (El Molinito) y Abelardo Rodríguez Luján; hasta ésta última se tiene un área de captación de 20 900 km². Su cuenca colinda por el norte con la del río San Pedro, que se origina en territorio mexicano y fluye hacia los Estados Unidos de América; por el norte y oriente colinda con las cuencas de los ríos Bavispe y Moctezuma, afluentes del Yaqui; por el sureste con el río Mátape y el arroyo de La Bandera; por el noroeste con la cuenca del río Asunción y por el suroeste con la del río Bacoachi.

La topografía de su cuenca es accidentada, salvo en su cuenca baja y en la de su afluente, el río Zanjón. Su cuenca alta es rica en yacimientos minerales y la principal explotación se localiza cerca de los orígenes de la corriente, en la zona de Cananea, Sonora, donde se extrae cobre principalmente; los yacimientos se prolongan hacia el sur a lo largo de la Sierra El Manzanal, que divide al río Sonora de su afluente Bacanuchi y en ella existen yacimientos de oro, plata, cobre y zinc, tanto en la margen derecha del río Bacanuchi como en la izquierda del río Sonora, hasta las cercanías de Sinoquipe, Sonora.

Aguas abajo de la presa Abelardo Rodríguez Luján, el río fluye por zonas planas hasta su desemboque en el estero Tastiota del Golfo de California. En este último tramo su curso es indefinido y los escasos volúmenes que escurren, por lo general, se infiltran en las zonas arenosas antes de llegar a su desembocadura.

Los principales afluentes del río Sonora, en la zona baja, son el arroyo La Manga por la margen derecha y los arroyos La Poza y El Bajío por la izquierda, que cruzan el Distrito de Riego 051 Costa de Hermosillo, donde se utilizan sus aguas antes de que descarguen en el colector general. A lo largo del río Sonora se efectúan aprovechamientos para riego de sus márgenes en terrenos localizados aguas arriba de la presa El Molinito, cerca de Ures y entre las poblaciones de Banámichi y Mazocahui. En las márgenes del río San Miguel existen pequeñas obras de riego, especialmente en la zona de Llano Grande, en San Miguel de Horcasitas y desde Zamora hasta la presa Abelardo Rodríguez; en las del río El Zanjón, afluente del San Miguel, se localizan aprovechamientos para riego en varias zonas, en especial en Querobabi, Sonora.

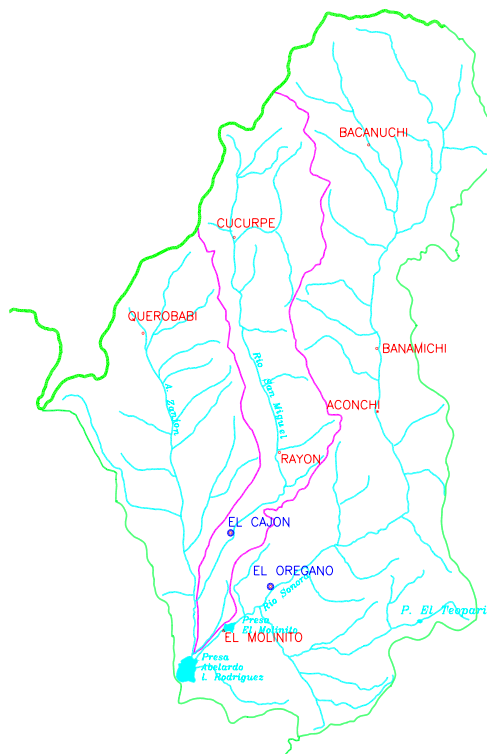
A partir de la confluencia del río San Miguel con el Sonora, se extiende una amplia zona rica en aguas subterráneas que se utilizan mediante pozos profundos en el Distrito de Riego 051, Costa de Hermosillo. Las aguas de la presa Abelardo Rodríguez en sus orígenes se utilizaban para el riego de terrenos dentro del mencionado Distrito, pero actualmente abastecen de agua potable a la ciudad de Hermosillo, además de incrementar la recarga de acuíferos y regularizar avenidas.

El río Sonora tiene sus orígenes en el parteaguas con el río Bavispe, a una elevación de 2 400 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la Sierra de Magallanes, a 32 km al oriente de Cananea, Sonora. Su rumbo general en la cuenca alta es hacia el sur, donde recibe como único afluente de importancia al río Bacanuchi, el que se origina en el parteaguas con el arroyo Cocóspera de la cuenca del río Magdalena, a una elevación de 2 480 msnm y que confluye por la margen derecha al río Sonora, aguas abajo de Tahuichopa, Sonora y a 780 msnm de elevación.

Aguas arriba de Ures confluyen, por la margen derecha e izquierda del río Sonora, los arroyos Zolibiate y La Salada. Aguas abajo y a una elevación de 270 msnm se une por la margen izquierda el arroyo La Junta, el que tiene su origen a una elevación de 1 700 msnm, en el parteaguas con el río Moctezuma de la cuenca del río Yaqui. Sigue su rumbo general hacia el oriente y aguas abajo de esta confluencia, aproximadamente a 3.5 km, se encuentra la estación hidrométrica El Orégano, en la que se ha observado un escurrimiento medio anual de 113.5 Mm³.

A la altura de la presa Abelardo Rodríguez, confluye con el río Sonora el San Miguel, su aportador más importante, cuya cuenca tiene un área de 8 427 km², que representa 40 por ciento del área drenada hasta la presa; tiene sus orígenes en el parteaguas con el arroyo Cocóspera, en la Sierra Azul, a una elevación de 1 200 msnm y su curso general es hacia el sur, el que descarga por su margen derecha, aguas arriba del sitio en que se localiza la cortina de la presa.

Figura 2
Cuenca del río Sonora



FISIOGRAFÍA

La cuenca del río Sonora se localiza principalmente en la provincia fisiográfica denominada Provincia Sierras Sepultadas, aunque la porción oriental de la cuenca queda comprendida en la Provincia Sierra Madre Occidental.

CLIMA

De acuerdo a la clasificación utilizada por Köeppen, modificada por García (1964), en la región domina el tipo de clima BW(h') hw(x'), el cual corresponde a B, grupo de climas secos; BW, subtipo muy seco o desértico; (h')h, con clima cálido, temperatura media anual mayor a 22 °C, la del mes más frío menor a 18 °C; y w(x'), régimen de lluvias en verano, pero con un porcentaje de lluvias invernales menor a 10.2 por ciento con respecto al anual.

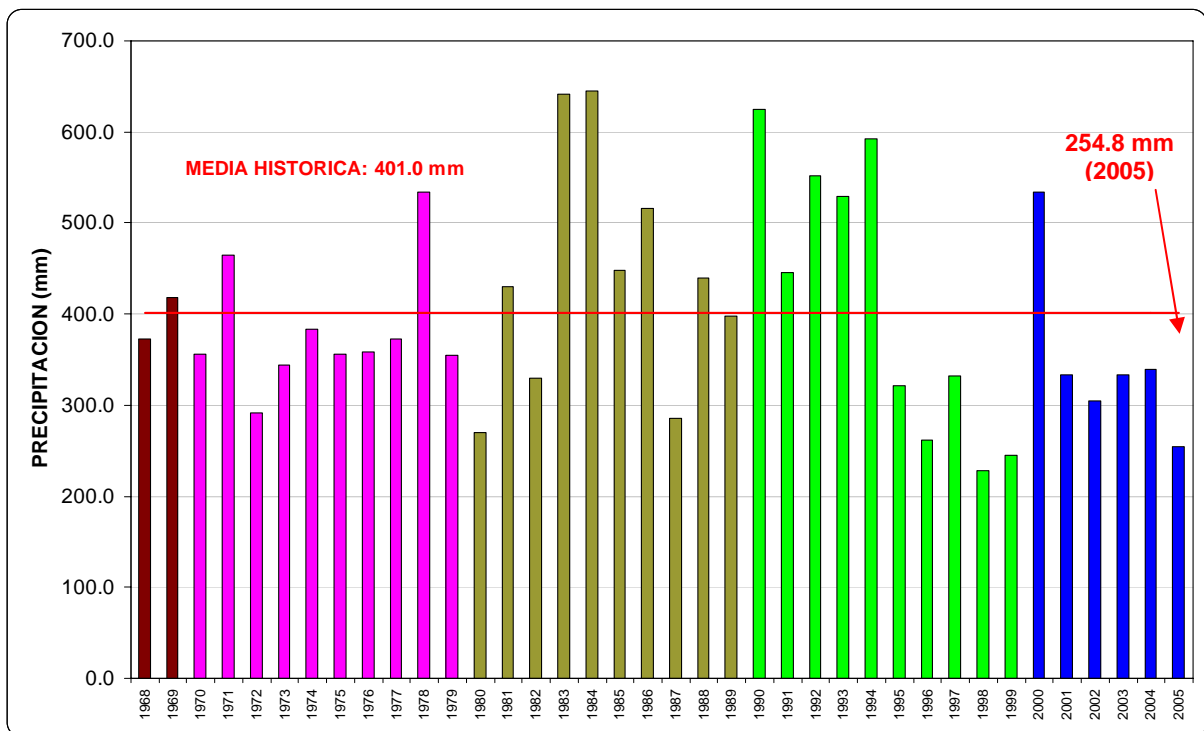
PRECIPITACIÓN

Dentro de la cuenca del río Sonora, la zona de menor precipitación se localiza en la porción occidental, hacia la planicie costera, donde el valor medio de precipitación anual es de 221.2 mm, en la Costa de Hermosillo. En la parte oriental, los valores de precipitación se incrementan y en la estación Mazocahui se alcanza un promedio anual de 568.7 mm.

El régimen pluvial en esta cuenca es variable, pero de manera general presenta dos períodos de ocurrencia: uno entre los meses de julio a septiembre, en el que se registran los valores más altos y otro que abarca de diciembre a febrero, cuando las precipitaciones son considerablemente menores. La precipitación media anual en la cuenca del río Sonora es de 311.3 mm; mientras que en la cuenca alta, donde se generan los escurrimientos que reciben las presas de almacenamiento, se tiene una precipitación media de 401.0 mm anuales.

En la figura 3 se observa que desde 1995, a excepción de 2000, las precipitaciones han estado por debajo de la media histórica, y durante 1998 la precipitación media fue de 228.1 mm, la más baja del registro histórico; durante 2005 se registró una precipitación acumulada de 254.8 mm.

Figura 3
Comportamiento de las precipitaciones en la cuenca alta del río Sonora, 1968-2005



Fuente: Red hidrométrica y climatológica. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

INFORMACIÓN SOCIOECONÓMICA

La población en la cuenca del río Sonora es de 681 502 habitantes; sin embargo, las incesantes corrientes migratorias internas, que tienen como lugar de destino las principales poblaciones de la entidad, ocasionó que entre 1970 y 2005, disminuyera la población de la región serrana, generándose con esto problemas de marginalidad urbana en los más importantes núcleos de población.

En lo que respecta al comportamiento del empleo, es necesario partir del examen de la población total, a fin de distinguir a los grupos de individuos que, por sus características, pueden desempeñar alguna actividad económica remunerada de aquellos que no están en posibilidad de hacerlo.

La población económicamente activa (PEA) en 2005 ascendía a 263 633 personas, que equivalen a 31 por ciento respecto del total estatal.

Cuadro 1
Población económicamente activa en RH-09, Sonora Sur

Cuenca	Población total	PEA	% respecto PEA total
Sonora	681 502	263 633	31.0
Mátape	185 796	67 934	7.9
Yaqui	608 754	215 520	25.3
Mayo	349 584	111 357	13.1
Total	1 825 636	658 444	77.4

Fuente: Segundo conteo de población y vivienda (INEGI 2005).

AGRICULTURA Y VEGETACIÓN

En la cuenca del río Sonora es importante el alto nivel tecnológico agrícola que mantiene, ya que cuenta con varias presas de abastecimiento, gran número de pozos profundos, infraestructura para riego, implementos mecanizados para las labores, utilización de fertilizantes, pesticidas y semillas mejoradas. Además, las buenas condiciones agrológicas donde se ubican las áreas de riego, con extensos terrenos de llanuras aluviales, con suelos profundos y con buen drenaje favorecen el desarrollo de una amplia gama de cultivos, entre los que destacan: trigo, algodón, cártamo, sandía, ajonjolí, garbanzo, sorgo, maíz y vid.

Las áreas de temporal, por el contrario, son escasas y dispersas, se practica en terrenos de la Sierra Madre Occidental, en donde las condiciones de aridez no son tan marcadas y representan 3.5 por ciento de la superficie cosechada. Los principales cultivos de temporal son: maíz, forrajes (en donde sobresale el zacate *buffel*), frijol, sorgo, ajonjolí y algunos frutales.

En cuanto a vegetación, se presentan diferentes tipos de matorrales xerófilos (palo fierro, gobernadora y jojoba), matorral subtropical, selva baja caducifolia, pastizales naturales y los bosques de encino y de coníferas. La explotación de estos recursos en la entidad es importante; una de las especies más utilizadas es el mezquite, cuyo volumen de madera para la elaboración de carbón vegetal representa una valiosa fuente de ingreso.

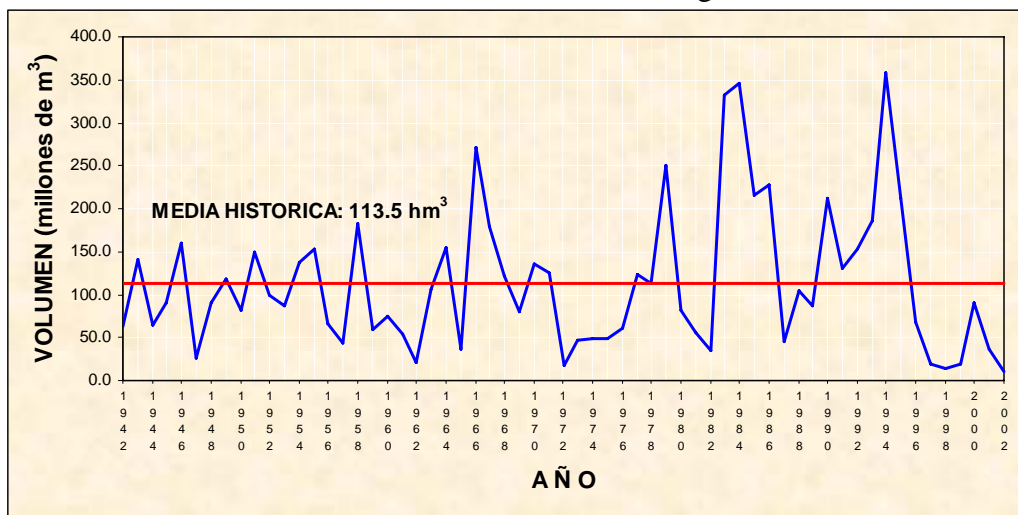
IV CONTROL HIDROMÉTRICO

Un factor determinante en el manejo y gestión del agua es la cuantificación del recurso, la medición de la magnitud de los escurrimientos en la cuenca del río Sonora se realiza en las estaciones hidrométricas El Orégano, sobre el río Sonora y aguas arriba de la presa El Molinito, y El Cajón, sobre el río San Miguel.

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA EL ORÉGANO

La estación hidrométrica El Orégano, instalada en 1942, tuvo como objetivo aforar los escurrimientos del río Sonora, su registro histórico fue de gran utilidad para el diseño hidrológico de la presa El Molinito. Se localizó originalmente a 38 km al noroeste de Hermosillo, en una sección actualmente inundada por el vaso de la presa El Molinito, motivo por el cual se reubicó aguas arriba, denominándose El Orégano II. Según el registro histórico de las estaciones El Orégano y El Orégano II se tiene un escurrimiento medio anual de 113.5 Mm^3 . Los escurrimientos anuales, durante el período 1942-2002, se muestran en la figura 4 y en el cuadro 2. En la gráfica es posible observar que a partir de 1996 han sido escasos, encontrándose por debajo de su media histórica.

Figura 4
Escurreimientos anuales en la estación El Orégano, 1942-2002



Fuente: Red hidrométrica. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

Cuadro 2
Escurrimientos anuales en la estación El Orégano, 1942-2002

Año	Volumen (Mm ³)	Año	Volumen (Mm ³)
1942	63.05	1973	46.27
1943	140.50	1974	48.92
1944	63.90	1975	48.84
1945	90.97	1976	60.79
1946	160.28	1977	123.56
1947	26.79	1978	112.82
1948	90.53	1979	250.27
1949	117.91	1980	81.37
1950	81.73	1981	56.75
1951	149.96	1982	34.47
1952	99.40	1983	331.67
1953	86.89	1984	346.30
1954	137.62	1985	215.13
1955	152.59	1986	227.11
1956	65.58	1987	45.11
1957	43.73	1988	104.13
1958	182.12	1989	87.75
1959	58.41	1990	211.82
1960	74.48	1991	131.07
1961	53.08	1992	153.38
1962	20.94	1993	186.59
1963	105.46	1994	359.12
1964	154.06	1995	212.12
1965	36.33	1996	68.44
1966	270.67	1997	18.78
1967	179.63	1998	14.52
1968	121.42	1999	19.41
1969	80.24	2000	89.95
1970	134.91	2001	37.03
1971	125.51	2002	12.66
1972	16.57	E. Medio	113.50

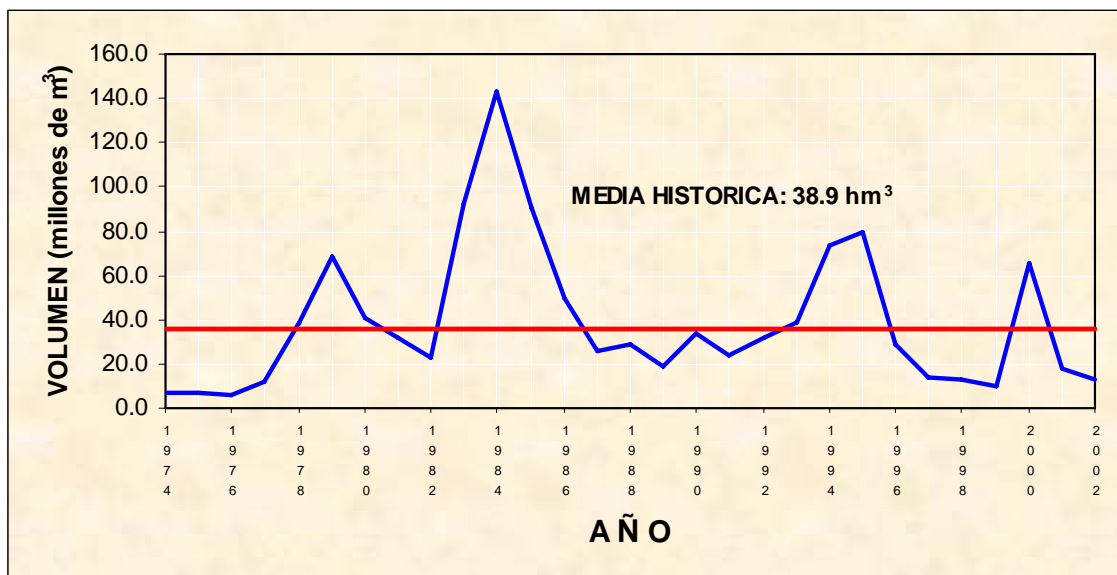
Fuente: Red hidrométrica. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

ESTACIÓN HIDROMÉTRICA EL CAJÓN

La estación hidrométrica El Cajón, instalada en 1974, cuantifica las aportaciones del río San Miguel, que es el principal afluente del río Sonora por su margen derecha. El escurrimiento medio anual registrado es de 38.9 Mm³. En la figura 5 y cuadro 3, se muestran los escurrimientos anuales durante el período 1974-2002, se puede observar que a

partir de 1996 han estado por debajo de su media histórica, con un ligero repunte en 2000, ocasionado por un evento climatológico extraordinario.

Figura 5
Escurrecimientos anuales en la estación El Cajón, 1974-2002



Fuente: Red hidrométrica. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

Cuadro 3
Escurrecimientos anuales en la estación El Cajón, 1974-2002

Año	Volumen (Mm ³)	Año	Volumen (Mm ³)
1974	7.43	1989	19.29
1975	6.61	1990	33.75
1976	6.16	1991	23.42
1977	11.87	1992	32.03
1978	39.19	1993	38.37
1979	68.44	1994	73.58
1980	41.18	1995	79.37
1981	31.80	1996	28.78
1982	22.71	1997	13.94
1983	92.55	1998	13.10
1984	143.16	1999	9.50
1985	90.69	2000	65.37
1986	50.06	2001	18.23
1987	25.95	2002	13.16
1988	29.12	E. Medio	38.92

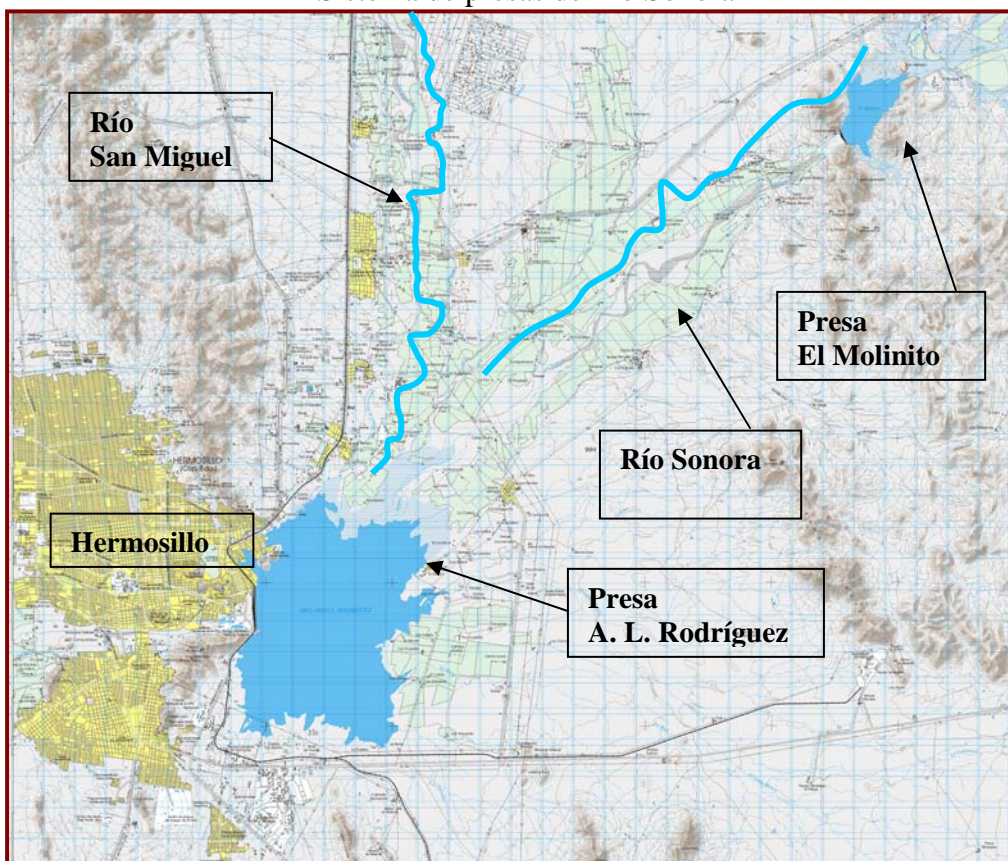
Fuente: Red hidrométrica. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

En ambas estaciones se observa que los escurrimientos, en los últimos años, han sido mínimos, lo que indica la existencia de una sequía hidrológica, que se ve reflejada en los almacenamientos registrados en el sistema de presas del río Sonora.

SISTEMA DE PRESAS DEL RÍO SONORA

La cuenca del río Sonora cuenta con dos presas principales para el almacenamiento y control de avenidas: Rodolfo Félix Valdez (El Molinito) y Abelardo Rodríguez Luján. En la figura 6 se presenta la distribución de los ríos y presas de la cuenca en el municipio de Hermosillo.

Figura 6
Sistema de presas del río Sonora

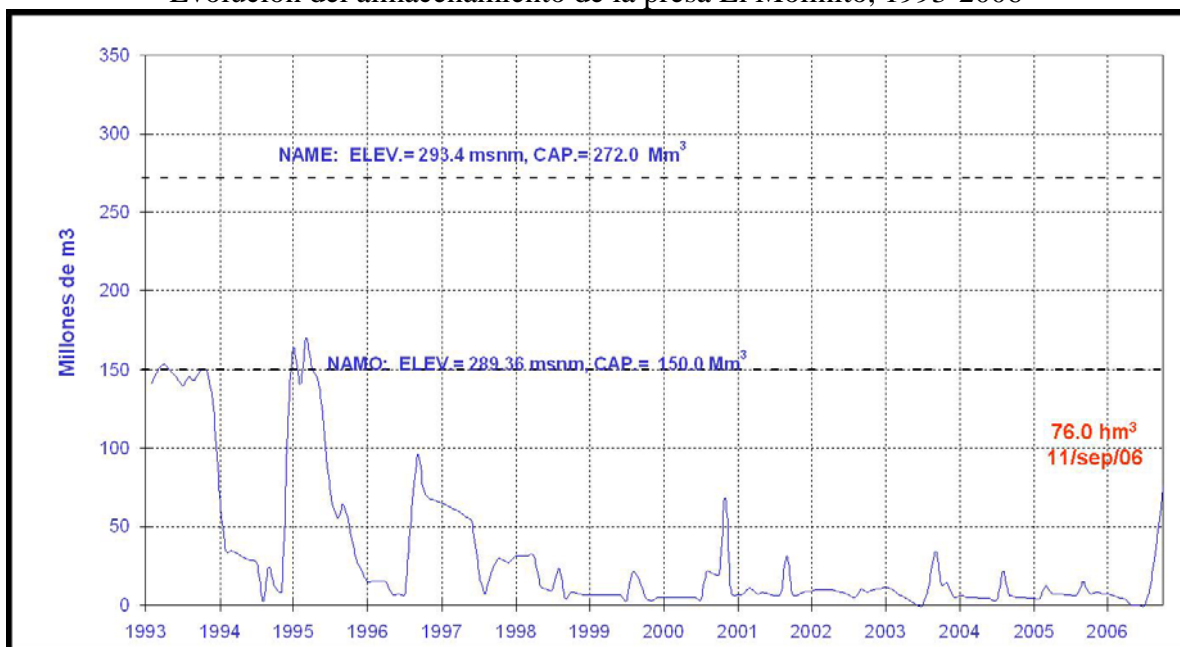


PRESA RODOLFO FÉLIX VALDEZ (EL MOLINITO)

La presa El Molinito está ubicada sobre el río Sonora, unos 23 km aguas arriba de la ciudad de Hermosillo, en el municipio del mismo nombre. Fue construida durante el período de enero de 1990 a agosto de 1991, con el propósito de controlar las avenidas en el río y su capacidad de almacenamiento, al nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO), es de 150 Mm³. Históricamente, ha alcanzado un almacenamiento máximo de 169.8 Mm³ en 1995 y, por primera vez desde el inicio de sus operaciones, un mínimo de 0.0 Mm³ a partir de abril de 2003 y hasta 2005; recuperándose significativamente a mediados de 2006 al registrar 35.4 millones de m³.

En la figura 7 se presenta la evolución del almacenamiento, que a partir de 1997 no ha tenido una recuperación significativa, lo que indica la existencia de una sequía hidrológica en la cuenca del río Sonora.

Figura 7
Evolución del almacenamiento de la presa El Molinito, 1993-2006



Fuente: Red hidrométrica. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

PRESA ABELARDO RODRÍGUEZ LUJÁN

La presa Abelardo Rodríguez se encuentra localizada al oriente de la ciudad de Hermosillo, Sonora. Fue construida en el período de 1945 a 1948, con el propósito de aprovechar las aguas del río Sonora en riego y abastecimiento de agua, con una capacidad al NAMO de 253.5 Mm³. En 1992 se modificó el vertedor de libre a controlado para alcanzar una capacidad de 304.9 Mm³ al nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO).

En 1996 se realizó la batimetría del vaso y a partir de 1997, se utilizan las nuevas tablas de elevaciones-áreas-capacidades. La capacidad actual al nivel de aguas máximas extraordinarias (NAME) es de 284.5 Mm³ a la elevación 228.4 msnm, mientras que al NAMO se tiene una capacidad de 219.5 Mm³ a la elevación 226.98 msnm.

Desde 1998, la presa Abelardo Rodríguez Luján ha quedado vacía en varios períodos:

Del 16 de diciembre de 1998 al 25 de agosto de 1999

Del 14 de octubre de 2002 al 30 de julio de 2003

Del 14 de agosto de 2003 al 17 de agosto de 2003

Del 29 de febrero de 2004 al 20 de septiembre de 2004

Del 17 de febrero de 2005 a la fecha (17 de mayo de 2005)

En el cuadro 4 se muestran los almacenamientos mínimos registrados desde 1954:

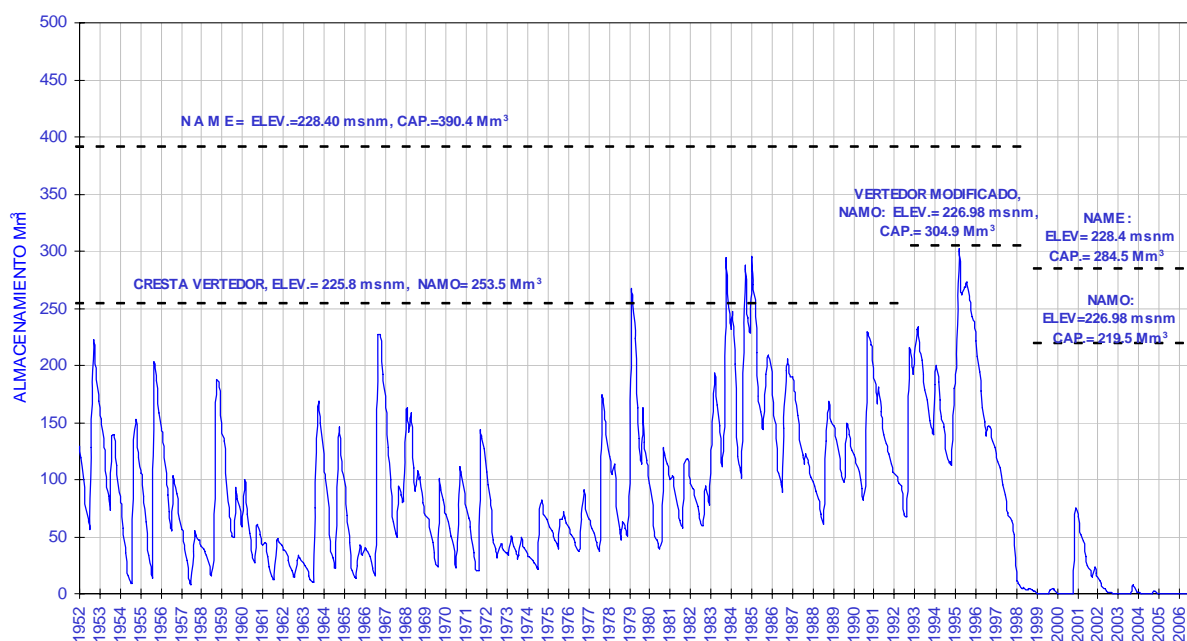
Cuadro 4
Almacenamiento histórico mínimo
Presa Abelardo Rodríguez

Año	Almacenamiento (Mm ³)
1954	9.4
1955	14.3
1957	7.6
1963	10.1
1998-1999	0.0
2000	1.23
2001	13.8
2002-2005	0.0
2006	12.4

Fuente: Red hidrométrica. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica

En la figura 8 se muestra la evolución de los volúmenes almacenados en el vaso; se observa cómo a partir de 1997 y hasta 2005, el embalse no presentaba una recuperación importante, evidenciando la existencia de una sequía permanente en la cuenca del río Sonora, durante los últimos años. Sin embargo, el excelente inicio de la temporada de lluvias de 2006 se refleja en la recuperación significativa del embalse con un almacenamiento, al mes de septiembre, del orden de los 31.6 Mm³, que representa 14.4 por ciento de su capacidad.

Figura 8
Evolución del almacenamiento de la presa Abelardo Rodríguez, 1952-2006



Fuente: Red hidrométrica. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

En la actualidad hay agua superficial disponible en el sistema de presas. Pero si revisamos el registro histórico, observaremos que existe una recurrencia de estaciones de sequía, por lo que no debemos pensar que los problemas del agua se han resuelto, sino darnos cuenta de que, si hay algo cierto cuando se trabaja con probabilidades, se volverá a presentar un período de sequía tan severo o más, que el peor conocido. Todo es cuestión de tiempo.

V

DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO SONORA

Como ya hemos visto en el capítulo anterior, la “oferta” del recurso hídrico ha disminuido debido al descenso de las precipitaciones pluviales de los últimos once años, lo que se manifiesta en los bajos escurrimientos superficiales y la escasa disponibilidad de agua en las presas, además del abatimiento de los mantos acuíferos.

Conviene ahora conocer el comportamiento de la demanda, que en este estudio se ha considerado como la suma de las concesiones de aguas superficiales y subterráneas de la región en sus diferentes usos. Así, tenemos la demanda para uso potable, agrícola, agropecuario, industrial, servicios y los usuarios que utilizan el recurso en más de una actividad, denominados múltiples. De esta manera, la demanda total de agua en la cuenca del río Sonora es de 1 149.8 Mm³ al año (véase cuadro 5).

Cuadro 5
Uso consuntivo del recurso hídrico en la cuenca del río Sonora

Fuente	Pecuario	Potable	Agrícola	Industrial	Múltiples	Total
Subterránea	17.21	101.74	840.68	3.97	32.3	995.9
Superficial	0.3	90	63.6	0	0	153.9
Total	17.51	191.74	904.28	3.97	32.3	1,149.80

Fuente: Comisión Nacional del Agua. Registro Público de Derechos de Agua (REPDa).

Uno de los objetivos de este trabajo es comparar la información estadística de escurrimientos superficiales y la recarga de acuíferos, con respecto a la demanda de agua para los diversos usos, de tal manera que nos permita cuantificar la disponibilidad de agua para nuevos proyectos productivos o para los derivados del crecimiento poblacional.

La determinación de la disponibilidad de los recursos hídricos se realizó con base en dos metodologías:

- a. NOM-011-CNA-2000, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales; y
- b. Modelo matemático de oferta-demanda de agua.

ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD SEGÚN NOM-011-CNA-2000

Las áreas de control superficiales (A, B, C y D) que constituyen el sistema hidrológico del río Sonora, se muestran esquemáticamente en la figura 9 y se describen a continuación:

A. Constituida por la subcuenca del río Bacanuchi, cuyos escurrimientos dan lugar al río Sonora. Toda la parte alta del río Sonora, hasta la estación hidrométrica El Orégano II se incluye en esta subcuenca.

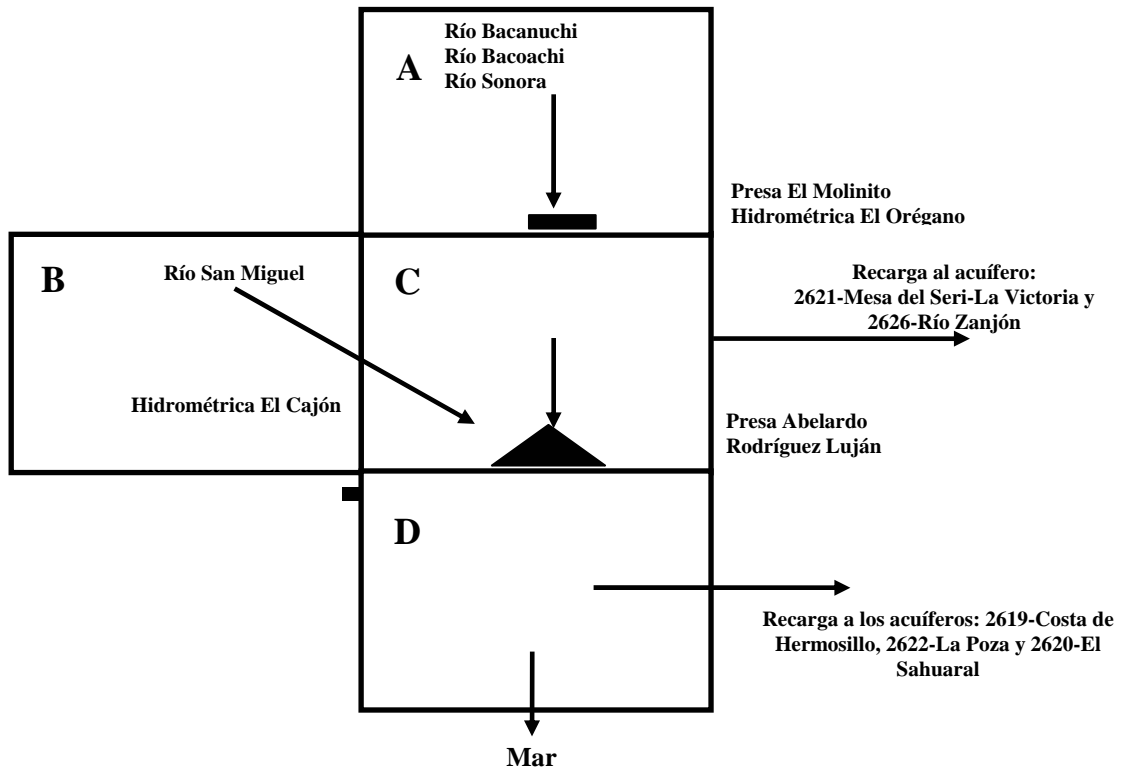
B. Subcuenca del río San Miguel hasta la estación hidrométrica El Cajón.

C. Cuenca de captación de la presa Abelardo Rodríguez Luján, a partir de las estaciones hidrométricas El Orégano II y El Cajón. También se incluye el área de captación del río Zanjón.

D. Planicie costera del río Sonora (Costa de Hermosillo), desde la cortina de la presa Abelardo Rodríguez Luján hasta su desembocadura al Golfo de California; incluye los escurrimientos generados por los arroyos La Poza y La Bandera por la margen izquierda y Bacoachito por la derecha de la referida planicie.

Figura 9

Esquema de interconexión de las subcuencas del río Sonora



Fuente: CONAGUA. GRNO. Subgerencia Técnica. Jefatura de Proyecto de Aguas Superficiales.

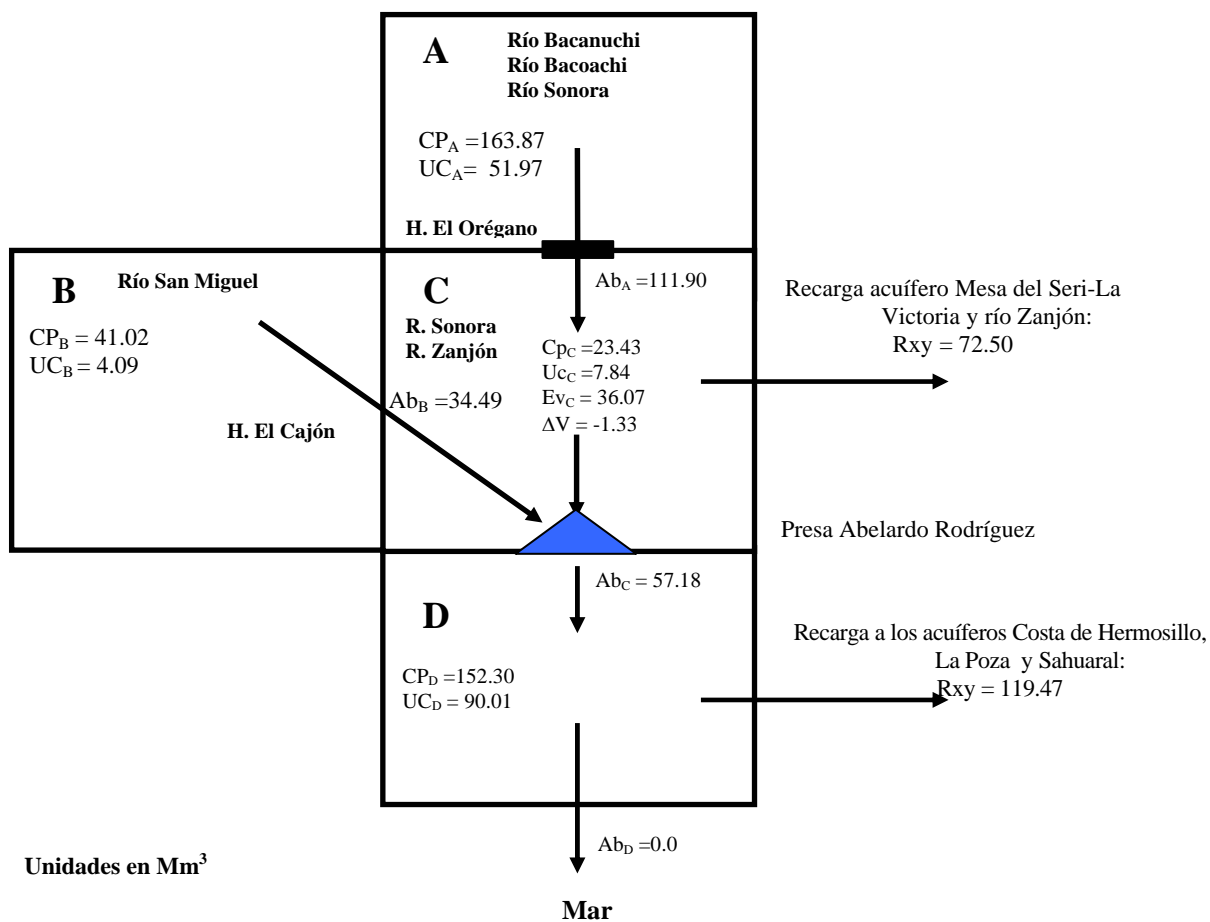
A continuación se presenta un resumen de los resultados del cálculo realizado. La metodología consiste en realizar un balance hidráulico para cada una de las subcuencas que componen al sistema de drenaje superficial (véase figura 9). El cálculo de la disponibilidad mediante la ecuación de continuidad, que considera como entradas a los sistemas, los escurrimientos verticales y horizontales, mientras que como pérdidas la infiltración, evaporación y usos consuntivos. En estos términos, tenemos que el cálculo de la disponibilidad en las subcuencas del río Sonora para 2004, es la que se muestra en el cuadro 6 y figura 10.

Cuadro 6
Clasificación de disponibilidad de la cuenca del río Sonora

Subcuenca	Disponibilidad relativa (Dr)	Clave	Color	Descripción
A	$1.0 < 1.4$	1	Rojo	Déficit
B	$1.0 < 1.4$	1	Rojo	Déficit
C	$1.0 < 1.4$	1	Rojo	Déficit
D	$1.0 < 1.4$	1	Rojo	Déficit

Fuente: CONAGUA. GRNO. Subgerencia Técnica. Jefatura de Proyecto de Aguas Superficiales.

Figura 10
Esquema de interconexión de las subcuencas del río Sonora y principales resultados



Fuente: CONAGUA. GRNO. Subgerencia Técnica. Jefatura de Proyecto de Aguas Superficiales.

ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD SEGÚN EL MODELO MATEMÁTICO DE OFERTA-DEMANDA DE AGUA

El Modelo matemático de oferta-demanda de agua consiste en determinar, con cierto grado de exactitud, los volúmenes requeridos por cada uso, considerando además la eficiencia en el manejo del agua de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$WRT = Wcd + Wdil \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

WRT = Volumen total anual de agua requerido en la cuenca (Mm^3)

Wcd = Volumen de consumo directo por cada uso en unidades de $Mm^3/año$ (véase cuadro 7)

$Wdil$ = Gasto ecológico (Mm^3)

Por otra parte, se tiene que:

$$Wcd = Wcn + Wm \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Wcn = Volumen concesionado para cada uso en la cuenca (Mm^3)

Wm = Volumen de agua mal gastada (Mm^3)

La cuantificación del volumen de agua mal gastada por uso, se realiza con base en la eficiencia en el manejo del recurso y está dada por la siguiente ecuación:

$$Wm = \sum Wcn_{(j)} [1 - Ka_{(j)}] \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Ka = eficiencia promedio para cada uso

El cálculo de los volúmenes de consumo directo para cada uso, en la cuenca del río Sonora se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7
Determinación del volumen de consumo directo

Uso del agua	Wcn* (Mm ³)	Ka	Wm (Mm ³)	Wcd (Mm ³)
Pecuario	17.5	0.8	3.5	21.0
Servicios	191.7	0.5	95.9	287.6
Agrícola	904.3	0.6	361.7	1,266.0
Industrial	4.0	0.9	0.4	4.4
Múltiples	32.3	0.9	3.2	35.5
Total	1 149.8		464.7	1 614.5

*Wcn es el volumen concesionado por uso y se obtuvo de la base de datos del REPDA

Es importante destacar que en esta metodología es necesario determinar un gasto ecológico, como elemento indispensable para la preservación de la flora y fauna de la cuenca aguas abajo, parámetro que no incluye el cálculo anterior y que comúnmente se considera como uno por ciento del volumen total de consumo directo.

El volumen total anual de agua requerido por la cuenca del río Sonora, de acuerdo con la ecuación 1 es el siguiente:

$$WRT = Wcd + Wdil$$

$$WRT = 1\ 614.5 + 1.6$$

$$WRT = 1\ 616.5\ \text{Mm}^3/\text{año}$$

De los resultados obtenidos por ambos métodos, se deduce que no existe disponibilidad de agua para satisfacer la demanda de proyectos futuros o bien atender la demanda derivada del incremento poblacional, ya que el escurrimiento superficial ha disminuido considerablemente en los últimos años, así como la magnitud de la recarga de los mantos acuíferos.

Los esfuerzos recientes se han encaminado a mantener la “oferta” del recurso hídrico, realizando obras de retención (represos) en cauces de arroyos y la profundización

de aprovechamientos subterráneos, lo que ha traído como consecuencia la sobreexplotación de los mantos acuíferos, al mantenerse las extracciones y reducirse la recarga.

Finalmente, la disminución de los escurrimientos ocasionada por el descenso de las precipitaciones pluviales de los últimos once años ha provocado que la superficie agrícola se redujera (véase figura 13), sin embargo, en cuestión de aprovechamiento de agua, el volumen utilizado se ha mantenido constante.

De esta manera, el reuso de aguas residuales tratadas representa una alternativa a las condiciones de escasez del recurso en la región, siempre y cuando se cumpla estrictamente la normativa ambiental, por lo que conviene revisar las condiciones de operación de los sistemas y su eficiencia de remoción de carga contaminante antes de proponer proyectos para su uso.

VI

CARACTERIZACIÓN Y EFECTOS DE LA SEQUÍA

ANÁLISIS DE LA SEQUÍA

Hasta ahora hemos revisado la dinámica de las lluvias en la región, la estadística de los escurrimientos y recarga de acuíferos, la evolución de los almacenamientos en la presas de la cuenca del río Sonora, que constituye nuestro inventario de recurso hídrico o, en otras palabras, la oferta de agua en la región. Para el análisis de la demanda de agua consideramos las asignaciones o concesiones otorgadas para los diferentes usos.

El análisis comparativo de la oferta y la demanda refleja un déficit del recurso hídrico, ocasionado por el descenso en las precipitaciones pluviales, lo que se manifiesta en los bajos escurrimientos superficiales y la escasa disponibilidad de agua en las presas.

Para estimar los efectos del descenso de precipitaciones debemos conocer, con toda precisión, las condiciones climáticas registradas. Entre los datos meteorológicos más importantes son los que expresan y caracterizan la lluvia, la temperatura, la humedad del aire y las condiciones de humedad del suelo. En 2005, la Comisión Nacional del Agua (CNA) realizó un análisis de las precipitaciones pluviales de esta región, utilizando la metodología del Índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), que constituye un criterio para definir cuándo se debe considerar que una región presenta sequía en un período de tiempo determinado. Los valores convencionales de este índice para clasificar la sequía se presentan en el cuadro 8.

Cuadro 8
Valores convencionales para sequía según el SPI

Fase	Valor de SPI
Sin sequía	-1.0 a 1.0
Sequía incipiente	-1.0 a -1.5
Sequía moderada	-1.5 a -2.0
Sequía severa	-2.0 a -2.5
Sequía crítica	Menor que -2.5

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

En su etapa inicial, la sequía es meteorológica y se caracteriza por la ausencia de lluvias en cantidad, intensidad y tiempo, así como altas temperaturas, baja humedad relativa, mayor insolación y menos nubes. Después, se presenta la sequía agrícola, que se caracteriza por deficiencia de humedad en el suelo y se manifiesta por menor o nulo desarrollo vegetativo. La sequía hidrológica, que puede ser hasta de varios años, se caracteriza por una baja sensible en los escurrimientos de los ríos y una reducción de volúmenes en presas y acuíferos.

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL SPI

Se analizaron las precipitaciones de la cuenca alta del río Sonora, aguas arriba de la presa Abelardo Rodríguez Luján y se obtuvo el SPI. Los resultados muestran que, de 1995 a 2005, en un período de seis meses existen valores de -2.9, indicando sequía crítica, tal como se indica en el cuadro 9. Para períodos de 48 meses el índice mínimo es de -2.3 que corresponde a sequía severa.

Cuadro 9
Valores mínimos de SPI para diferentes períodos a partir del año 1995

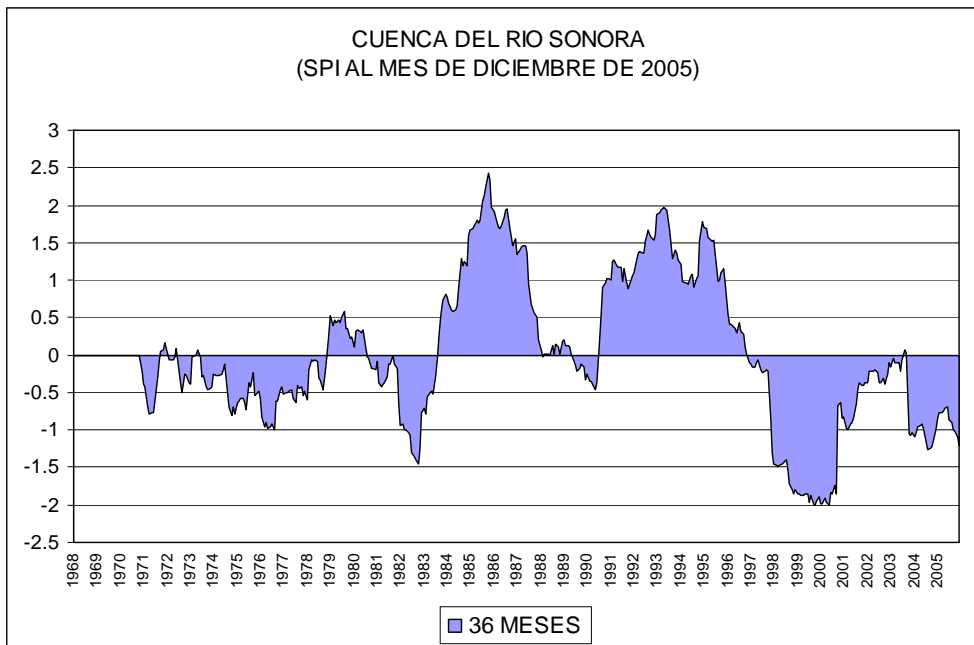
Año	SPI (período en meses)								
	1	3	6	9	12	18	24	36	48
1995	-1.5	-1.9	-1.6	-1.0	-0.7	0.8	0.7	1.0	1.2
1996	-1.1	-1.5	-1.8	-1.3	-1.5	-1.5	-1.3	-0.1	0.3
1997	-1.9	-1.8	-1.9	-2.0	-1.7	-1.8	-1.8	-1.3	-0.5
1998	-1.8	-1.8	-1.9	-1.9	-1.8	-1.3	-1.7	-1.9	-1.9
1999	-1.1	-2.5	-2.9	-2.4	-2.5	-2.3	-2.1	-2.0	-2.2
2000	-1.4	-2.3	-2.0	-1.7	-1.6	-2.3	-2.4	-2.0	-2.3
2001	-1.0	-0.9	-0.6	-0.4	-0.6	0.3	0	-1.0	-1.0
2002	-1.0	-1.6	-1.1	-1.3	-1.4	-1.1	-1.3	-0.4	-1.1
2003	-1.1	-0.7	-0.9	-1.0	-1.0	-1.4	-1.4	-1.1	-0.7
2004	-1.7	-0.9	-0.7	-0.9	-0.8	-0.7	-1.0	-1.3	-1.2
2005	-1.6	-1.8	-2.1	-2.0	-1.4	-1.3	-1.3	-1.2	-1.5
Mínimo	-1.9	-2.5	-2.9	-2.4	-2.5	-2.3	-2.4	-2.0	-2.3

Fuente: Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

En las figuras 11 y 12 se presenta el comportamiento del SPI para períodos de 36 y 48 meses a diciembre de 2005, donde se aprecia cómo a mayor escala los valores se atenúan y tienden a la media, registrándose índices de -2.0 a -2.4 respectivamente,

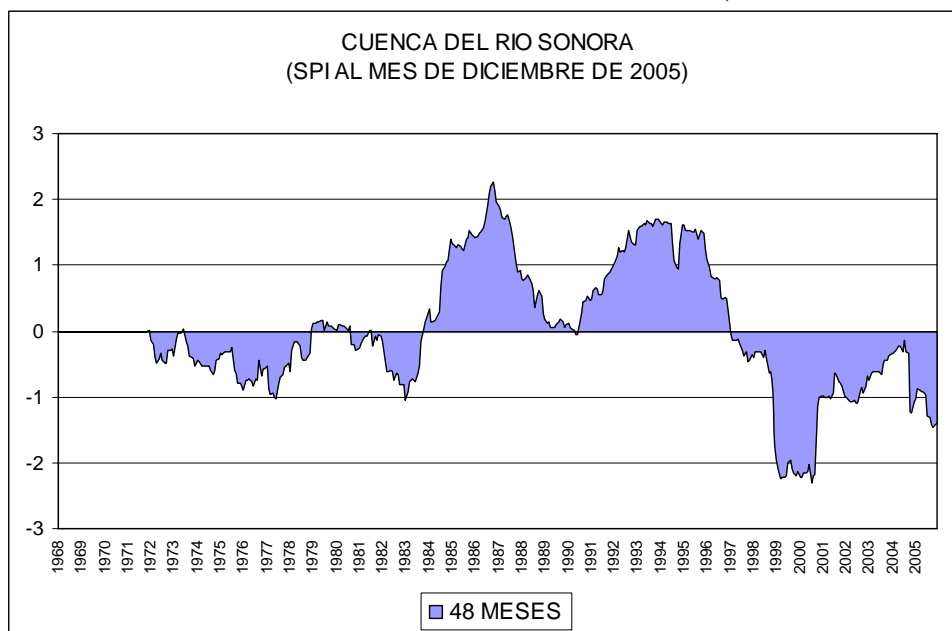
indicando la existencia de una sequía meteorológica que ha sido la más severa y prolongada del período con datos.

Figura 11
Resultados del SPI al mes de diciembre de 2005, 36 meses



Fuente: Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

Figura 12
Resultados del SPI al mes de diciembre de 2005, 48 meses



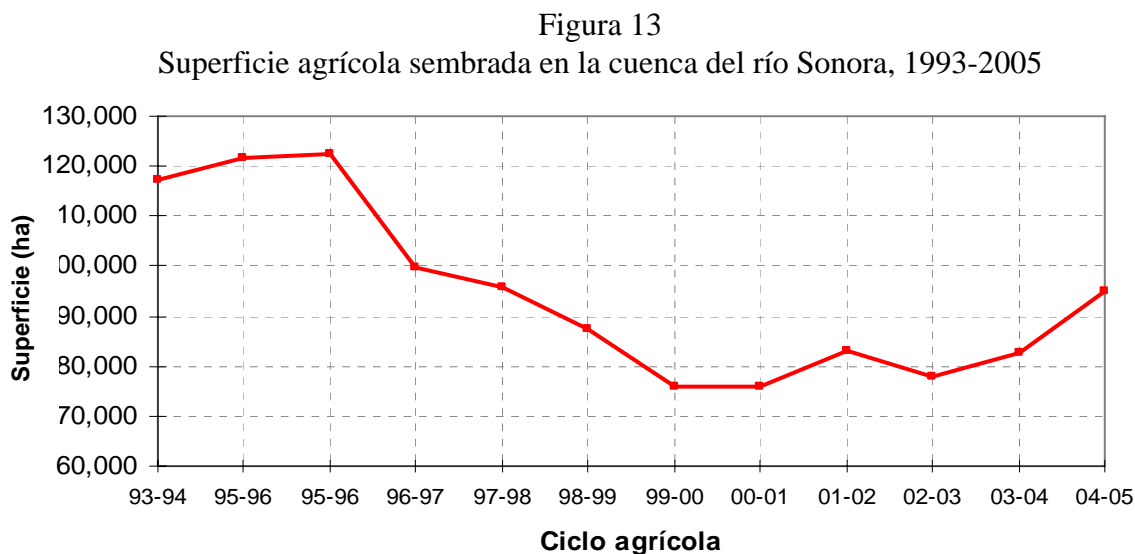
Fuente: Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional Noroeste. Subgerencia Técnica.

EFFECTOS DE LA SEQUÍA

Los principales efectos del déficit de agua se manifiestan en la economía, relacionados con la pérdida de ingreso y productividad, lo que impacta en la sociedad y en el ambiente, porque afectan las condiciones naturales bióticas y del paisaje, manifestándose en una sensible disminución de flora y fauna.

IMPACTOS EN LA AGRICULTURA

Los efectos de la sequía en esta cuenca se manifiestan a partir de 1994 y hasta 2002, con una reducción de la superficie sembrada de 113 800 hectáreas a 81 961, que representa una reducción de 38 por ciento (véase figura 13).

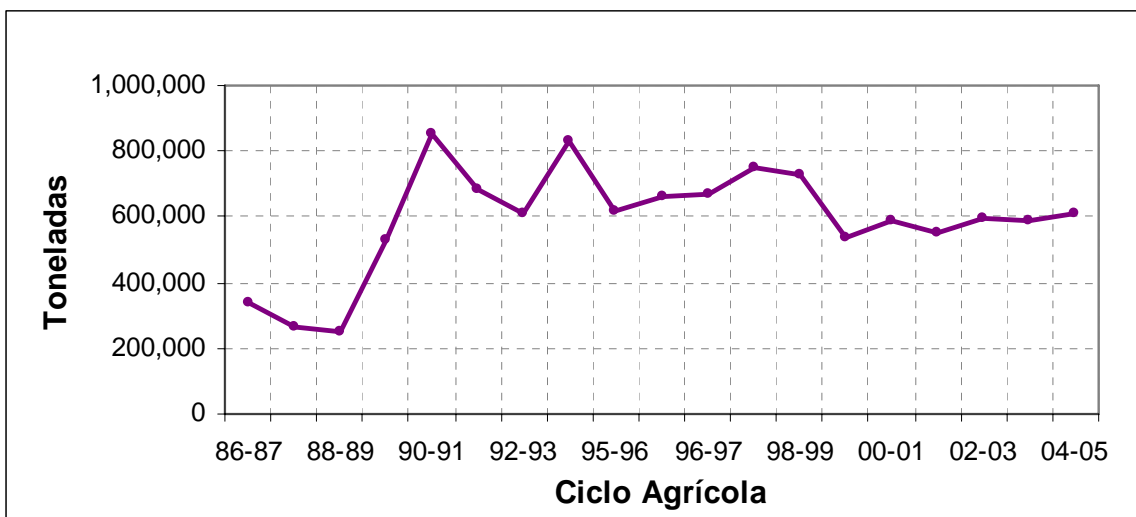


Fuente: SAGARPA. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos, 2000

Por otra parte, la producción agrícola ha presentado tendencias variables, decreciendo del ciclo 1986-1987 al 1988-1989 y creciendo a partir del de 1989-1990, manteniéndose hasta el de 1998-1999 con producciones pico en los periodos 1990-1991 y 1993-1994 con 849 399 y 887 726 toneladas respectivamente.

A partir del ciclo 1999-2000, se presenta un comportamiento decreciente hasta el de 2001-2002, con una producción de 416 867 toneladas y a partir de 2002-2003 con tendencia incremental hasta el 2004-2005 (véase figura 14).

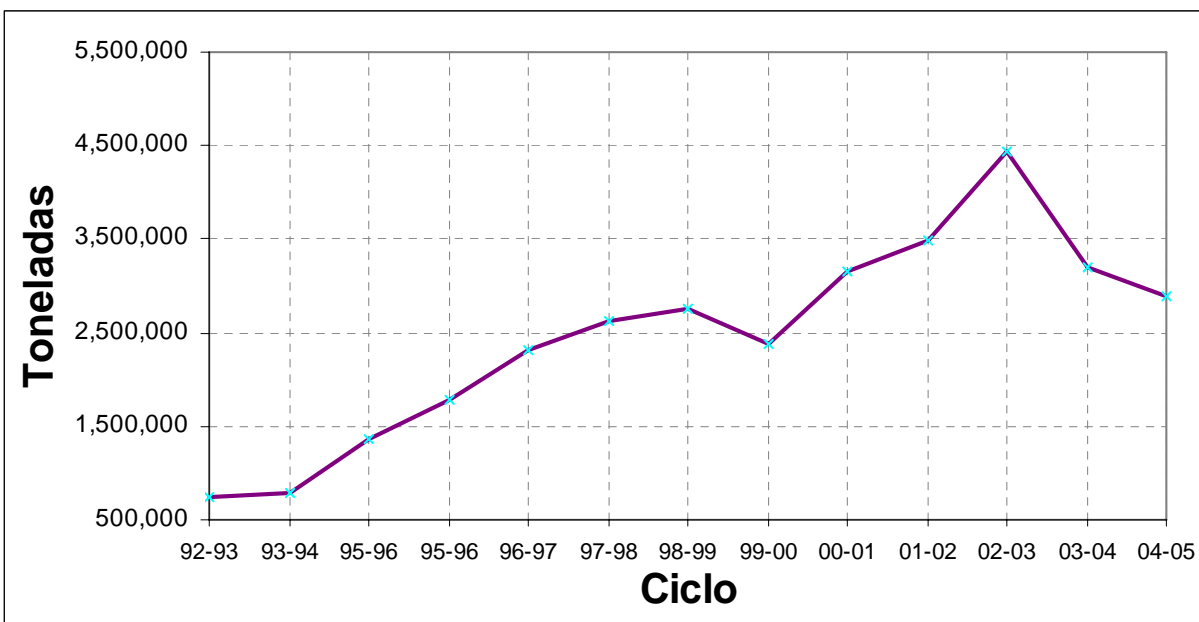
Figura 14
 Volumen de producción agrícola en la cuenca del río Sonora, 1986-2005



Fuente: SAGARPA. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos, 2000

Respecto al valor de la producción, se presenta una tendencia incremental con un ascenso marcado en los ciclos 1994-1995 y 1995-1996, alcanzando un valor tope en el de 2003-2004 (véase figura 15).

Figura 15
 Valor de la producción en la cuenca del río Sonora, 1992-2005



Fuente: SAGARPA. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos, 2000

El decremento en la superficie sembrada a partir del ciclo 1995-1996 no afectó ni la producción ni su valor, debido a la reconversión de cultivos que se presentó en el Distrito de Riego 051-Costa de Hermosillo, donde se pasó de un patrón predominante de trigo a frutales y hortalizas.

SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO

La tecnificación del riego, mediante sistemas presurizados, ha cobrado una gran importancia, sobre todo en la última década, debido a la cada vez mayor escasez de agua y a la necesidad de los productores por competir en los mercados agrícolas del mundo. Esta necesidad ha sido más urgente en los distritos de bombeo, donde los costos de producción son más elevados por los consumos de energía eléctrica; sin embargo, se ha observado que los distritos de gravedad han incursionado de manera importante en la modernización del riego parcelario, principalmente en los últimos años, debido tanto a la falta de agua como a los apoyos que el Gobierno ha destinado para promover el uso eficiente del agua en la agricultura.

La superficie de riego beneficiada, con la inversión en sistemas de riego presurizado, en la cuenca del río Sonora es de 23 173 ha, esta cifra es importante porque posibilita mejorar el uso y manejo del agua en la zona y representa 56 por ciento del área total tecnificada en las cuencas del estado.

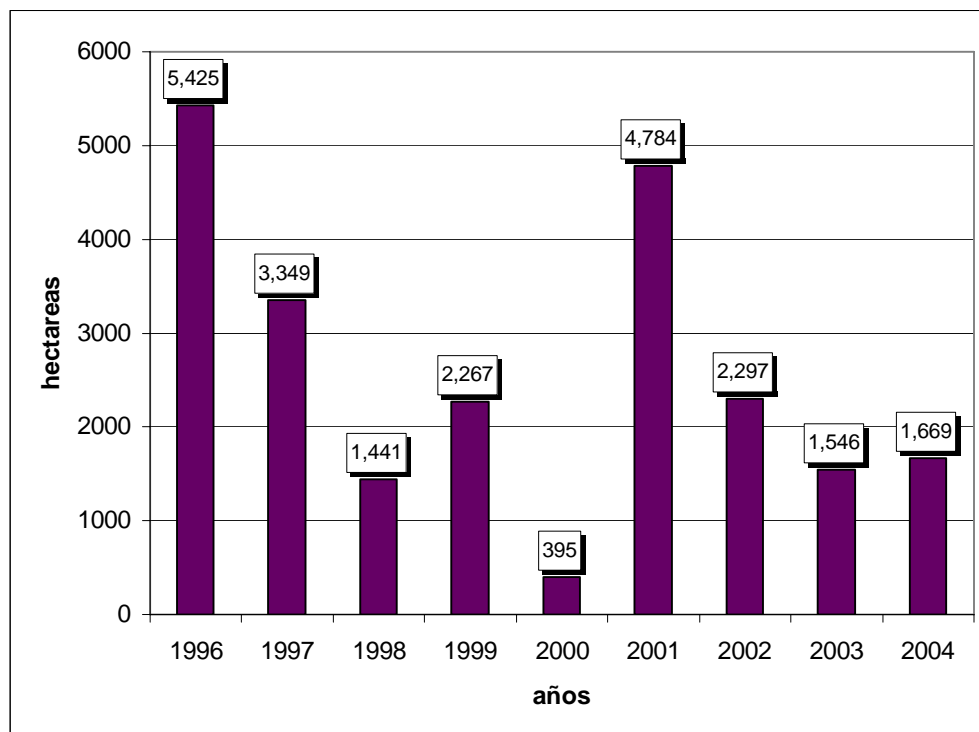
Por otra parte, el apoyo del Programa de Alianza para el Campo ha jugado un papel significativo en el crecimiento de las superficies con sistemas de riego presurizado en esta región, a través de los apoyos económicos otorgados a los productores desde 1996, año en que inició el programa. De las inversiones realizadas en este período, las más importantes se dieron entre 2001 y 2003 con un total de 158.2 millones de pesos; con éstas la superficie con sistemas de riego se ha ido incrementando de manera notable.

En la figura 16 se observa que en 1996 se benefició una superficie de 5 425 ha, apreciándose un ligero descenso en los siguientes años, sin embargo, repuntó de manera

importante a partir de 2001 con el establecimiento de sistemas de riego en 4 784 ha; y en los siguientes años ha sido superior a las 1 500 hectáreas.

Figura 16

Evolución de la superficie con sistemas de riego presurizado en la cuenca del río Sonora



Fuente: INEGI, Gobierno del Estado de Sonora. Anuario Estadístico del Estado de Sonora 2005.

EFICIENCIA DE RIEGO

Uno de los grandes retos de la actividad agrícola es, sin duda, mejorar la eficiencia de riego, pero es difícil debido a la gran cantidad de factores que intervienen, tanto humanos como de infraestructura, sobre todo en distritos grandes con varios millares de hectáreas, donde la principal preocupación es entregar el agua a los usuarios con oportunidad y en cantidad suficiente.

Los dos factores principales que intervienen en la eficiencia de riego son la conducción y el humano. En el primero se ubican, de manera significativa, las pérdidas por infiltración en la red de canales y en las parcelas por percolación y escurrimiento. En el segundo, tan importante o más que el primero, ocurren las pérdidas por mala operación de

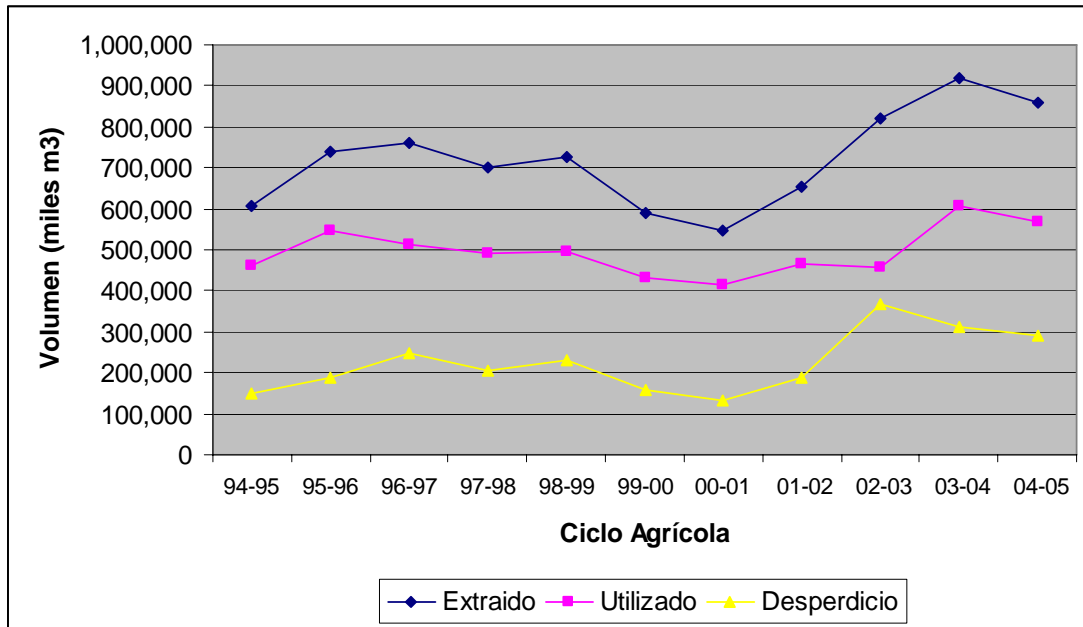
la red de distribución y por la deficiente programación de entrega-recepción del agua, además de una mala conservación de la infraestructura.

La distribución del agua en las zonas de riego de la cuenca del río Sonora se realiza directamente del pozo a la parcela, o a través de pequeños canales que se constituyen como parcelarios, que pueden ir del pozo a la parcela o mediante derivaciones de los cauces de los ríos, arroyos, tajos artificiales, galerías filtrantes o alguna otra fuente pequeña, por lo que no existen registros de las eficiencias de conducción en función de la operación de dicha infraestructura. La información que se tiene al respecto resulta escasa y corresponde a estudios realizados por la CNA en 14 campos agrícolas de la Costa de Hermosillo, en el 2000, donde se concluye que la eficiencia de conducción es de 84 por ciento, la de aplicación 74 y la eficiencia global es de 62 por ciento.

A pesar de los importantes logros e inversiones realizadas en tecnificación agrícola, en cuestión de volúmenes aprovechados de agua no se tienen cambios significativos. Si analizamos las figuras 13 y 15 observaremos que, aunque la superficie agrícola se redujo significativamente a partir de 1995, el valor de producción registró un incremento notable a partir de ese mismo año. Lo anterior se debe, como ya se ha mencionado, al cambio de patrón de cultivos. Sin embargo, el volumen de agua utilizado se mantuvo en alrededor de 500 Mm³ (véase figura 17).

Figura 17

Volumen de agua aplicado en la actividad agrícola de la cuenca del río Sonora, 1994-2005



Fuente: elaboración propia con datos de SAGARHPA.

IMPACTO EN LA GANADERÍA

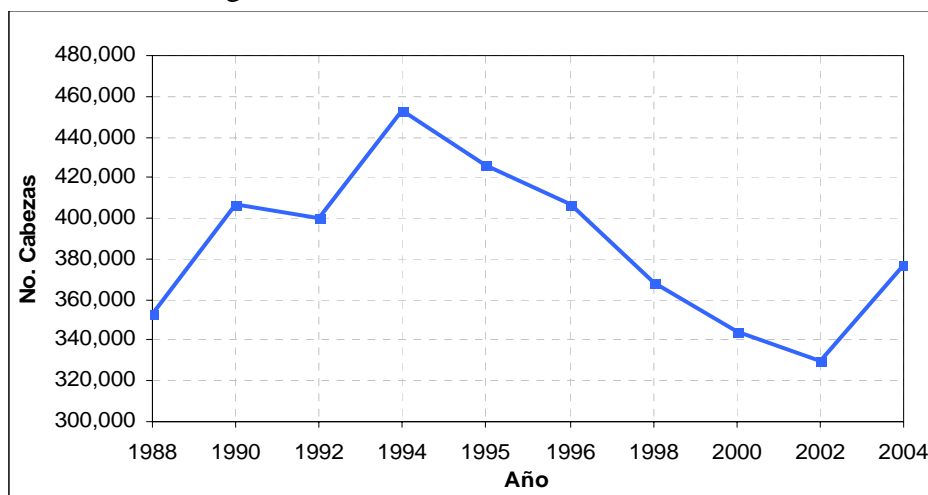
La superficie destinada a la ganadería en la cuenca del río Sonora es de 3 061 475 ha, y el inventario ganadero estatal de bovinos, en condiciones normales de disponibilidad de agua y pasto, asciende a casi un millón y medio de cabezas, con una importante reducción en los últimos años por problemas de sequía, misma que se refleja en la incapacidad de los agostaderos para la producción de alimentos, nivel bajo de almacenamiento de las presas y abatimiento de los pozos agrícolas, ocasionando la reducción de siembras de forraje y por tanto, la falta de alimento.

Los impactos directos de la sequía sobre la ganadería están relacionados con las altas temperaturas que sufren los animales y la falta de agua y alimento; los indirectos se ven reflejados principalmente en la producción ganadera y en su valor económico.

En la figura 18 se observa cómo la escasez de agua ha impactado en el inventario ganadero, en las cuencas de los ríos Yaqui, Mátape y Sonora donde la reducción ha sido

importante a partir de 1994, lo cual coincide con el período en el que se ha registrado la menor incidencia de lluvias.

Figura 18
Inventario ganadero en la cuenca del río Sonora, 1988-2004



Fuente: SAGARHPA. Anuario estadístico de la producción pecuaria de los Estados Unidos Mexicanos. 2000.

IMPACTOS AL MEDIO AMBIENTE

La superficie total del estado es de 17.9 millones de ha, la mayor parte está cubierta por matorrales y selva baja; los bosques cubren las partes más altas, que representan 11 por ciento aproximadamente; la agricultura de cualquier tipo y pastizal cultivado ocupa 10 por ciento y los asentamientos humanos 0.3 (Año 2000).

Del análisis comparativo de la cobertura vegetal existente en 1976 con los datos para el 2000, se observa un importante cambio de uso del suelo con una disminución significativa de los matorrales. La superficie de la selva baja ha disminuido más de 1.2 millones de hectáreas, así como el incremento significativo de los pastizales inducidos y de los asentamientos humanos. Una de las especies con mayor impacto es el Mezquite, que durante este lapso se aprecia una pérdida de más de 300 mil ha.

Cuadro 10
Uso del suelo en el estado de Sonora

Uso	1976		2000	
	ha	%	ha	%
Agricultura	1 141 515	6.4	1 804 678	10.1
Matorrales	7 748 330	43.3	7 282 145	40.7
Bosques	2 007 243	11.2	2 001 665	11.2
Selva baja	5 599 959	31.3	4 894 210	27.3
Pastizales	1 181 833	6.6	1 590 622	8.9
Asentamientos humanos	10 975	0.1	57 779	0.3
Cuerpos de agua	82 194	0.5	38 699	0.2
Otros	139 748	0.8	254 070	1.4
Total	17 911 798	100.0	17 923 868	100.0

Fuente: CONAFOR, Gerencia Regional Noroeste.

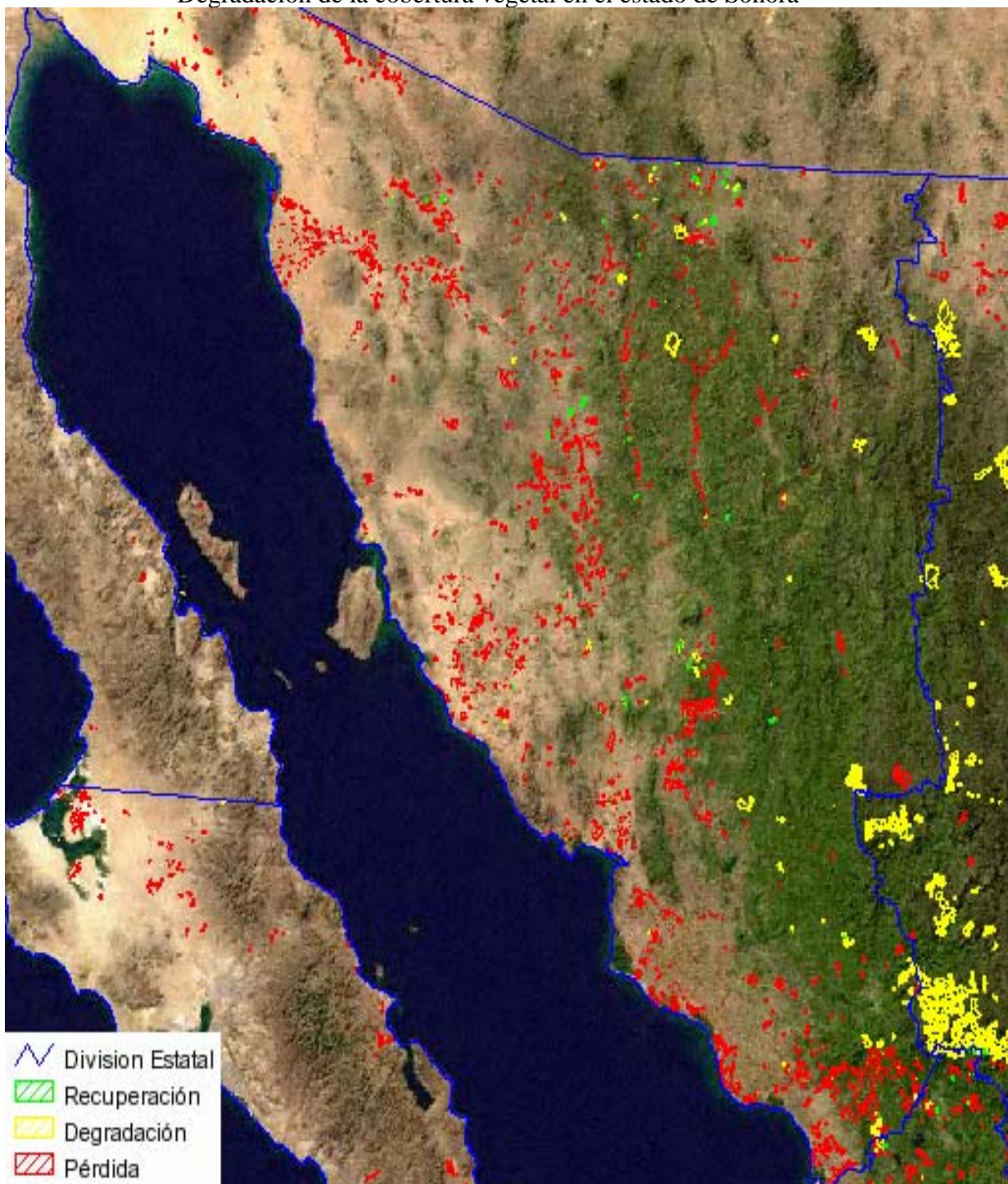
El cambio de uso de suelo se debe al establecimiento de praderas o pastizales inducidos, que han crecido en más de 400 mil ha, al incremento de los asentamientos humanos y a la desertificación, ésta última aumentó el área sin vegetación aparente en poco más de 110 mil ha. La deforestación y el cambio de uso de suelo ha motivado, de alguna manera, la disminución de la captación de volúmenes importantes de agua y a la vez interrumpido el flujo natural del agua en la cuenca, situación que se observa en la pérdida de cobertura vegetal y erosión, que alteran el régimen de circulación y la calidad de las aguas.

Las políticas de desarrollo rural implementadas han fomentado la sustitución de la cobertura forestal primaria por otra de mayor producción a corto plazo (cultivos y pastizales inducidos), pero de bajo rendimiento a mediano y largo plazo, que han propiciado el incremento de la deforestación.

Otros factores importantes que se deben tomar en cuenta en la deforestación son la producción del carbón vegetal, industria maderera e incendios, principalmente en las partes media y alta de las cuencas, si bien en el análisis no se aprecia, sí podría haber una disminución en la densidad de los bosques.

En la figura 19 se muestra la evolución de la degradación de la cobertura vegetal desde 1993 a la fecha, el color rojo indica las zonas con pérdida total, el amarillo las zonas con alto índice de deterioro o deforestación, y el verde, las zonas reforestadas.

Figura 19
Degradación de la cobertura vegetal en el estado de Sonora



VII

DIAGNÓSTICO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO

Para determinar la factibilidad de reuso de las aguas residuales tratadas, primero es necesario conocer las condiciones de operación de los sistemas lagunares de las localidades de la zona de estudio, para lo cual se realizaron recorridos de campo y entrevistas con los encargados de los servicios de agua potable y alcantarillado. También, se calcularon las eficiencias de remoción de carga contaminante, con base en los resultados históricos del monitoreo de la calidad del agua de los sistemas de tratamiento lagunares existentes, en el laboratorio de calidad del agua de la Gerencia Regional Noroeste de la CNA.

De esta manera, podemos mencionar que las principales localidades de la cuenca alta y media del río Sonora tratan sus aguas residuales a través de lagunas de estabilización, aunque estos sistemas están totalmente abandonados, la eficiencia de remoción promedio en la zona es de 70 por ciento para demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y de casi 90 por ciento para coliformes fecales. A pesar de la alta eficiencia de remoción de la carga bacteriológica, el efluente de los sistemas de tratamiento no cumple con los límites establecidos en la norma oficial (1000 NMP/100 ml), ya que los valores detectados en las descargas oscilan entre 45 000 a 250 000 NMP/100 ml, por lo que su uso no es recomendable para ningún tipo de actividad.

Durante nuestras entrevistas, con los responsables de los organismos operadores de agua potable y saneamiento, constatamos que no se cuenta con memoria de cálculo o diseño de los sistemas lagunares, algunos de ellos contruidos con el fin de contener las aguas residuales de la localidad, aprovechando las hondonadas y depresiones de terreno para abatir los costos de construcción.

Se comenta que gracias a las visitas de las dependencias federales ha sido posible conocer la teoría básica de operación de estos sistemas, que en un tiempo fueron consideradas como una forma de disponer las aguas residuales, no como tratamiento.

En cuanto al reuso de las aguas residuales, los entrevistados comentan que, hasta hace algunos años, esta idea era rechazada de manera generalizada por la población, pero las condiciones de escasez o de sequía que afectan a la región han motivado la reutilización del agua, principalmente para el riego de forrajes.

A continuación se describen las características y condiciones de operación de los sistemas lagunares de la zona de estudio.

ACONCHI, SONORA

Los habitantes de la localidad generan un volumen total de agua residual de aproximadamente 490.0 m³/día (5.6 lps), y 380 m³/día (4.4 lps) se conducen hacia el sistema de lagunas de oxidación para su tratamiento. El sistema consta de dos lagunas de estabilización de forma rectangular, ambas con dimensiones de 80 metros de ancho por 90 de largo y 1.5 de profundidad, se estima que puede recibir un gasto máximo de 8 litros por segundo, pero en la actualidad recibe 4.4 lps. Está rodeado por ranchos y terrenos de cultivo de forrajes, por lo que al descargar el efluente tratado, a través de una canaleta de concreto hacia un arroyo afluente del río Sonora, fluye e inunda los terrenos aledaños. Además, en las lagunas se observa crecimiento de maleza, arbustos y árboles de regular tamaño, como mezquite y palo fierro, que dificultan el acceso y deterioran el talud de los bordos. La población que no cuenta con el servicio de alcantarillado elimina las aguas residuales a través de letrinas o fosas sépticas, que representan un gasto de casi 110 m³/día (1.27 lps).

Foto 1
Lagunas de oxidación de Aconchi



El análisis estadístico de los resultados del monitoreo de la calidad del agua, que periódicamente efectúa el Laboratorio de Calidad del Agua de esta Gerencia Regional, indica que el sistema de tratamiento, aún en las condiciones deficientes en las que opera, alcanza niveles de remoción de 90 por ciento en materia fecal, 52 en sólidos suspendidos totales (SST) y 63.26 en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), véase cuadro 11.

Cuadro 11
Calidad del agua del sistema de lagunas de Aconchi

SST			DBO ₅			Coliformes fecales		
Infl.	Efl.	Efic. %	Infl.	Efl.	Efic. %	Infl.	Efl.	Efic. %
130	60	53.85	40.04	20.33	49.23	1 500 000	230 000	84.67
104	40	61.54	174.98	33.65	80.77	110 000 000	2 400 000	97.82
1086	287	73.57	262.3	73.99	71.79	460 000	46 000	90.00
140	108	22.86	81.5	39.7	51.29	24 000 000	4 300	99.98
365	123.75	53.0	139.7	41.9	63.3	33 990 000	670 000	93.1

Fuente: Red de Monitoreo de Calidad del Agua, Subgerencia Técnica. Gerencia Regional Noroeste. CONAGUA.

Los resultados del análisis de las muestras de agua en el efluente, indican que el sistema de tratamiento es insuficiente para cumplir con la normatividad, por lo que no puede ser utilizada en ningún tipo de proceso productivo.

Utilizando la metodología básica de diseño de lagunas y los datos hidrométricos y climatológicos de la CNA, podemos determinar las características de un sistema que cumpla con los límites máximos permisibles (véase cuadro 12).

Cuadro 12
Datos de diseño de una laguna facultativa para la localidad de Aconchi, Sonora

Parámetro	Unidad	Valor
Gasto de agua residual	Lps (m ³ /día)	8.7 (780)
Concentración DBO (Si)	mg/L	139.704
Concentración SST (Xv)	mg/L	185
Concentración coliformes fecales	NMP/100 ml	9.09E+06
Concentración Huevos Helminto	Org/L	600
Evaporación anual	mm	1 422.34
Precipitación anual	mm	430.9
Temperatura media mes más frío	°C	13.7

La carga orgánica de diseño está dada por la ecuación:

$$C_s = (1.085)^{T-20}$$

Ecuación 4

Donde: T es la temperatura promedio del mes más frío

$$C_s = (1.085)^{13.7-20}$$

$$C_s = 150.081$$

Para estimar la carga removida de la laguna, se emplean las correlaciones para lagunas facultativas primarias:

$$C_{sr} = 0.8063C_s + 7.67$$

$$C_{sr} = 0.8063 \times (150.081) + 7.67$$

$$C_{sr} = 128.681$$

El área de la laguna se obtiene de la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Si. Q}{Cs.1000} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$A = \frac{139.70 \times (780)}{(150.081) \times (1000)} = 1.27 \text{ hectáreas}$$

La profundidad de una laguna facultativa es de 2 m, por lo que el volumen o capacidad es de:

$$V = A \times h = (1.27) \times (10000) \times 2 = 25\,343 \text{ m}^3$$

Los expertos en el diseños de este tipo de sistemas, a nivel mundial, señalan que entre más alargada sea una laguna mayor será su eficiencia, por lo que recomiendan un sistema con una relación largo/ancho de 5.

De esta manera, tenemos que:

$$\text{Relación largo/ancho} = L/w = 5 = L = 5w$$

$$\text{Área} = L \times w$$

$$\text{Área} = 5 w^2$$

$$(1.27) \times (10000) = 5 w^2$$

$$w = 50.4 \text{ metros}$$

$$L = 251 \text{ metros}$$

El tiempo de retención del agua residual en las lagunas se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{25\,386 \text{ m}^3}{780 \text{ m}^3/\text{día}} = 33.8 \text{ días} \quad \text{Ecuación 6}$$

Para determinar el grado de remoción de coliformes fecales de este sistema lagunar, utilizamos el método de Yáñez, que toma en cuenta la forma de la laguna. Como en este caso las lagunas son alargadas, la constante de remoción de coliformes fecales (Kcf) se determina con la siguiente ecuación:

$$K_{cf} = 0.841 \times (1.07)^{(T-20)}$$

$$K_{cf} = 0.841 \times (1.07)^{(13.7-20)} = 0.55081 \text{ días}^{-1}$$

La concentración de coliformes fecales a la salida de la laguna facultativa, está dada por la ecuación 7, considerando la ecuación 8 para determinar el coeficiente de dispersión (Yáñez 1993).

$$CF_e = \frac{C_{fi} \times 4a e^{(1/2d)}}{(1+a)^2 e^{(a/2d)} - (1-a)^2 e^{(-a/2d)}} \quad \text{Ecuación 7}$$

En donde

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392x + 1.01460x^2 + 0.26118} \quad \text{Ecuación 8}$$

Y x es la relación largo ancho de 5, de esta manera se tiene que

$$d = \frac{5}{-0.26118 + 0.25392x(5) + 1.01460x(5^2) + 0.26118} = 0.18958$$

Por otra parte, se tiene que

$$a = [1 + 4(K_{cf})x t x d]^{1/2} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$a = (1 + 4x(0.55081)x(33.8)x(0.18958))^{1/2} = 3.8908$$

Finalmente, sustituyendo los valores en la ecuación 7 tenemos

$$CF_e = \frac{(9.09E+06) \times (4) \times (3.8908) e^{(1/2 \times 0.18958)}}{(1+3.8908)^2 e^{(3.8908/2 \times 0.18958)} - (1-3.8908)^2 e^{(-3.8908/2 \times 0.18958)}}$$

$$CF_{Efluente} = 2.27E+02 \text{ NMP/100 ml}$$

ARIZPE, SONORA

El volumen de agua residual generado por los habitantes de Arizpe es de aproximadamente 475 m³/día (5.5 lps), de los que 380 (4.4 lps) reciben tratamiento y el volumen restante se dispone mediante letrinas o fosas sépticas, y representa un gasto de 95 m³/día (1.1 lps).

El sistema de tratamiento utilizado se localiza sobre la margen derecha del río Sonora, a unos 400 metros al sur de la localidad (véase figura 20). Está constituido por dos lagunas de estabilización, de forma irregular, interconectadas mediante tubería ahogada, con bordos de 2 metros de alto, que ocupan cerca de media hectárea de terreno. Se estima que puede recibir un gasto máximo de 8 lps y su gasto de operación actual es del orden de los 4 lps. El agua llega mediante tubería de concreto oculta a las lagunas, que se encuentran en perfectas condiciones físicas (véase foto 2), aunque el canal de descarga hacia el río se encuentra lleno de maleza.

Figura 20
Lagunas de oxidación de Arizpe, Sonora

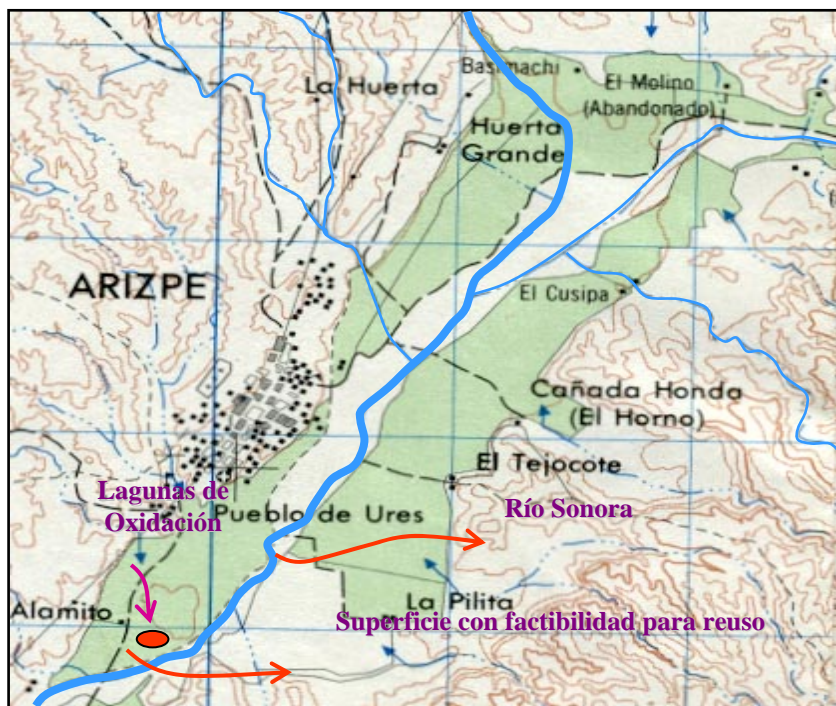


Foto 2
Lagunas de oxidación de Arizpe, Sonora



En lo que respecta a la calidad de las aguas residuales, el análisis estadístico de los resultados obtenidos en muestras de agua en las lagunas, refleja una eficiencia promedio de 90 por ciento de remoción de coliformes fecales, 43.4 de remoción de sólidos suspendidos totales (SST) y para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se tiene una eficiencia de 46.0 por ciento.

Cuadro 13
Análisis del efluente del sistema de tratamiento de Arizpe

Sólidos totales	SST	Sólidos disueltos totales	DBO ₅	DQO	Coliformes fecales
1272	185	1087	19.87	214.6	430 000
634	75	559	60.58	150.9	430 000
658	18	640	26.92	160.7	93 000
574	20	554	8.04	97.43	150 000
838	62	686	30.7	249.2	460 000
630	68	562	18.3	124.7	1 500 000
558	38	520	31	86.2	2 400 000
788	76	712	61.4	159.5	930 000
500	116	684	35.1	191.9	1 400 000

Fuente: Red de Monitoreo de Calidad del Agua, CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste.

Cuadro 14
Parámetros de diseño de la laguna facultativa para Arizpe, Sonora

Parámetro	Unidad	Valor
Gasto de agua residual	Lps (m ³ /día)	9.2 (795.9)
Concentración DBO (Si)	mg/L	139.704
Concentración SST (Xv)	mg/L	185
Concentración coliformes fecales	NMP/100 ml	9.09E+06
Concentración Huevos Helminto	Org/L	600
Evaporación anual	mm	2 202.3
Precipitación anual	mm	468.1
Temperatura media mes más frío	°C	13.3

De un cálculo similar al realizado para la localidad de Aconchi, se tiene que el área de la laguna sería:

$$A = \frac{139.70 \times (795.9)}{(144.9921) \times (1000)} = 1.39 \text{ hectáreas}$$

La profundidad recomendada es de 2 m, por lo que el volumen o capacidad es de:

$$V = A \times h = (1.39) \times (10000) \times 2 = 27\,885 \text{ m}^3$$

Para el cálculo de las dimensiones del sistema lagunar consideramos, al igual que el cálculo anterior, una relación largo/ancho de 5, tenemos que:

$$\begin{aligned} \text{Ancho} = W &= 52.8 \text{ metros} \\ \text{Largo} = L &= 264 \text{ metros} \end{aligned}$$

El tiempo de retención del agua residual en las lagunas, se calcula de acuerdo a la ecuación 6:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{27\,885 \text{ m}^3}{795.9 \text{ m}^3/\text{día}} = 35 \text{ días}$$

El grado de remoción de coliformes fecales de este sistema lagunar sería:

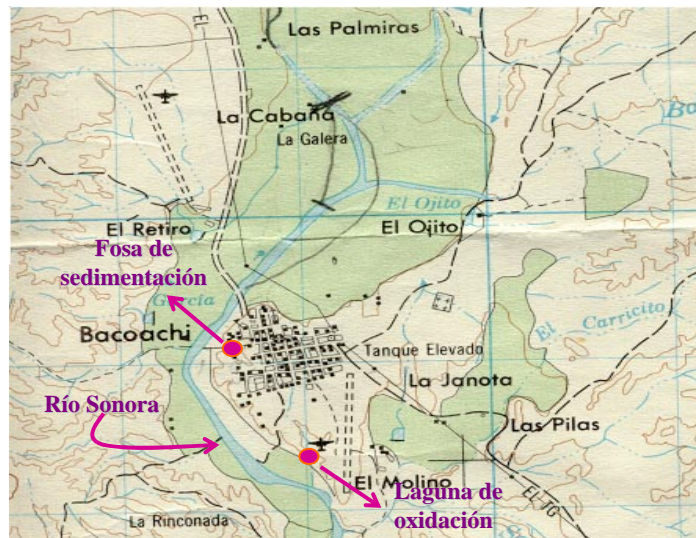
$$CF_e = \frac{(9.09E+06) \times (4) \times (3.90151) e^{(1/2 \times 0.18958)}}{(1+3.90151)^2 e^{(3.90151/2 \times 0.18958)} - (1-3.90151)^2 e^{(-3.90151/2 \times 0.18958)}}$$

$$CF_{Efluente} = 2.2 \text{ E}+02 \text{ NMP/100 ml}$$

BACOACHI, SONORA

El volumen de agua residual generado en la localidad es de aproximadamente 285 m³/día (3.3 lps) y 228 (2.64 lps) recibe tratamiento. En visita de campo realizada por esta comunidad, se detectaron dos descargas de aguas residuales, la descarga que identificaremos como número 1, se conduce mediante tubería de concreto hacia una laguna de oxidación ubicada a unos 200 metros al sureste de la localidad (véase figura 21).

Figura 21
Descargas de Bacoachi, Sonora



Esta laguna, de forma irregular, tiene características similares a los de un pequeño represo, en el sentido de que se construyó aprovechando las características topográficas de la zona, con pequeños cerros como bordos y una cortina de aproximadamente 2.5 m, además de contar con estructura para verter las aguas residuales hacia un canal a cielo abierto, afluente del río Sonora. El sistema puede recibir un gasto máximo de 3.3 lps y a la fecha opera a poco más del 50 por ciento de su capacidad, con un gasto aproximado de 1.6 lps.

La segunda descarga de agua residual, se ubica en la zona norte de la comunidad y se conduce a través de tubería de concreto hacia una especie de fosa de sedimentación, de 4 m de ancho por 4 de largo y 3 de profundidad aproximadamente. El efluente se conduce a través de tubería de concreto hacia el cauce del río Sonora, con un gasto de 1 lps.

Cuadro 15
Datos para el diseño de la laguna

Parámetro	Unidad	Valor
Gasto de agua residual	Lps (m ³ /día)	5.5 (477.6)
Concentración DBO (Si)	mg/L	139.704
Concentración SST (Xv)	mg/L	185
Concentración coliformes fecales	NMP /100 ml	9.09E+06
Concentración Huevos Helminto	Org/L	600
Evaporación anual	mm	2 202.3
Precipitación anual	mm	468.1
Temperatura media mes más frío	°C	10.98

El cálculo de la laguna sería entonces:

$$C_s = (1.085)^{10.98-20}$$

$$C_s = 119.774$$

Para estimar la carga removida de la laguna, se emplean las correlaciones para lagunas facultativas primarias:

$$C_{sr} = 0.8063C_s + 7.67$$

$$C_{sr} = 0.8063 \times (119.774) + 7.67$$

$$C_{sr} = 104.244$$

$$\text{El área de la laguna} = A = \frac{139.70 \times (477.6)}{(119.774) \times (1000)} = 1.01 \text{ ha}$$

La profundidad recomendada es de 2 m, por lo que el volumen o capacidad es de:

$$V = A \times h = (1.01) \times (10000) \times 2 = 20\,258 \text{ m}^3$$

Considerando una relación largo/ancho de 5.

$$\text{Relación Largo/ancho} = L/W = 5 = L = 5W$$

$$\text{Área} = L \times W$$

$$\text{Área} = 5 W^2$$

$$(1.01) \times (10000) = 5 W^2$$

$$W = 45 \text{ metros}$$

$$L = 225 \text{ metros}$$

El tiempo de retención sería de:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{20\,258 \text{ m}^3}{477.6 \text{ m}^3/\text{día}} = 42.4 \text{ días}$$

La concentración de coliformes fecales esperada a la salida de la laguna facultativa sería de:

$$CF_e = \frac{(9.09E+06) \times (4) \times (3.96146) e^{(1/2 \times 0.18958)}}{(1+3.96146)^2 e^{(3.96146/2 \times 0.18958)} - (1-3.96146)^2 e^{(-3.96146/2 \times 0.18958)}}$$

$$CF_{\text{Efluente}} = 1.87 \text{ E}+02 \text{ NMP/100 ml}$$

BANÁMICHÍ, SONORA

El volumen de agua residual generado por los habitantes de Banámichi es de aproximadamente 190 m³/día (2.2 lps) y 160 (1.85 lps) reciben tratamiento. Las aguas residuales se conducen, mediante tubería de concreto, hacia un sistema de tratamiento compuesto por dos lagunas de estabilización, interconectadas por tubería de concreto ahogada y estructura para verter las aguas residuales hacia un canal a cielo abierto, que descarga hacia el cauce del río Sonora.

El sistema de lagunas se encuentra ubicado a unos 2 000 metros al suroeste de la localidad y ocupa una superficie de aproximadamente 0.5 hectáreas, con bordos de 1.5 metros. El gasto de diseño de las lagunas es de 6 litros por segundo y, a la fecha, sólo recibe 1.8 lps (véanse figura 22 y foto 3).

Figura 22
Descarga de Banámichi, Sonora



En la zona de la descarga existen casi 60 hectáreas de terrenos de cultivo, que en un momento determinado pudieran aprovechar las aguas residuales tratadas para el riego de forrajes. El análisis estadístico de los resultados obtenidos en el monitoreo del sistema indica una eficiencia promedio de más de 90 por ciento de remoción de coliformes fecales, 45.4 de sólidos suspendidos totales (SST) y para la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se tiene una eficiencia de 30.7 por ciento.

Foto 3
Laguna de la comunidad de Banámichi, Sonora



Cuadro 16

Datos de diseño de una laguna facultativa para la localidad de Banámichi, Sonora

Parámetro	Unidad	Valor
Gasto de agua residual	Lps (m ³ /día)	5.5 (477.6)
Concentración DBO (Si)	mg/L	139.704
Concentración SST (Xv)	mg/L	185
Concentración coliformes fecales	NMP/100 ml	9.09E+06
Concentración Huevos Helminto	Org/L	600
Evaporación anual	mm	2 202.3
Precipitación anual	mm	468.1
Temperatura media mes más frío	°C	10.98

La carga removida de la laguna sería:

$$C_{sr} = 0.8063C_s + 7.67 = C_{sr} = 0.8063 \times (119.774) + 7.67 = C_{sr} = 104.244$$

Y el área de la laguna:

$$\text{Área} = A = \frac{139.70 \times (477.6)}{(119.774) \times (1000)} = 1.01 \text{ ha}$$

La profundidad de una laguna facultativa es de 2 m, por lo que el volumen o capacidad es de:

$$V = A \times h = (1.01) \times (10000) \times 2 = 20\,258 \text{ m}^3$$

Para una relación largo/ancho de 5 metros.

$$\begin{aligned} \text{Área} &= 5 W^2 \\ (1.01) \times (10000) &= 5 W^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= 45 \text{ metros} \\ L &= 225 \text{ metros} \end{aligned}$$

El tiempo de retención del agua residual en las lagunas sería

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{20\,258 \text{ m}^3}{477.6 \text{ m}^3/\text{día}} = 42.4 \text{ días}$$

Finalmente, la concentración de coliformes fecales esperada en el efluente sería:

$$CF_e = \frac{(9.09E+06) \times (4) \times (3.96146) e^{(1/2 \times 0.18958)}}{(1+3.96146)^2 e^{(3.96146/2 \times 0.18958)} - (1-3.96146)^2 e^{(-3.96146/2 \times 0.18958)}}$$

$$CF_{\text{Efluente}} = 1.87 \text{ E}+02 \text{ NMP/100 ml}$$

BAVIÁCORA, SONORA

El volumen de agua residual generado por los habitantes de Baviácora es de aproximadamente 785.0 m³/día (9 lps), y 604.45 (7 lps) recibe tratamiento, a través de un sistema compuesto por una laguna de estabilización, con dimensiones de cerca de 60 m de ancho por 80 de largo, diseñado para recibir un gasto máximo de 6 lps, a la fecha opera a 30 por ciento de su capacidad, ya que en promedio recibe un gasto de 1.8 litros por segundo; cuenta con estructura para verter las aguas residuales hacia un canal a cielo abierto, que descarga hacia el cauce del río Sonora.

El sistema de tratamiento se localiza a seis kilómetros de la comunidad y está rodeado por ranchos y terrenos agrícolas, donde se cultiva cacahuate, chile, ajo y forrajes, entre otros. El efluente tratado descarga en la margen izquierda del río Sonora y su calidad cumple con los límites permisibles establecidos, a excepción de los coliformes fecales.

Foto 4
Laguna de oxidación de Baviácora, Sonora



Foto 5
Efluente de la laguna de oxidación de Baviácora



El análisis estadístico de los resultados, obtenidos en el monitoreo de tratamiento, refleja una eficiencia promedio de más de 90 por ciento de remoción de coliformes fecales, 45.4 de SST y para la DBO se tiene una eficiencia de 30.7 por ciento.

Cuadro 17

Datos de diseño de una laguna facultativa para la localidad de Baviácora, Sonora

Parámetro	Unidad	Valor
Gasto de agua residual	Lps (m ³ /día)	14.6 (1 264)
Concentración DBO (Si)	mg/L	139.704
Concentración SST (Xv)	mg/L	185
Concentración coliformes fecales	NMP/100 ml	9.09E+06
Concentración Huevos Helminto	Org/L	600
Evaporación anual	mm	2 136.15
Precipitación anual	mm	468.1
Temperatura media mes más frío	°C	9.1

La carga removida de la laguna sería:

$$C_{sr} = 0.8063C_s + 7.67 = C_{sr} = 0.8063 \times (102.7) + 7.67 = C_{sr} = 90.51$$

$$\text{Área} = A = \frac{139.70 \times (1264)}{(102.7) \times (1000)} = 3.13 \text{ ha}$$

La profundidad de una laguna facultativa es de 2 m, por lo que el volumen o capacidad es de:

$$V = A \times h = (3.13) \times (10000) \times 2 = 62\,517 \text{ m}^3$$

Para una relación largo/ancho de 5.

$$W = 79 \text{ metros}$$

$$L = 395 \text{ metros}$$

El tiempo de retención del agua residual en las lagunas sería:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{62\,517 \text{ m}^3}{1\,264 \text{ m}^3/\text{día}} = 42.4 \text{ días}$$

Finalmente, la concentración de coliformes fecales esperada en el efluente sería:

$$C_{Fe} = \frac{(9.09E+06) \times (4) \times (4.0134) e^{(1/2 \times 0.18958)}}{(1+4.01034)^2 e^{(4.0134/2 \times 0.18958)} - (1-4.0134)^2 e^{(-4.0134/2 \times 0.18958)}}$$

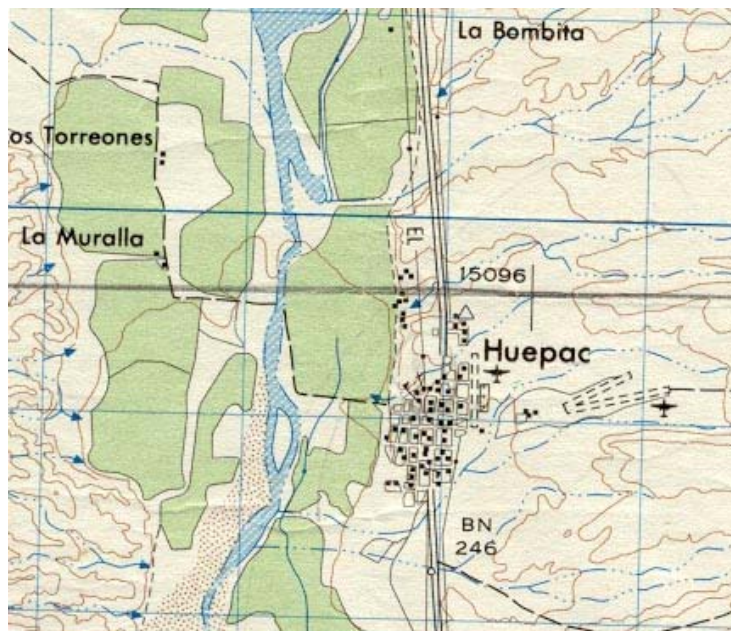
$$C_{F\text{Efluente}} = 2.48 \text{ E}+02 \text{ NMP/100 ml}$$

HUÉPAC, SONORA

La localidad de Huépac se ubica sobre la margen izquierda del río Sonora, aproximadamente a 135 kilómetros al noreste de la ciudad de Hermosillo. Las principales actividades económicas de la comunidad son la agricultura y la ganadería. De acuerdo con los resultados del XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (INEGI), tiene 1 647 habitantes.

En 2000, la cobertura del servicio de agua potable era de 95 por ciento. Su sistema de distribución, cuenta con equipo de desinfección con cloro y está compuesto por dos pozos, que en conjunto tienen capacidad para producir un gasto máximo de 28.0 lps y el gasto abastecido es del orden de los 10 lps. En cuanto a servicios de alcantarillado, la cobertura en ese mismo año era de casi 85 por ciento y el volumen de agua residual generado por la población de 305 m³/día (3.5 lps). De éste volumen, 85 por ciento (259.2 m³/día, 3.0 lps) recibe tratamiento en una serie de lagunas de oxidación, cuyo efluente se conduce a través de tubería hacia el cauce del río Sonora. La población que no cuenta con el servicio de alcantarillado (15%), elimina las aguas residuales a través de letrinas o fosas sépticas, y representa un gasto de aproximadamente 45.8 m³/día (0.5 lps).

Figura 23
Huépac, Sonora



El sistema de tratamiento de aguas residuales, está integrado por una laguna de oxidación, de forma irregular, que ocupa una superficie de media hectárea. Dicha laguna se diseñó para recibir un gasto máximo de 4.3 lps y a la fecha opera al 70 por ciento de su capacidad, que equivale a un gasto tratado de tres litros por segundo.

El sistema de lagunas requiere mantenimiento, ya que los bordos están totalmente cubiertos de maleza, arbustos y árboles de regular tamaño que dificultan el acceso a la caja de entrada y de salida de agua residual. De acuerdo a los análisis, realizados por el Laboratorio de Calidad del Agua de esta Gerencia Regional, la calidad del agua descargada por el sistema de tratamiento, aún en las condiciones deficientes en las que opera, alcanza niveles de remoción de 76.1 por ciento de materia fecal, 34.4 en SST y 66.0 por ciento en la DBO.

Cuadro 18
Datos de diseño de una laguna facultativa para Huépac, Sonora

Parámetro	Unidad	Valor
Gasto de agua residual	Lps (m ³ /día)	4.4 (384.2)
Concentración DBO (Si)	mg/L	139.704
Concentración SST (Xv)	mg/L	185
Concentración coliformes fecales	NMP/100 ml	9.09E+06
Concentración Huevos Helminto	Org/L	600
Evaporación anual	mm	2 136.15
Precipitación anual	mm	468.1
Temperatura media mes más frío	°C	12.26

Carga removida de la laguna:

$$C_{sr} = 0.8063C_s + 7.67 = C_{sr} = 0.8063 \times (132.958) + 7.67 = C_{sr} = 114.874$$

$$\text{Área} = A = \frac{139.70 \times (384.2)}{(132.9) \times (1000)} = 0.73 \text{ ha}$$

La profundidad de una laguna facultativa es de 2 m, por lo que el volumen o capacidad es de:

$$V = A \times h = (0.73) \times (10000) \times 2 = 14\,680 \text{ m}^3$$

Para una relación largo/ancho de 5.

$$W = 38.3 \text{ metros}$$

$$L = 191.6 \text{ metros}$$

El tiempo de retención del agua residual en las lagunas sería:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{14\,680 \text{ m}^3}{384.2 \text{ m}^3/\text{día}} = 38.2 \text{ días}$$

Finalmente, la concentración de coliformes fecales esperada en el efluente sería:

$$CF_e = \frac{(9.09E+06) \times (4) \times (3.92857) e^{(1/2 \times 0.18958)}}{(1+3.92857)^2 e^{(3.92857/2 \times 0.18958)} - (1-3.92857)^2 e^{(-3.92857/2 \times 0.18958)}}$$

$$CF_{\text{Efluente}} = 2.04 \text{ E}+02 \text{ NMP/100 ml}$$

SAN FELIPE DE JESÚS, SONORA

San Felipe de Jesús se localiza sobre la margen derecha del río Sonora, aproximadamente a 160 km al noreste de la ciudad de Hermosillo. Las principales actividades económicas de la comunidad son la agricultura y ganadería. De acuerdo con los resultados del XII Censo General de Población y Vivienda 2000 (INEGI), cuenta con 395 habitantes.

La cobertura del servicio de agua potable, en el año 2000, era de 97 por ciento. Su sistema de distribución cuenta con equipo de desinfección con cloro y está compuesto por un pozo, con capacidad para producir un gasto máximo de 5.0 lps y a la fecha, el gasto abastecido es de 1.5. Respecto a los servicios de alcantarillado, en ese mismo año se cubría 80 por ciento, y el volumen de agua residual generado es de casi 60 m³/día (0.7 lps). De este volumen, 97 por ciento (51.8 m³/día, 0.6 lps) recibe tratamiento en una serie de lagunas de oxidación, cuyo efluente se conduce a través de tubería hacia el cauce del río Sonora.

Foto 6
Laguna de oxidación de San Felipe de Jesús



La población que no cuenta con alcantarillado, elimina las aguas residuales a través de fosas sépticas o letrinas y representa un gasto de cerca de 8.2 m³/día (0.1 lps).

El sistema de tratamiento de aguas residuales se integra por dos lagunas de oxidación, de forma irregular, que ocupan aproximadamente una hectárea y no están conectadas en serie, sino que se utilizan en forma alternada, cuando alguna de ellas llega a su capacidad máxima. Se diseñaron para recibir un gasto máximo de 2.9 litros por segundo y, a la fecha, opera a 200 por ciento de su capacidad, que equivale a un gasto tratado de 0.6 litros por segundo. Además, el sistema requiere mantenimiento, ya que la caja de entrada se encuentra totalmente azolvada.

Cuadro 19
Datos de diseño para la construcción de lagunas en San Felipe de Jesús, Sonora

Parámetro	Unidad	Valor
Gasto de agua residual	Lps (m ³ /día)	2.1 (180.1)
Concentración DBO (Si)	mg/L	139.704
Concentración SST (Xv)	mg/L	185
Concentración coliformes fecales	NMP/100 ml	9.09E+06
Concentración Huevos Helminto	Org/L	600
Evaporación anual	mm	2 136.15
Precipitación anual	mm	468.1
Temperatura media mes más frío	°C	12.3

El cálculo sería para la carga removida de la laguna:

$$C_{sr} = 0.8063C_s + 7.67 = C_{sr} = 0.8063 \times (132.958) + 7.67 = C_{sr} = 114.874$$

$$\text{Área} = A = \frac{139.70 \times (180.1)}{(132.9) \times (1000)} = 0.34 \text{ ha}$$

La profundidad de una laguna facultativa es de 2 m, por lo que el volumen o capacidad es de:

$$V = A \times h = (0.34) \times (10000) \times 2 = 6881 \text{ m}^3$$

Para una relación largo/ancho de 5.

$$W = 26.2 \text{ metros}$$

$$L = 131.2 \text{ metros}$$

El tiempo de retención del agua residual en las lagunas sería:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{6881 \text{ m}^3}{180.1 \text{ m}^3/\text{día}} = 38.2 \text{ días}$$

Finalmente, la concentración de coliformes fecales esperada en el efluente sería:

$$C_{Fe} = \frac{(9.09E+06) \times (4) \times (3.92857) e^{(1/2 \times 0.18958)}}{(1+3.92857)^2 e^{(3.92857/2 \times 0.18958)} - (1-3.92857)^2 e^{(-3.92857/2 \times 0.18958)}}$$

$$C_{F_{\text{Efluente}}} = 2.04 \text{ E}+02 \text{ NMP/100ml}$$

URES, SONORA

El municipio está ubicado al centro del estado de Sonora, su cabecera es la población de Ures, y colinda al norte con Aconchi, al este con Villa Pesqueira, al sur con Mazatán, al oeste con Hermosillo y San Miguel de Horcasitas, al noreste con Baviácora, y al noroeste con Rayón. El municipio posee una extensión territorial de 2 618.56 km², que representa 1.41 por ciento del total estatal y 0.13 del nacional, cuenta con una densidad de población de 27 habitantes por km². Las localidades más importantes, además de la cabecera, son Guadalupe de Ures, San Pedro, Pueblo de Álamos y El Sauz.

El comportamiento de la población, según los censos de 1980, 1990 y las cifras del Censo General de Población y Vivienda 2000 elaborados por el INEGI, es el siguiente:

Población			Tasa de crecimiento (%)	
1980	1990	2000	1980/1990	1990/2000
10 337	10 140	9 565	-0.2	-0.59

Fuente: INEGI, Censo General de Población y Vivienda 1980-1990 y 2000.

La población económicamente activa del municipio es de 3 269 habitantes, de los cuales 3 245 tienen ocupación y 24 se encuentran desocupados. De las personas ocupadas, 1 243 se dedican al sector primario, 741 al sector secundario, 1 144 al terciario y 117 no especifican actividad.

En el 2000, la cobertura del servicio de agua potable era de 97 por ciento. Su sistema de distribución cuenta con equipo de desinfección con cloro, y está compuesto por dos pozos, con capacidad para producir un gasto máximo de 44 lps y a la fecha el gasto abastecido es de 30 lps. En lo que respecta a los servicios de alcantarillado, la cobertura en ese mismo año era de casi 80 por ciento, y el volumen generado de agua residual es de aproximadamente 1 641 m³/día (19 lps).

El sistema de tratamiento de aguas residuales se integra por dos lagunas de oxidación, de forma irregular, diseñadas para recibir un gasto máximo de 21 lps y, a la fecha, opera al 90 por ciento de su capacidad, que equivale a un gasto tratado de 19 lps. Requiere mantenimiento, ya que la caja de entrada se encuentra azolvada y los bordos llenos de maleza.

Cuadro 20
Datos de diseño para la construcción de lagunas en Ures, Sonora

Parámetro	Unidad	Valor
Gasto de agua residual	Lps (m ³ /día)	19 (1 641.6)
Concentración DBO (Si)	mg/L	139.704
Concentración SST (Xv)	mg/L	185
Concentración coliformes fecales	NMP/100 ml	9.09E+06
Concentración Huevos Helminto	Org/L	600
Evaporación anual	mm	264.58
Precipitación anual	mm	402
Temperatura media mes más frío	°C	16

El cálculo sería para carga removida de la laguna:

$$C_{sr} = 0.8063C_s + 7.67 = C_{sr} = 0.8063 \times (179.953) + 7.67 = C_{sr} = 152.7$$

$$\text{Área} = A = \frac{139.70 \times (1641.6)}{(179.953) \times (1000)} = 2.3 \text{ ha}$$

La profundidad de una laguna facultativa es de 2 m, por lo que el volumen o capacidad es de:

$$V = A \times h = (0.34) \times (10000) \times 2 = 46\,342 \text{ m}^3$$

Para una relación largo/ancho de 5.

$$W = 68 \text{ metros}$$

$$L = 340 \text{ metros}$$

El tiempo de retención del agua residual en las lagunas sería:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{46\,342 \text{ m}^3}{1\,641.6 \text{ m}^3/\text{día}} = 28.2 \text{ días}$$

Finalmente, la concentración de coliformes fecales esperada en el efluente sería:

$$CF_e = \frac{(9.09E+06) \times (4) \times (3.8349) e^{(1/2 \times 0.18958)}}{(1+3.8349)^2 e^{(3.8349/2 \times 0.18958)} - (1-3.8349)^2 e^{(-3.8349/2 \times 0.18958)}}$$

$$CF_{\text{Efluente}} = 2.65 \text{ E}+02 \text{ NMP/100ml}$$

VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La factibilidad de reuso de las aguas residuales tratadas, en este momento, no es posible, ya que los sistemas lagunares de las localidades de la cuenca del río Sonora no cumplen con la normativa ambiental vigente. El efluente de estos sistemas lagunares se vierte de manera intermitente hacia el cauce del río, una vez que se sobrepasa la capacidad de las lagunas.

Desde la perspectiva de análisis del escenario de “no hacer nada”, tendríamos la situación actual de las descargas hacia el río Sonora y cuantificaríamos el impacto ambiental ocasionado por el vertimiento de las aguas residuales.

El Laboratorio de Calidad del Agua de la Gerencia Regional Noroeste de la Comisión Nacional del Agua, de 1989 a 1995, tenía cinco estaciones de monitoreo sobre el cauce del río Sonora y a partir de 1999 las redujo a tres, debido al escaso flujo en algunas estaciones.

Los resultados del monitoreo de la calidad del agua del río Sonora se muestran en el cuadro 21 y en la figura 24, donde observamos que la concentración de coliformes fecales está por debajo del límite permisible establecido en los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua (CECA), de lo cual se deduce que la capacidad de asimilación del río es muy alta, aunque no tenemos elementos suficientes para realizar un balance de masa y cuantificarla.

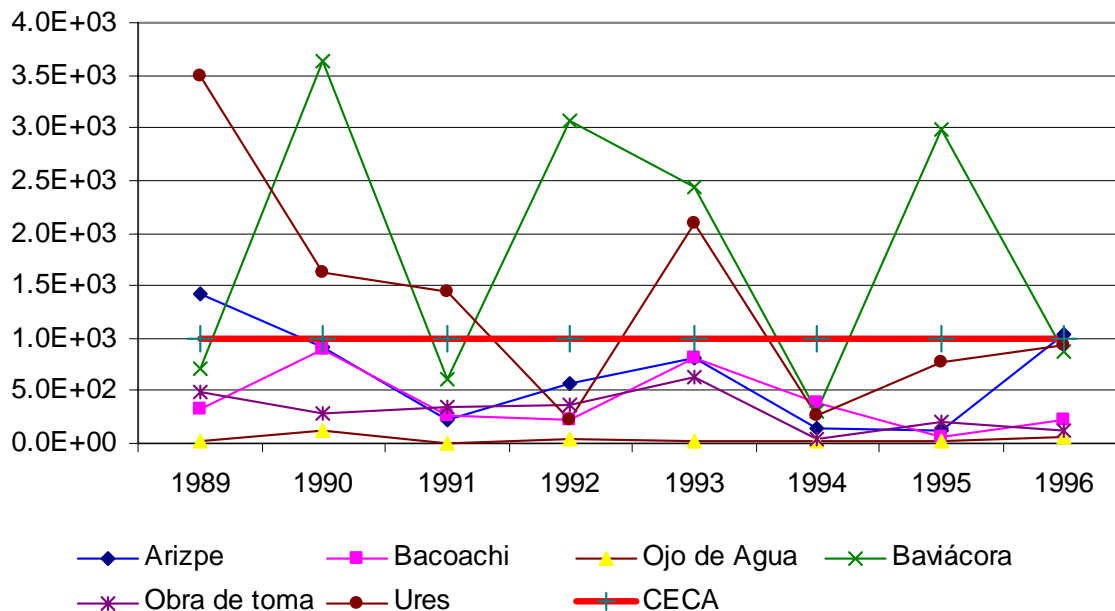
Sin embargo, se observan valores por encima de los límites permitidos para coliformes fecales en el río Sonora, a la altura de la estación ubicada en la localidad de Baviácora, posiblemente debido a las descargas de aguas residuales de granjas porcícolas ubicadas en esa zona.

Cuadro 21
Concentración de coliformes fecales en el río Sonora, 1989-1996

Año	Arizpe	Bacoachi	Ojo de Agua	Baviácora	Obra de toma	Ures	CECA
1989	1.4E+03	3.2E+02	2.3E+01	7.2E+02	4.9E+02	3.5E+03	1.0E+03
1990	9.1E+02	9.0E+02	1.2E+02	3.6E+03	2.8E+02	1.6E+03	1.0E+03
1991	2.2E+02	2.7E+02	8.1E+00	6.0E+02	3.5E+02	1.4E+03	1.0E+03
1992	5.6E+02	2.2E+02	3.7E+01	3.1E+03	3.7E+02	2.2E+02	1.0E+03
1993	8.2E+02	8.1E+02	2.0E+01	2.4E+03	6.3E+02	2.1E+03	1.0E+03
1994	1.4E+02	3.8E+02	1.4E+01	3.1E+02	4.2E+01	2.6E+02	1.0E+03
1995	1.3E+02	5.6E+01	2.0E+01	3.0E+03	2.0E+02	7.8E+02	1.0E+03
1996	1.0E+03	2.2E+02	5.3E+01	8.7E+02	1.1E+02	9.3E+02	1.0E+03

Fuente: Red de Monitoreo de la Calidad del Agua. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste

Figura 24
Concentración de coliformes fecales en el río Sonora



Fuente: Red de Monitoreo de la Calidad del Agua. CONAGUA. Gerencia Regional Noroeste

Los sistemas de tratamiento de las localidades del río Sonora, aunque están abandonados, operan a una eficiencia considerable, aunque insuficiente para dar cumplimiento a la normatividad ambiental vigente. Se considera que el incumplimiento de la normativa se debe a que, en algunos casos, no se realizaron los cálculos básicos para su construcción, sino que se aprovecharon las condiciones topográficas de terreno; mientras que en otros, la aportación de aguas residuales supera la capacidad de los sistemas lagunares.

A reserva de realizar cálculos más precisos, en el diseño de los sistemas lagunares del río Sonora, las lagunas requieren aumentar la altura de los bordos y la longitud de las lagunas, de 40 a 50 metros en promedio, con lo que se duplicaría el tiempo de residencia de las aguas residuales y la concentración de coliformes fecales en el efluente cumpliría con los límites máximos permisibles para uso en riego agrícola.

Los conflictos derivados de las condiciones de escasez del recurso hídrico son bastante complejos, en razón de que convergen múltiples intereses (sociales, económicos, políticos, culturales, ambientales), y en el que -como en cualquier otro escenario social- las acciones de un actor repercuten en las de todos los demás, de ahí la importancia de diseñar mecanismos que coordinen las diversas actividades.

La gestión integrada del recurso hídrico debe cuantificar, en primera instancia, los impactos ocasionados por los diversos usuarios y la forma en que éstos repercuten en las actividades de los demás actores, incluyendo al medio ambiente. Es decir, nuestras acciones deben encaminarse también a la conservación del suelo y la vegetación, para lograr el desarrollo sostenido o sostenible de los recursos naturales, que establece la normativa ambiental, que debe ser aquel que compatibilice los usos con la conservación de los ecosistemas.

De esta manera, una vez cuantificados los efectos derivados de las condiciones de escasez o de sequía revisados en el capítulo 7 de este trabajo, podemos analizar y proponer alternativas de mitigación de tales impactos a través del reuso de las aguas tratadas.

AGUAS TRATADAS Y MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS AL MEDIO AMBIENTE

GASTO ECOLÓGICO

Las obras de captación superficial y subterránea, y el mejoramiento de la eficiencia de conducción, a base de revestimiento de canales, ha permitido recuperar volúmenes importantes de agua, pero también se ha perdido o interrumpido el flujo natural del agua en

la cuenca, situación que se aprecia en la pérdida de cobertura vegetal y erosión. Ambas formas de impacto alteran el régimen de circulación y la calidad de las aguas.

En el capítulo 6 de este documento se realiza un cálculo de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Sonora, pero no considera el gasto ecológico, necesario para la preservación de la flora y fauna de la cuenca aguas abajo, por lo que el vertimiento permanente de aguas tratadas hacia el cauce del río incrementaría la disponibilidad de aguas superficiales y garantizaría el flujo del gasto ecológico que establecen las leyes en la materia.

Bajo este escenario, se estima conveniente la aplicación de un nuevo planteamiento del cálculo de disponibilidad, que considere los flujos o gastos de las aguas tratadas en el balance hidráulico.

REFORESTACIÓN

En materia de deforestación, la problemática que se plantea en la región se deriva de los cambios significativos en el uso del suelo, incremento de la superficie con pastos inducidos y crecimiento de la mancha urbana, lo cual se refleja en la disminución significativa de la superficie de matorrales y la selva baja, siendo el mezquite la especie más afectada, con una reducción de la superficie que sobrepasa las 300 mil ha.

Para mitigar los efectos de la deforestación, se podría considerar la construcción de viveros para la producción de las especies más afectadas en la cuenca, e incluir el cultivo de plantas y flores de ornato, cuya venta permita el sostenimiento económico de la infraestructura. La inversión o gestión de los recursos para la construcción, podría realizarlos el H. Ayuntamiento municipal de las localidades de la cuenca o bien, a través de los organismos operadores de agua potable, mientras que la operación, mantenimiento y ejecución de los programas de reforestación podría estar a cargo de las instituciones de educación básica y media superior de la región.

La Comisión Nacional Forestal cuenta con un programa de capacitación y brinda apoyos para proyectos de producción, conservación y restauración forestal, por lo que existen los elementos indispensables para definir un programa de reforestación permanente y auto sostenible (con la venta de flores y plantas) que, además, fomentaría la cultura forestal y de cuidado al medio ambiente de las nuevas generaciones.

AGUAS TRATADAS Y MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS EN LA AGRICULTURA

Los impactos a la agricultura, derivados de la escasez del recurso hídrico, se cuantifican en la disminución de la superficie cultivada. Con los cambios al patrón de cultivos se ha incrementado el valor de la producción con menos superficie cultivada, pero en materia de volúmenes de agua no se observa un cambio significativo.

En este sentido, las propuestas en materia agrícola deberán enfocarse a la búsqueda de cultivos, formas o sistemas de producción y de riego, que permitan la máxima producción con el menor uso de superficie y consumo de agua.

Por ejemplo, un productor de la cuenca del río Sonora ocupa 1 200 litros de agua para producir 1 kg de trigo y con la venta obtiene una ganancia de dos pesos; mientras que, si cultiva tomate necesitará de 290 litros de agua y obtendrá una ganancia de 1.9 pesos; para producir 1 kg de uva de mesa se requieren 900 litros de agua y la ganancia del productor sería de 14 pesos.

CULTIVO DE MAGUEY

Un cultivo alternativo podría ser el maguey, el cual se utilizaría para la producción de bacanora, que es una actividad artesanal y común en las localidades rurales de la entidad. Generalmente la familia guarda parte del producto para su consumo y el resto representa un ahorro, que vende conforme se requieren ingresos.

La materia prima se obtiene de plantas silvestres, los costos para cosechar varían según la localización de la planta madura, se requiere de traslado con bestia para colocarla

en vehículos que la transporten a los hornos; las distancias son variables. La producción de bacanora con Maguey cultivado es lenta, ya que la planta se tarda de 6 a 8 años para madurar.

De acuerdo con la información recabada en campo, el cultivo de maguey se realiza con una densidad de 350 plantas por hectárea y con maduración de 20 por ciento anual, a razón de 30 kg por planta de material procesable (1 050 kg de maguey maduro /ha/año) y se requieren de 8 a 11 kg de maguey maduro para producir 1 litro de bacanora. Trescientas cincuenta plantas con maduración de 20 por ciento anual, a razón de 40 kg por planta, producen $70 \times 40 = 2,800$ kilogramos de maguey maduro por hectárea por año. El volumen de agua residual tratada, que generan las localidades del río Sonora, es suficiente para el cultivo de 200 hectáreas con una lámina de riego de 80 centímetros.

Si consideramos el cultivo de 50 hectáreas, tenemos que: $50 \text{ ha} \times 2.8 \text{ ton/ha} = 140$ toneladas de maguey maduro al año, a razón de 8 kg de maguey para producir un litro de mezcal, permitirían producir 17 500 litros de bacanora, que a la fecha tiene un precio de 250 pesos por litro, con lo cual se tiene un valor de producción de 4 375 000 pesos al año.

Cuadro 22
Productividad estimada en el cultivo de maguey

Ha	Plantas	Ton/ Ha	Kg maguey / Lt Bacanora	Volumen de producción		Valor de producción	
				Ton.	Lts Bac.	\$/Lt	\$/Año
1	350	2.80	8 -11	2.8	350	250	87 500
5	1750	2.80	8 -11	14.0	1 750	250	437 500
10	3 500	2.80	8 -11	28.0	3 500	250	875 000
15	5 250	2.80	8 -11	42.0	5 250	250	1 312 500
20	7 000	2.80	8 -11	56.0	7 000	250	1 750 000
50	17 500	2.80	8 -11	140.0	17 500	250	4 375 000
200	70 000	2.80	8 -11	560.0	70 000	250	17 500 000

Fuente: elaboración propia.

Por lo anterior, se considera que el cultivo de maguey es un negocio con alto potencial, ya que se estarían aplicando entre 8 000 y 12 000 m³ de agua tratada por hectárea cultivada, para obtener 350 litros de bacanora con un valor de producción de 87 500 pesos.

En otras palabras, un productor de bacanora necesitaría de 34 litros de agua para producir 1 litro de bacanora y de su venta obtendría de 180 a 250 pesos.

El cultivo de esta planta es una forma de hacer sustentable el manejo del agua, al darle un valor agregado e incrementar la productividad en términos económicos. Sin embargo, también puede considerarse como práctica de reforestación, para mitigar los efectos causados por el aprovechamiento de la planta silvestre.

En la actualidad, el maguey silvestre es utilizado, en su mayoría, para la producción de bacanora, lo que limita enormemente su volumen de producción. Los requerimientos de tratamiento técnico agrícola en su cultivo son mínimos, previendo sólo algunos cuidados para su manejo y protección.

El maguey es una planta perenne, que se reproduce durante todo el año, por lo que su cosecha puede ocurrir en cualquier momento; sin embargo, la calidad y cantidad del aguardiente mantiene una estrecha relación con el contenido de azúcares en la planta, por lo que también está ligado con la dinámica de lluvias en la región.

OTROS CULTIVOS

El rediseño de las lagunas permitiría cumplir con los límites máximos permisibles y disponer de un volumen de agua del orden de 1.8 Mm^3 al año, suficiente para el cultivo de una superficie de 150 hectáreas, considerando una lámina de riego promedio de 1.1 metros. Con el cumplimiento de los límites permisibles no se tienen restricciones para el uso del agua en cualquier tipo de cultivo. En el cuadro 23 se muestra una serie de cultivos en los que se podría aprovechar el agua y que representa un valor de la producción del orden de los 2.8 millones de pesos por ciclo agrícola, además de los empleos indirectos que generaría.

Cuadro 23
Productividad estimada en otros cultivos

Cultivo	Lámina de riego (cm)	Superficie (Ha)	Volumen de agua (m ³)	Rendimiento (Ton /año)	Precio (\$/Ton)	Valor (\$)
Cítricos	1	20	200 000	25	1 200	600 000
Nogal	1.1	20	220 000	1.7	20 000	680 000
Maíz	1	20	200 000	7	1 800	252 000
Alfalfa	1.3	90	1 170 000	13.5	1 100	1 336 500
Suma / Promedio	1.1	150	1 790 000	11.8	6 025	2 868 500

Fuente: Elaboración propia

AGUAS TRATADAS Y MITIGACIÓN DE LOS IMPACTOS EN LA GANADERÍA

Uno de los impactos de las condiciones de sequía en la cuenca del río Sonora tiene que ver con las altas temperaturas que sufren los animales y la falta de agua para beber, situación que se ha visto atenuada con el Programa “Apoyo a la construcción de repesos y perforación de pozos” implementado por el Gobierno del estado de Sonora.

Sin embargo, la situación más crítica es la falta de alimento, ya que la poca disponibilidad de agua ha motivado el decremento de la superficie cultivada de forraje y por consecuencia, la disminución del hato ganadero en la cuenca.

Las aguas residuales tratadas podrían utilizarse para el cultivo de aproximadamente 90 hectáreas de forraje, que significaría el aprovechamiento de 1.17 Mm³ de agua tratada, con lo cual se obtendría una producción de 1 215 toneladas de alimento para ganado. Es importante destacar que actualmente se utiliza equipo de bombeo para el riego de esta superficie, factor determinante en la estimación de los costos de producción, ya que el abatimiento de los mantos acuíferos incrementa año con año el consumo de energía eléctrica. Las aguas residuales tratadas representan una fuente directa de agua, que no estaría sujeta a las condiciones climáticas, además del ahorro que representa por consumo de energía eléctrica.

Si consideramos que, en promedio, se requieren de 0.35 kw-hr para extraer un m³ de agua, entonces se requerirían alrededor de 350 000 kw-hr para extraer de los pozos 1.17 Mm³ de agua; el costo promedio por kw-hr es de 0.35 pesos, lo cual significa un ahorro para los productores de 120 000 pesos por ciclo agrícola.

Las principales localidades de la cuenca alta y media del río Sonora dan tratamiento a sus aguas residuales, a través de lagunas de estabilización, aunque estos sistemas de tratamiento están totalmente abandonados, la eficiencia de remoción promedio en la zona es de 70 por ciento para DBO y de casi 90 por ciento para coliformes fecales.

A pesar de la alta eficiencia de remoción de la carga bacteriológica, el efluente de los sistemas de tratamiento no cumple con los límites establecidos en la norma oficial (1 000 NMP/100 ml), ya que los valores detectados en las descargas oscilan entre 45 000 a 250 000 NMPI 100 ml, por lo que su uso no es recomendable para ningún tipo de actividad, bajo esas condiciones.

Los responsables de los organismos operadores de agua potable y saneamiento, no cuentan con memoria de cálculo o diseño de los sistemas lagunares. Algunos de ellos construidos simplemente con la finalidad de contener las aguas residuales de la localidad, aprovechando las hondonadas y depresiones de terreno para abatir los costos de construcción.

Derivado de las visitas de personal de las dependencias federales ha sido posible el conocimiento de la teoría básica de operación de estos sistemas, que en un tiempo fueron consideradas como una forma de disponer las aguas residuales, no como tratamiento.

El reuso de las aguas residuales en la región hasta hace algunos años era una idea rechazada de manera generalizada por la población, pero las condiciones de escasez o de sequía que afecta en todos los ámbitos, ha motivado que el reuso del agua sea considerado como una opción, principalmente para el riego de forrajes.

Por otra parte, en los últimos once años esta región del estado de Sonora se ha visto afectada por un descenso en las precipitaciones pluviales, lo que se manifiesta en los bajos escurrimientos superficiales y la escasa disponibilidad de agua en las presas, impactando a las diferentes actividades económicas y productivas de la zona, por lo que el aprovechamiento adecuado y eficiente es de vital importancia.

La concentración de coliformes fecales en el cauce del río Sonora está por debajo del límite establecido en los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua (CECA), de lo que se deduce que la capacidad de depuración del río es muy alta, aunque no tenemos los elementos suficientes para cuantificarla, por lo que sería recomendable realizar un balance de masa en la zona y con ello un rediseño de los sistemas lagunares.

El cálculo de la disponibilidad mediante la ecuación de continuidad sólo considera como entradas al sistema los escurrimientos verticales y horizontales, mientras que las pérdidas se consideran como la infiltración, evaporación, usos consuntivos; por lo que es necesario replantear un balance que incluya los flujos de agua de los sistemas lagunares al cauce del río Sonora. También, se requieren estaciones de monitoreo en puntos cercanos a las áreas recreativas de Aconchi y El Gavilán, con objeto de medir la concentración de coliformes fecales, ya que en esas zonas se realizan actividades de esparcimiento por parte de la población.

El constante cambio de los titulares de los organismos operadores de agua potable de las localidades del río Sonora, obliga a establecer un programa permanente de capacitación en materia de operación y mantenimiento de los sistemas lagunares para su correcto funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

Boletín Oficial del Estado. 1990. Ley 217 “Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente para el Estado de Sonora”. Dirección General de Normatividad Ecológica, SIUE, Gobierno del Estado de Sonora. 18 de diciembre.

Castellanos, L. O., M. J. y C. J. Zamora. 1987. *Reuso del agua para riego*. Informe de Proyecto. México: IMTA - SARH.

Castellanos, L. O., M. J. y C. J. Zamora. 1986. *Sistemas de tratamiento y reuso del agua*. Proyecto interno. IMTA - SARH.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2006. Página en Internet consultada en varias ocasiones de enero a julio de 2006. www.conafor.gob.mx

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2005. *Estadísticas del agua en México*. México: CONAGUA.

_____. 2004. *Reformas efectuadas a la Ley Federal de Derechos desde su promulgación en 1981 a la fecha*. México: CONAGUA.

_____, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, Subdirección General Técnica. 2002. *Manual para el manejo de zonas de riego con aguas residuales*. México: CONAGUA.

_____, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. 2002. *Programa de reuso del agua del estado de San Luis Potosí*. México: CONAGUA.

_____, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subdirección General Técnica. 2000. *Manuales de difusión y divulgación sobre temas selectos de agua subterránea. Contaminación de agua subterránea (I Parte)*. México: CONAGUA.

_____, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subdirección General Técnica. 2000. *Manuales de difusión y divulgación sobre temas selectos de aguas subterráneas. Contaminación de agua subterránea (II Parte)*. México: CONAGUA.

_____, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas, Subdirección General Técnica. 1996. *Manual de diseño de lagunas de estabilización*. México: CONAGUA.

Diario Oficial de la Federación. 2004. Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. 12 de Enero.

Diario Oficial de la Federación. 2004. Ley de Aguas Nacionales. 29 de abril.

Diario Oficial de la Federación. 2002. NOM-003-SEMARNAT-1996, Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. 17 de abril.

Diario Oficial de la Federación. 2001. Ley de desarrollo rural sustentable. 3 de diciembre.

Diario Oficial de la Federación. 1998. NOM-003-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. 21 de septiembre.

Diario Oficial de la Federación. 1997. NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. 6 de enero.

Diario Oficial de la Federación. 1996. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 13 de diciembre.

Diario Oficial de la Federación. 1996. NOM-002-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales a los Sistemas de alcantarillado municipal. 03 de junio.

Diario Oficial de la Federación. 1992. Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales. 1 de diciembre.

Dourojeanni, Axel, Andrei Jouravlev y Guillermo Chávez. 2002. *Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica*. Serie Recursos Naturales e Infraestructura, No. 47.

Granados Sánchez, D. 2004. *Los ágaves en México*. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.

Gonzalez Piedra, J. I. 2000. *Guía metodológica para el estudio integral de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de manejo*. La Habana: Universidad de La Habana.

Herrero, J. A., L. A. García, M. Lafa, et al. 1993. *Metodología para la ordenación y manejo integral de cuencas hidrográficas*. La Habana: Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios.

INIFAP. 2005. *Investigación de cultivo de maguey*. Guerrero: INIFAP.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. *Anuario estadístico de Sonora*. México: INEGI.

_____, (INEGI). 1993. *Estudio hidrológico del estado de Sonora*. México: INEGI.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1994. *Compendio estadístico de producción forestal, 1989-1993*. México: SARH.

_____, Gerencia de Reutilización del Agua. 1990. *Estudio de factibilidad para la reutilización de las aguas residuales de la ciudad de Hermosillo, Sonora*. Hermosillo: SARH.

SAGARPA. 2000. *Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos, 1998. Por estado*. México: SAGARPA.

SAGARPA. 2000. *Anuario estadístico de la producción pecuaria de los Estados Unidos Mexicanos, 1999*. México: SAGARPA

SAGARPA. 1980-2004. *Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON)*.