



INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

Funcionamiento y balance del agua en bordos para abrevadero

Estudio de caso para una zona semiárida
del norte de México

ISBN: 968-800-585-1



Dr. Juan Estrada Avalos
M. C. Miguel Rivera González
Dr. Jean Marie Lamachere
Dr. Ignacio Sánchez Cohen

CENID-RASPA

Folleto Científico 16

Gómez Palacio, Durango

Noviembre del 2004

FUNCIONAMIENTO Y BALANCE DEL AGUA EN BORDOS PARA ABREVADERO

**Estudio de caso para una zona semiárida
del norte de México**

Dr. Juan Estrada Avalos
M.C. Miguel Rivera González
Dr. Jean-Marie Lamachere
Dr. Ignacio Sánchez Cohen

CENID-RASPA

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41

35150 Cd. Lerdo, Dgo.

Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: cenid.raspa@inifap.gob.mx

El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los autores, al CENID-RASPA y al INIFAP.

ISBN: 968-800-585-1

PRESENTACIÓN

La creciente competencia entre sectores por el recurso agua debido al avance de la frontera agrícola (consumidora del 80 por ciento del recurso hídrico en el país), ha puesto en evidencia la vulnerabilidad de ecosistemas con impactos tan severos como la desertificación, misma que en México asciende a más del 80 por ciento del territorio dándole la categoría de la más alta tasa de deforestación en América Latina. Algunas estimaciones puntualizan que cada año se agregan 600 mil hectáreas a esta categoría teniendo además que 10 por ciento de la superficie bajo riego (600 mil hectáreas) se encuentran bajo proceso de salinización con mermas considerables en su productividad.

Ante este panorama, la captación de agua de lluvia viene a mostrar una alternativa económicamente atractiva, técnicamente viable y ecológicamente sustentable al aprovisionar *in situ* del vital líquido a las comunidades de regiones en donde la precipitación pluvial no es tan cuantiosa para abastecer sus necesidades pero suficiente para su almacenamiento y posterior uso.

Los bordos de captación constituyen una alternativa para el anterior propósito. Sin embargo, la ingeniería de diseño es de crucial importancia para que el método muestre sus mayores beneficios maximizando su utilidad y minimizando el riesgo. La presente publicación se aboca al tratado de la ingeniería de diseño de bordos de captación proponiendo algunas mediciones de campo de donde se derivan índices de desempeño de la obra, también ejemplifica el método con un estudio de caso en una cuenca experimental en el norte árido de México. Es entonces el objetivo de la publicación el proveer de un método útil, dinámico y sencillo para el proceso de planeación, construcción y evaluación de bordos de captación de agua de lluvia para diferentes usos como abrevadero, irrigación y actividades domésticas. Los autores son investigadores del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA) y del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD)

de Francia, institución con la que se han desarrollado numerosos estudios en el contexto de hidrología y edafología durante varios años teniendo como plataforma para el desarrollo científico a la Región Hidrológica No. 36 de las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval.

Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Director del CENID RASPA

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	1
DESCRIPCIÓN DE LA ZONA	5
Clima	5
Temperatura	5
Evaporación	6
Precipitación.	7
Geología	9
Suelos	9
Vegetación	9
SELECCIÓN Y GEOMETRÍA DE LOS BORDOS DE RETENCIÓN	10
Levantamiento topográfico	10
Geometría de los embalses	11
Índice geométrico	18
BALANCE DEL AGUA EN LOS BORDOS DE RETENCIÓN	20
Metodología	20
Observación de variables	24
La evaporación dentro de los embalses	24
Equipo de medición	24
Valores de la evaporación	27
Variación de la evaporación en función a la altitud	29
Variación estacional de la evaporación	31
Relación entre las observaciones del evaporímetro flotante y clase A	31
Nivel del agua en los embalses	34
Análisis y calidad de los datos	35
Estimación del consumo del agua	41
Resultados del balance hídrico	43

	Página
LOS MECANISMOS DE INFILTRACIÓN DENTRO DE LOS BORDOS DE RETENCIÓN	49
Análisis de las láminas infiltradas en función de la carga	51
Análisis correspondiente a la estación de lluvias	51
Análisis interanual de la infiltración	53
Caracterización de la infiltración entre los diferentes bordos de retención	56
ÍNDICES DE DESEMPEÑO DE LOS BORDOS DE RETENCIÓN	58
Índices que caracterizan los bordos de retención	58
Índices que valorizan los bordos de retención	60
Valores de los índices de caracterización y valoración	61
CONCLUSIÓN	64
BIBLIOGRAFIA	66

INTRODUCCIÓN

En las regiones de clima árido y semiárido, la disponibilidad del agua ha sido siempre una fuerte condicionante para la implantación y desarrollo de las actividades humanas. Así, desde la antigüedad, diferentes obras hidráulicas se han construido en una amplia gama de condiciones con la finalidad de almacenar y/o derivar los escurrimientos superficiales que ahí se generan (Ruf, 1992). De la simple cisterna enterrada para captar los escurrimientos a la construcción de grandes presas para satisfacer los diferentes usos de la población, el almacenamiento del agua siempre ha ocupado un papel preponderante en aquellos países donde el recurso hídrico se torna insuficiente o irregular (Velasco, 2000; Albergel y Rejeb, 1997).

Sin embargo, a principios de la década de los años 1990, la construcción de pequeños embalses o bordos de retención parece ganar terreno a la tradicional política de construcción de grandes infraestructuras hidráulicas iniciadas en los años 1900, estas últimas cada vez más criticadas por su impacto ambiental y social a mediano y largo plazo (Comisión Mundial de Represas, 2000). La construcción de bordos de retención para uso agrícola (pequeñas áreas de riego), pecuario (abrevar al ganado), piscícola (producción de peces), hidrogeológico (recarga de acuíferos) e incluso, para el abasto de agua potable para consumo doméstico es, en la actualidad, una realidad insoslayable en diversos países de las regiones intertropicales y mediterráneas (Albergel, 2000).

México no queda exento de esta tendencia mundial. En las regiones áridas y semiáridas del norte del país, la construcción de pequeños embalses, generalmente definidos por bordos de tierra (Figura 1), representa la principal estrategia de la población rural para enfrentar el déficit hídrico característico de estas regiones. Así, las obras

de retención se han establecido en una gran diversidad de condiciones (clima, geología, orografía, etc.), con la finalidad de satisfacer los requerimientos hídricos de las diferentes actividades que ahí se desarrollan (Estrada *et al.*, 2004).



Figura 1. Bordo de retención comúnmente llamado presón, jagüey, aguaje o bordo.

No obstante, la incertidumbre climática de estas regiones obliga a los productores, de manera intuitiva, a desarrollar actividades que permitan obtener el mayor beneficio económico en relación al agua disponible. Este es el caso de la ganadería extensiva para la producción de carne, principalmente de ganado bovino. En esta actividad, los requerimientos de agua para abreviar al ganado son mínimos en comparación con otras actividades más demandantes tales como la agricultura. Estas condiciones han permitido, durante los últimos 20 años y en forma más acelerada durante los últimos diez años a partir de la apertura de las fronteras por el Tratado de Libre Comercio, el desarrollo y la consolidación de la ganadería extensiva como una

importante actividad económica para los estados del norte de México. Así, dentro del país, los estados de Durango, Chihuahua y Coahuila se han consolidado como los principales proveedores de carne (en pie o canal) del mercado nacional y de exportación hacia los EU. En esta consolidación, los bordos de retención han jugado un papel preponderante en el almacenamiento y suministro del agua para abreviar al ganado.

Sin embargo, si bien es cierto que los bordos de retención permiten el desarrollo de actividades productivas, el incremento desordenado en el número y concentración de estos embalses en cuencas de grandes dimensiones, plantea interrogantes en cuanto al impacto sobre el régimen hidrológico de sus ríos e incluso, sobre la modificación de la dinámica del medio natural a nivel local y regional. En este contexto, el estudio del funcionamiento hidrológico y la valorización de estas obras de retención son dos aspectos de vital importancia en planeación y aprovechamiento integral de los recursos naturales que conforman los frágiles ecosistemas de las zonas áridas y semiáridas del país.

Con el objetivo de estudiar los mecanismos del funcionamiento hidrológico de estas obras de retención, además de establecer el balance del agua dentro de sus embalses, se dio seguimiento a siete bordos de retención durante dos años de observación. Estos bordos, representativos de un total de 61 embalses, se localizan en una zona semiárida de agostadero de 450 km², la cual, a su vez, se ubica en la parte media de la Región Hidrológica 36 (RH36) conformada por las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval además del Bolsón de Mapimí (Figura 2). La precipitación media anual en esta zona, dedicada íntegramente a la ganadería extensiva desde principios del siglo XX, es de 423 mm (Estrada, 1999).

Para llevar a cabo los objetivos planteados, se realizaron una serie de mediciones y observaciones tanto a nivel de cuenca como a nivel del embalse. Las mediciones permitieron caracterizar tanto las cuencas vertientes que alimentan los bordos de retención, como la geometría de los embalses a partir de levantamientos topográficos. De igual forma, la observación de las variables hidrológicas (precipitación y escurrimiento), de las variables climáticas (evaporación

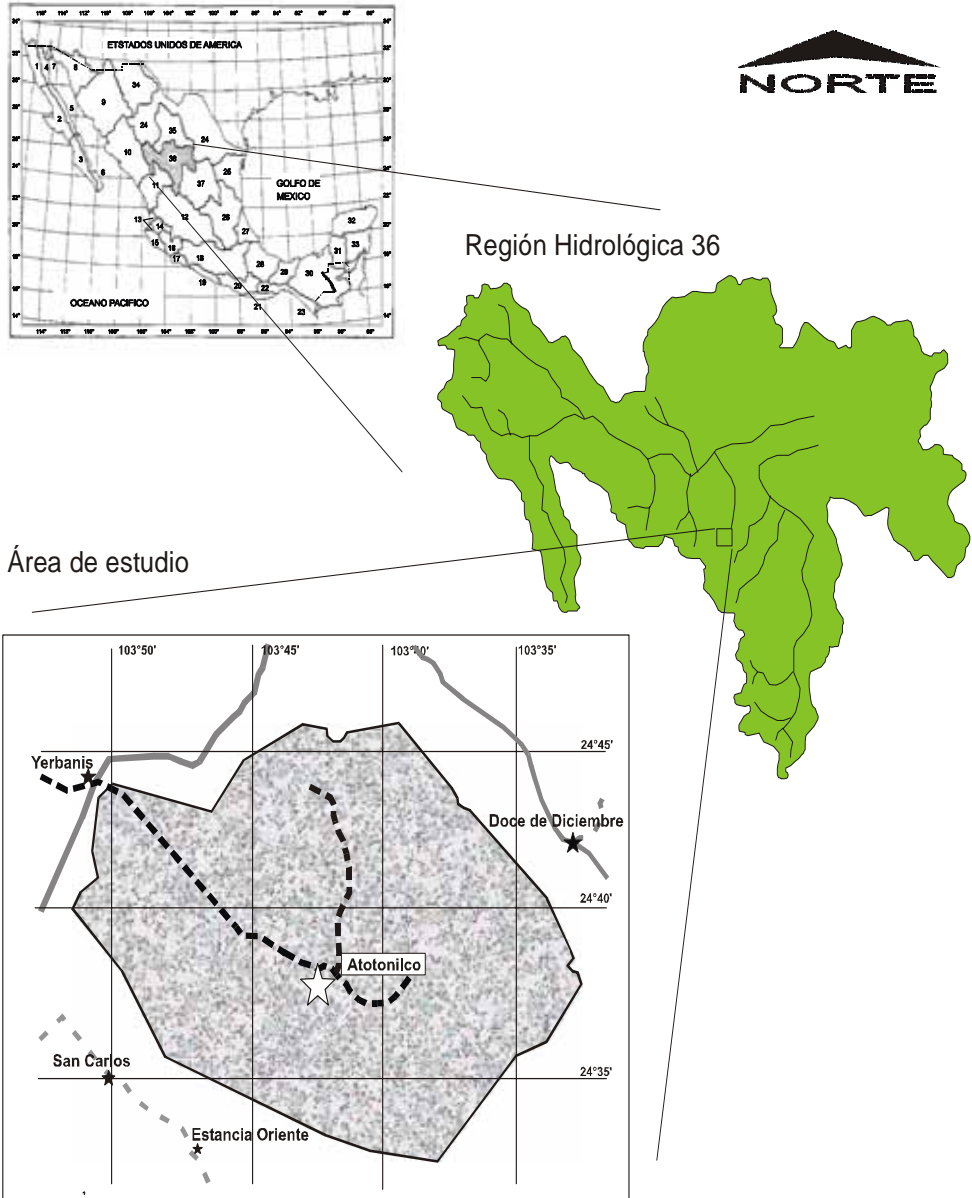


Figura 2. Localización de la zona de agostadero.

dentro y fuera del embalse) y de la infiltración, permitieron establecer el balance del agua en cada uno de los bordos de retención estudiados. Asimismo, con la finalidad de tener un panorama más amplio del área de estudio, se realiza una descripción general de la zona donde se encuentran implantadas estas obras de retención.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

La principal actividad que se desarrolla en la zona es la ganadería bovina extensiva para la producción de carne. Su manejo se basa en un sistema de cercos y potreros para el mejor aprovechamiento de los pastizales. La rotación y carga animal dentro de cada potrero se define en función de la calidad y productividad de los pastizales. El agua para abreviar al ganado es suministrada conjuntamente por una red de 61 embalses y pozos con sistema de extracción eólico (comúnmente llamados papalotes). Los papalotes son puestos en funcionamiento una vez que se agota el agua dentro de los embalses localizados en cada potrero.

Clima

Temperatura

La comparación de las temperaturas medias mensuales entre la estación de Atotonilco, situada en la parte central de la zona de agostadero a 2,100 msnm, y la estación de Cuencamé situada a una distancia de tres kilómetros aguas abajo y a una altitud de 1,700 msnm, muestra que existe una diferencia de dos a cuatro grados centígrados según la época del año (Figura 3). El gradiente altitudinal de las temperaturas medias mensuales varía de -0.5 a un grado por cada 100 m de altitud.

Las temperaturas mínimas se registran en invierno, de diciembre a febrero, en tanto que las temperaturas máximas se registran en período estival, de mayo a junio, pudiendo sobrepasar las máximas diarias los 40 °C.

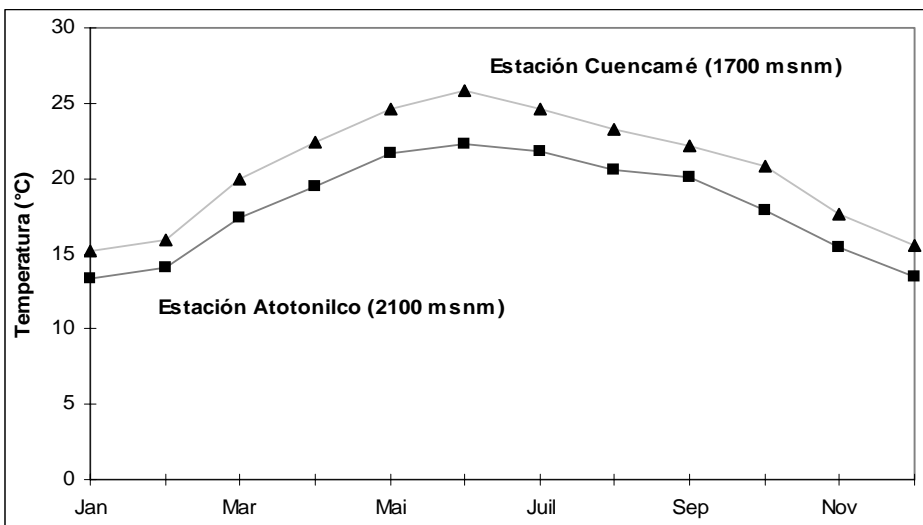


Figura 3. Temperaturas medias mensuales de las estaciones Atotonilco y Cuencamé. Dgo.

Evaporación

A partir de los datos de evaporación registrados en un tanque clase A en la estación Atotonilco (1969-1983 y 1996-1997) se observa que en los meses más secos y calurosos, de marzo a mayo, la evaporación media diaria es superior a los 6 mm, con un máximo de 7.8 mm día⁻¹ en el mes de mayo (Cuadro 1). Ésta disminuye sensiblemente en la estación de lluvias, con una media de 4.5 mm día⁻¹, y se mantiene estable durante los meses de invierno con una media de 3.8 mm día⁻¹. La evaporación máxima diaria registrada en este período alcanzó los 10.3 mm durante el mes de junio, mientras que la mínima fue de 1.8 mm en el mes de diciembre.

Cuadro 1. Evaporación media diaria en mm; máxima y mínima mensual en la estación Atotonilco en el período 1969-1983 y 1996-1997.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Media	3,7	4,4	6,6	7,2	7,8	7,3	5,5	4,6	4,0	4,0	3,9	3,3
Máxima	5,7	5,6	9,2	9,5	9,7	10,3	8,3	5,4	6,0	5,0	4,9	4,7
Mínima	1,8	3,2	3,9	5,3	5,4	5,2	3,9	3,3	2,0	2,3	2,5	2,0

Precipitación

Las principales características de la precipitación se analizan a partir de los totales anuales de la estación Atotonilco para el período 1927-1997, y para las lluvias diarias de esta misma estación en el período 1963-1983. Para la serie de 70 años de totales anuales de lluvia, cuyas características se muestran en el Cuadro 2, el coeficiente de variación es de 0.28. Al comparar el valor de este coeficiente con otras regiones del mundo en condiciones equivalentes de lluvia (400 a 500 mm anuales), se tienen valores similares al de la región del Sahel, en África (0.25–0.35) (Peugeot, 1995) y al de Almería al sur de España (0.28–0.30) (Martín, 1997). Sin embargo, el valor de este coeficiente se encuentra por debajo del observado en el nordeste de Brasil y en la costa de Ecuador (0.35-0.45 y 0.40-0.60, respectivamente) (Nouvelot y Descroix, 1996).

La distribución mensual de las precipitaciones define tres períodos:

- Estación de lluvias estivales: comienza con algunas precipitaciones en el mes de mayo para generalizarse durante los meses de julio a septiembre y finalmente desaparecer durante el mes de octubre.
- Estación de lluvias invernales: se extiende de noviembre a enero.

- Estación seca: se presenta de febrero a comienzos del mes de mayo.

Cuadro 2. Estadísticas principales de las lluvias en la estación Atotonilco.

Parámetro	Lluvia	
	Total anual	Máxima diaria anual
Número de años	71	14
Valor mínimo (mm)	119,0	25
Valor máximo (mm)	782,0	75,0
Media aritmética (mm)	426,8	44,7
Mediana (mm)	427,0	42,0
Desviación (mm)	124,6	14,7
Coefficiente de variación	0,29	0,33

En promedio, 92 por ciento de las lluvias son estivales, siete por ciento invernales, y el uno por ciento se precipita en la estación seca del año. Durante los dos años de observación (1996 y 1997), el primero de ellos presentó una distribución mensual de la lluvia conforme al promedio interanual, con excepción del mes de septiembre (148 mm contra 61 mm). Por el contrario, durante el segundo año de observación, las lluvias mensuales presentaron una distribución mucho más extendida a lo largo del año, con valores mensuales de 15 a 40 mm en invierno y durante la estación seca, además del mes de agosto que se presentó excepcionalmente seco (29 mm contra 1,088 mm).

La precipitación diaria en la zona presenta un comportamiento similar al analizado por Nouvelot y Descroix (1996) sobre el conjunto de la RH36. El promedio anual de días con lluvia es de 40. Rara vez se observan dos eventos de lluvia durante el mismo día, de tal forma que el número total de días con lluvia corresponden sensiblemente a los eventos de lluvia. De los registros diarios existentes, el 51 por ciento

corresponden a precipitaciones inferiores a los cinco mm; el 72 por ciento a precipitaciones inferiores a 10 mm.

Geología

Desde el punto de vista geológico, la zona de agostadero se sitúa en el contacto de material eruptivo y sedimentario que atraviesa la RH36 con orientación noreste–sureste. Las rocas y materiales eruptivos afloran esencialmente en la parte sur, la de mayor elevación en la zona, con la forma de relieves riolíticos, de mesetas basálticas o colinas de dacitas, en tanto que las rocas sedimentarias se presentan al norte de la zona representadas por materiales detríticos gruesos de tipo conglomerado.

Suelos

De manera general, sin mencionar los casos particulares, los suelos de la zona son ricos en materia orgánica, del orden de 3 a 4%, lo que indica el buen manejo de los pastizales favoreciendo la conservación de los horizontes superficiales. En ciertos casos, se presenta erosión laminar aunque discontinua y limitada en superficie. La profundidad de los suelos varía de algunos centímetros a poco más de un metro (Viramontes *et al.*, 1999), aunque los suelos superficiales y poco profundos predominan en las zonas de mayor pendiente. Las texturas son mucho más homogéneas, con una tendencia de textura media a gruesa. Los suelos arcillosos, con un contenido mayor al 40%, son poco representativos en la zona, limitándose a ciertos suelos de tipo Castañozem y Vertisol (Viramontes *et al.*, 1999).

Vegetación

La principal unidad de vegetación en la zona se encuentra representada por pastizales asociados a una vegetación secundaria arbustiva. Ésta representa el 83.6 por ciento de la superficie, en tanto

que el pastizal sin arbustivas y el pastizal asociado al matorral representan el 15.4 por ciento y el uno por ciento, respectivamente.

SELECCIÓN Y GEOMETRÍA DE LOS BORDOS DE RETENCIÓN

De los 61 bordos existentes en la zona de estudio, siete de ellos fueron seleccionados por su representatividad, considerando para ello los criterios de capacidad de almacenamiento, superficie del impluvio así como su geología, orografía, profundidad, textura de los suelos, tipo y cobertura vegetal (Estrada, 1999). En el Cuadro 3 se indica el nombre asignado a cada uno de los bordos así como su capacidad de almacenamiento y la superficie del impluvio que lo alimenta.

Cuadro 3. Capacidad de almacenamiento y superficie de cuenca en cada uno de los bordos de retención seleccionados.

Bordo	Capacidad de almacenamiento m³	Superficie cuenca ha
Carboneras	1880	106
El Viejo	6720	176
El Tullido	4783	398
Pastelero	10860	168
El Muerto	1460	15
Oso Negro	1140	27
El Molino	730	15

Levantamiento topográfico

La geometría de los bordos seleccionados se definió a partir de levantamientos topográficos realizados en ausencia de almacenamiento de agua (período seco). Estos levantamientos se realizaron a partir de

una malla de puntos de 5 x 5 m, correspondiendo a un mínimo de 65 puntos para el embalse más pequeño (bordo El Muerto), y un máximo de 360 puntos para el más grande (bordo Pastelero). Estos datos permitieron establecer una carta topográfica para cada uno de los embalses, utilizando el método Kriging para la interpolación de los puntos topográficos. La Figura 4 presenta la carta topográfica del bordo Carboneras en el primer año de observación.

Geometría de los embalses

A partir de las cartas topográficas, se definieron tres relaciones que permitieron caracterizar la geometría de los embalses:

- Relación cota–volumen de almacenamiento, la cual define el volumen disponible dentro del embalse para una cota dada,
- Relación cota–superficie del espejo del agua, que representa la superficie del agua expuesta a la evaporación,
- Relación cota–superficie de contacto del agua con el suelo, que representa el área sobre la cual el agua es susceptible de infiltrarse.

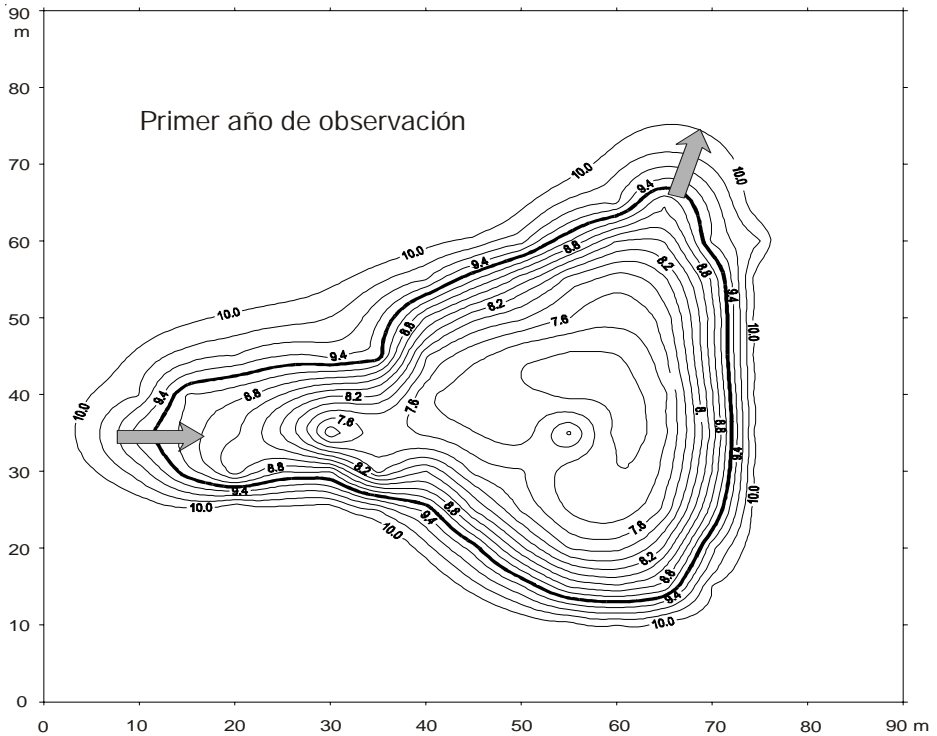


Figura 4. Topografía del embalse de Carboneras en el primer año de observación.

Para establecer estas relaciones se utilizaron tres métodos de cálculo volumétrico: Trapezoidal, Simpson y Simpson 3/8. Los resultados obtenidos presentan valores sensiblemente similares, por lo que se tomaron en cuenta los resultados del método Trapezoidal para los posteriores análisis del balance del agua.

Los sedimentos depositados dentro del embalse en el primer año de observación, afectaron las tres relaciones anteriormente señaladas. Para contabilizar estas modificaciones, se realizó el levantamiento topográfico del fondo del embalse en el segundo año de observación, relacionando éste con el realizado durante el primer año. El Cuadro 4 muestra la relación cota-volumen y cota-superficie del espejo del agua para el bordo Carboneras en el primer y segundo

año de observación. En este caso, los sedimentos depositados de un año al otro fueron de 50 m³.

Cuadro 4. Valores de la relación cota-superficie del espejo del agua y cota-volumen en el bordo Carboneras durante el período de observación.

Cota cm	Primer año		Segundo año		Cota cm	Primer año		Segundo año	
	Vol. m ³	Sup. m ²	Vol. m ³	Sup. m ²		Vol. m ³	Sup. m ²	Vol. m ³	Sup. m ²
0	0	0			140	990	1260	940	1260
10	4	90			150	1120	1330	1070	1330
20	20	230			160	1260	1400	1210	1400
30	50	350	0	0	170	1400	1470	1350	1470
40	90	470	40	470	180	1550	1540	1500	1540
50	140	580	80	570	190	1710	1600	1710	1600
60	200	690	150	690	200	1880	1650	1830	1650
70	280	780	230	780	210	2040	1700	1990	1700
80	360	850	310	850	220	2210	1760	2160	1760
90	450	920	400	920	230	2390	1810	2340	1810
100	540	980	490	980	240	2570	1860	2520	1860
110	650	1050	600	1050	250	2760	1820	2710	1920
120	750	1120	700	1120	260	2960	1980	2910	1980
130	870	1180	820	1180					

El análisis de las relaciones cota-volumen de cada uno de los bordos (Figura 5), permite diferenciar dos grupos en función a su capacidad de almacenamiento. Por una parte, los bordos de El Viejo, El Tullido y Pastelero que presentan un mayor almacenamiento y, por otra parte, los bordos de Carboneras, El Muerto, Oso Negro y El Molino, con una menor capacidad.

Si la finalidad de los bordos es la de almacenar el agua durante el mayor tiempo posible para abreviar al ganado, su forma geométrica

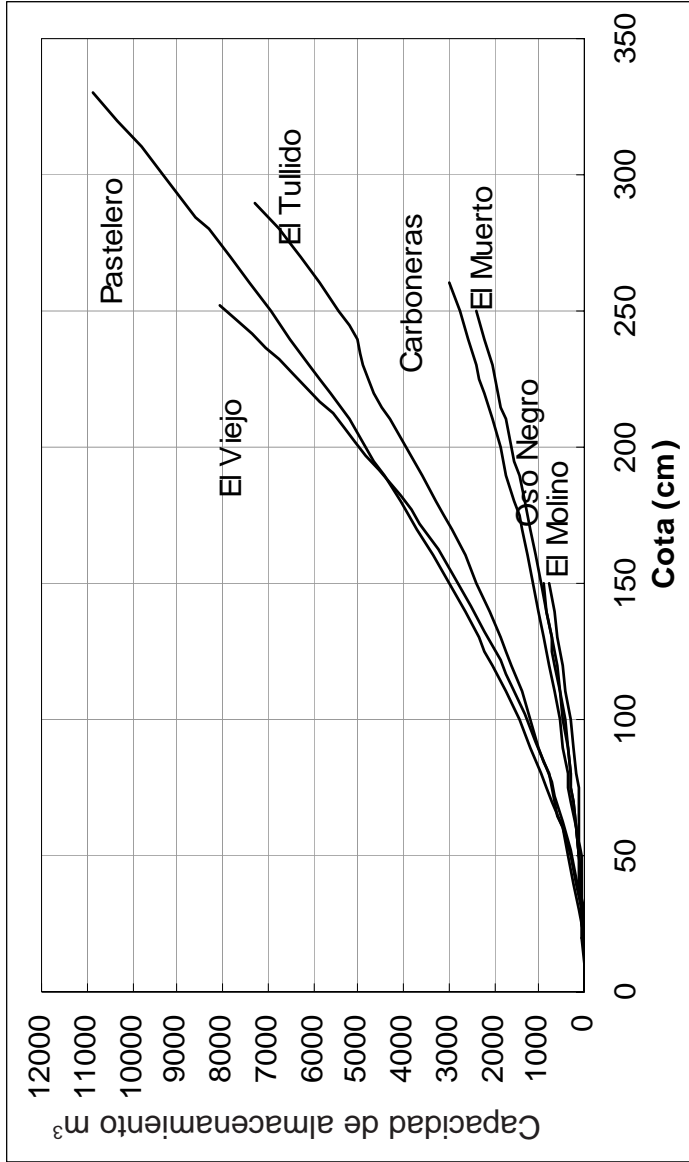


Figura 5. Relación cota volumen de los bordos estudiados.

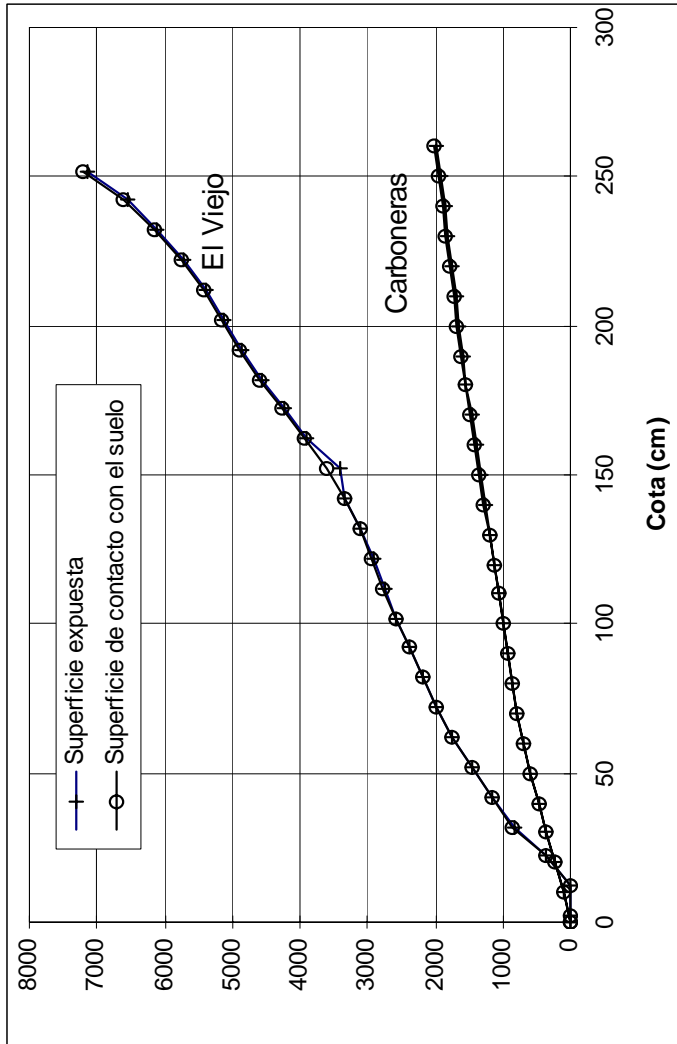


Figura 6. Relación cota-superficie del espejo y cota-superficie mojada de los bordos El Viejo y Carboneras.

debe ser tal que minimice las pérdidas por evaporación (en función a la superficie del espejo del agua) y por infiltración (ligada a la naturaleza del sustrato, de su recubrimiento y de la superficie mojada o de contacto del agua con el suelo). En nuestro caso, las superficies del espejo del agua y de contacto con el suelo se presentan de forma muy similar para todos los embalses estudiados, tal como se muestra en la Figura 6.

Por el contrario, las tres relaciones establecidas (cota-volumen, cota-superficie del espejo del agua y cota-superficie mojada), no presentan la misma configuración al compararlas entre los diferentes bordos de retención. A manera de ejemplo, en la Figura 7 se presenta la suma de las superficies del espejo del agua y de contacto con el suelo para los embalses de Pastelero y El Viejo; la suma de estas superficies representa el área potencial de pérdidas de agua tanto por evaporación como por infiltración, respectivamente. Asimismo, en esta figura se presentan los volúmenes almacenados y sus respectivas cotas. Al analizar estas relaciones a la cota de 2.4 m, se puede apreciar que el bordo El Viejo almacena 580 m^3 más que el bordo Pastelero. Sin embargo, la suma de las superficies del espejo del agua y de contacto con el suelo a la misma cota, son superiores en $3,500 \text{ m}^2$, lo que representa un mayor potencial de pérdidas por infiltración y evaporación. Esta diferencia indica la geometría inadecuada del bordo El Viejo en relación al Pastelero.

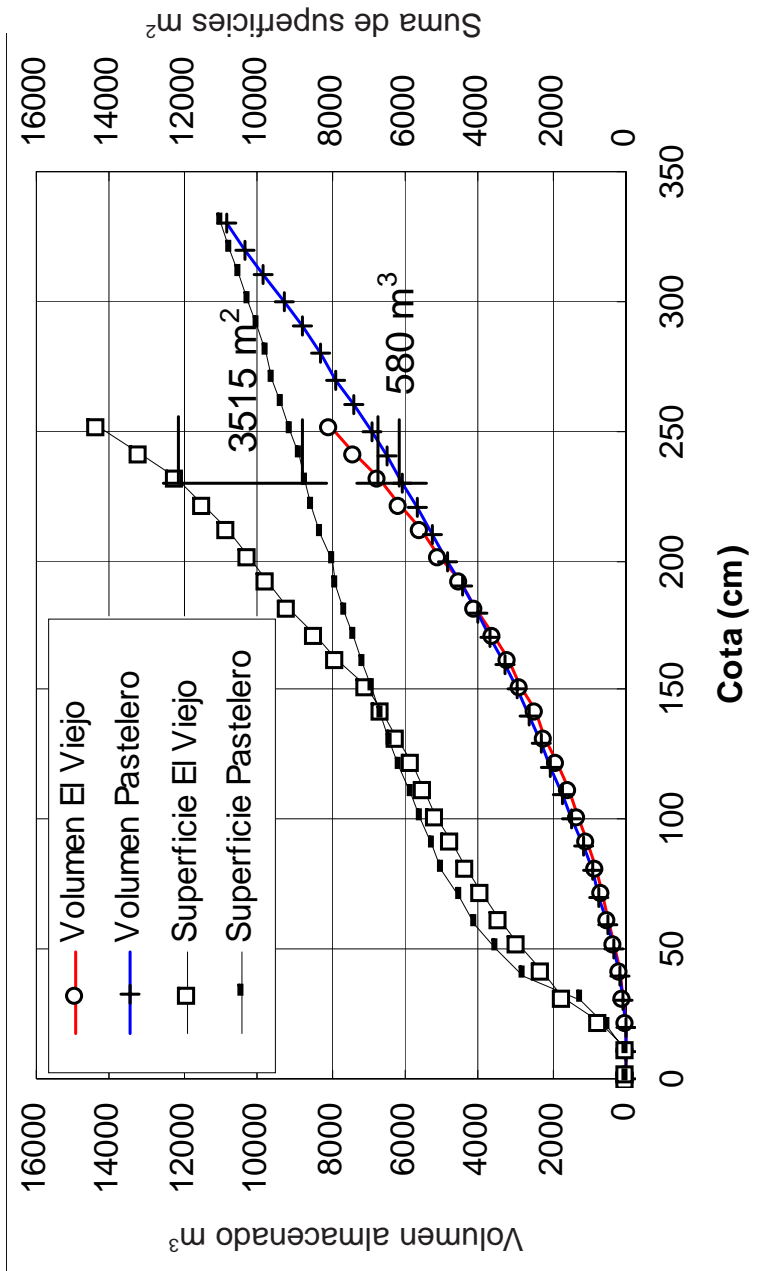


Figura 7. Relaciones entre las cotas y volúmenes de almacenamiento, cotas y la suma de las superficies expuestas a la infiltración y evaporación de los bordos El Viejo y Pastelero.

Índice geométrico

Para analizar la geometría de los embalses se definió un índice geométrico (IG) que compara la suma de la superficie del espejo del agua (superficie expuesta a la evaporación) y de infiltración (superficie mojada) de un cierto bordo, con la suma de esas mismas superficies de la figura geométrica de un cuarto de esfera. De esta forma, este índice geométrico es igual a uno cuando se maximiza el volumen de almacenamiento y se minimiza la superficie expuesta a la evaporación y de contacto con el suelo para un determinado embalse. La expresión matemática de este índice es la siguiente:

$$IG = 2\pi \left(\sqrt[3]{\frac{3}{\pi} \cdot V} \right)^2 / (S_1 + S_2) \quad 1$$

Donde: V es el volumen almacenado dentro del bordo en m^3 ; S_1 es la superficie del espejo del agua en m^2 y S_2 es la superficie mojada en m^2 .

El índice IG que se propone considera tanto la superficie expuesta a la evaporación como a la infiltración del cuerpo de agua almacenado en el embalse. Si se considera un comportamiento homogéneo de la infiltración en el fondo del embalse, este índice puede ser considerado como un indicador de la eficiencia de la forma geométrica de cada bordo para almacenar el agua, minimizando las superficies de contacto con el aire (espejo del agua) y con el suelo (superficie mojada). El Cuadro 5 presenta las características geométricas de cada uno de los bordos de retención que fueron estudiados. El análisis de este cuadro muestra que los índices geométricos a la cota máxima son claramente inferiores en los bordos El Viejo y El Tullido ($IG = 0.2$), en tanto que los bordos El Muerto, El Molino y Pastelero presenta índices más elevados ($IG = 0.35$ a 0.38).

Cuadro 5. Características geométricas de los embalses.

Bordo	Capacidad de almacenamiento m ³	Superficie expuesta m ²	Superficie contacto m ²	Largo		Ancho		Longitud del borde vertedor		Cota máxima	Cota m	Índice IG
				m	m	m	m	m	m			
Carboneras	1880	1650	1675	60.2	27.4	50.4	8.9	2.00	0.28			
El Viejo	6720	6110	6152	168.8	36.2	41.3	8.8	2.32	0.18			
El Tullido	4783	3812	3927	104.2	36.6	44.1	16.9	2.26	0.22			
Pastelero	10860	5380	5595	122.9	43.8	72.9	10.4	3.30	0.35			
El Muerto	1460	1400	1414	64.1	21.8	51.3	9.6	1.90	0.38			
Oso Negro	1140	1094	1126	81.2	13.5	32.4	8.6	1.80	0.30			
El Molino	730	702	715	42.0	16.7	17.3	5.2	1.50	0.35			

BALANCE DEL AGUA EN LOS BORDOS DE RETENCIÓN

Metodología

Las observaciones hidrológicas a la escala de la cuenca vertiente tienen por objetivos caracterizar el funcionamiento hidrológico de las cuencas y el uso de los escurrimientos que se almacenan dentro de los bordos de retención. Para responder a este doble objetivo, se equiparon siete bordos con el material necesario para el registro continuo de los niveles del agua dentro de los embalses y análisis de su balance hídrico.

Para cada una de las obras, la ecuación del balance del agua se escribe:

$$\Delta V = (V_r + V_s + V_p) - (V_{ev} + V_d + V_{id} + V_i + V_u) \quad 2$$

Donde: ΔV es la variación del volumen de agua almacenada en el bordo, V_r la aportación de los escurrimientos superficiales, V_s las aportaciones subterráneas, V_p las aportaciones sobre el embalse debido a las lluvias, V_{ev} volumen evaporado, V_d volumen vertido, V_{id} volumen infiltrado a través de la cortina, V_i volumen infiltrado en el fondo del embalse y V_u el volumen utilizado.

La representación gráfica de esta ecuación se muestra en la siguiente figura:

Balance de agua

$$\Delta V = (Vr + Vs + Vp) - (Vev + Vd + Vid + Vi + Vu)$$

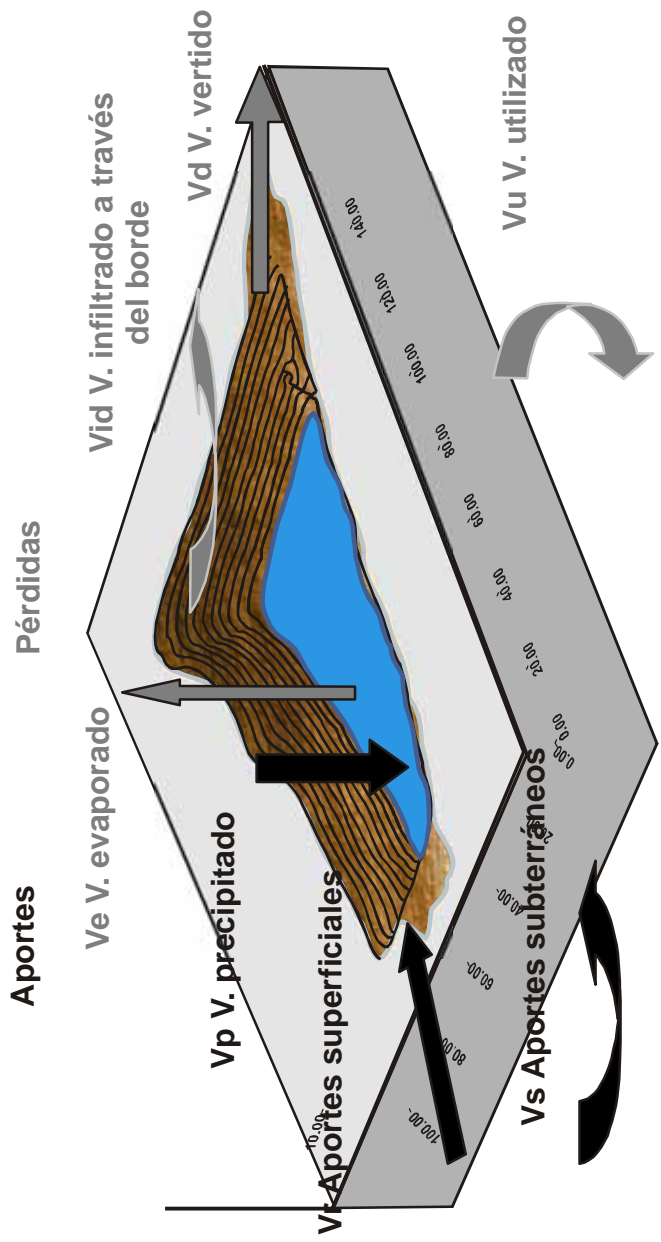


Figura 8. Representación gráfica del balance del agua en los bordos de retención.

Dentro de la ecuación del balance se pueden cuantificar seis términos a partir de observaciones: DV , Vp , Vev , Vd , Vid y Vu .

ΔV . Para conocer las variaciones del volumen almacenado, es necesario el registro de las variaciones del nivel del agua y establecer la relación entre los niveles y el volumen almacenado. Esta relación se determina a partir de levantamientos topográficos y la batimetría del embalse.

Vp . Las aportaciones de lluvia precipitada directamente sobre el embalse se determinaron multiplicando el total de la lluvia por la superficie del espejo del agua. La relación cota–espejo del agua permite obtener los valores de esta superficie.

Vev . Los volúmenes evaporados se calcularon considerando, además de la relación cota–espejo del agua, otros dos tipos de relaciones: la relación entre la altitud y la evaporación de un tanque clase A, establecida a partir de una red de cuatro evaporímetros instalados en la zona y, de la relación entre la evaporación de un tanque clase A y la evaporación de un evaporímetro flotante, ambos establecidos en un bordo con almacenamiento permanente de agua llamado Zapata.

Vd . Los desbordamientos a través del vertedor del bordo se determinaron a partir de su curva de calibración del gasto. Esta curva se determinó a partir del aforo realizado durante los desbordamientos a diferentes cotas de las escalas limnimétricas.

Vid . Los volúmenes infiltrados a través de la cortina pueden ser determinados, en su componente superficial, mediante aforos realizados aguas abajo del bordo en ausencia de aportaciones por escurrimiento aguas arriba de la obra.

Vu . El volumen de agua utilizado para abrevar al ganado puede determinarse por el número de animales que abrevan en el agua almacenada en el embalse. Sin embargo, en la práctica esta determinación resulta difícil, por lo que se cuantificó el número de cabezas de ganado dentro del potrero y su consumo medio diario.

Los otros términos de la ecuación del balance del agua, es decir V_r , V_i y V_s , sólo pueden determinarse de manera indirecta.

V_r : Durante la fase de escurrimiento, la ecuación del balance puede simplificarse considerando las aportaciones subterráneas (V_s) insignificantes, los volúmenes evaporados (V_{ev}), infiltrados ($V_{id} + V_i$) y utilizados (V_u) muy pequeños en relación a los volúmenes aportados por los escurrimientos. Así, la ecuación simplificada durante la fase de escurrimiento se puede escribir:

$$V_r = DV - V_p + V_d \quad 3$$

El volumen escurrido se calcula considerando una variación positiva del volumen almacenado DV en tanto se incremente el valor de la cota del nivel del agua, y negativa en caso de desbordamiento a través del vertedor de demasías. Para la estimación del volumen desbordado, la curva de calibración del gasto del vertedor juega un papel muy importante. De los siete bordos estudiados, tres de ellos presentaron desbordamientos durante los dos años de observación: los bordos de Carboneras y El Tullido.

En ausencia de desbordamiento, la ecuación se simplifica aún más y toma la siguiente forma:

$$V_r = \Delta V - V_p \quad 4$$

V_s y V_i . Los volúmenes de aportaciones subterráneas y los volúmenes infiltrados dentro del embalse se calculan a partir de la resolución de la ecuación del balance una vez determinadas el resto de las variables. Así, en ausencia de aportaciones por escurrimiento, el análisis del balance hidrológico de un bordo permite estimar el volumen de agua infiltrado, si se consideran las aportaciones subterráneas insignificantes, o la diferencia entre las aportaciones subterráneas y los volúmenes infiltrados.

En período seco, el balance sólo se encuentra determinado por la infiltración, la evaporación y la utilización del agua almacenada en el embalse. Con la anulación de los términos del escurrimiento (Vr), de desbordamiento (Vd), y de la aportación por lluvia (Vp), la expresión del balance (Ecuación 1) toma la siguiente forma:

$$\Delta V = V_s - (V_{ev} + V_{id} + V_i + V_u) \quad 5$$

Así, el descenso del volumen del agua se determina por el decremento del nivel del agua, que resulta de la diferencia entre las aportaciones subterráneas y las pérdidas por evaporación, infiltración y utilización del agua.

Observación de variables

La evaporación dentro de los embalses

Como se mencionó en el apartado anterior, se establecieron tres tipos de relaciones para calcular el volumen evaporado de agua dentro de los embalses seleccionados:

- Relación cota–espejo del agua,
- Relación entre la altitud y la evaporación de un tanque clase A,
- Relación entre la evaporación de un tanque clase A y la evaporación de un evaporímetro flotante.

La relación cota–espejo del agua ya se detalló, describiéndose a continuación las otras dos relaciones.

Equipo de medición. Dentro de la zona se utilizaron dos tipos de aparatos para la medición de la evaporación durante el período de observación: evaporímetros de suelo clase A y un evaporímetro sumergido en un bordo de retención permanente (bordo Zapata).

El evaporímetro clase A (*US Weather Bureau*) es un tanque de forma circular con un diámetro de 121.9 cm (4 pies) y una profundidad de 25.4 cm (10 pulgadas). Para realizar una correcta observación de la evaporación, el nivel del agua debe fluctuar entre 5.1 y 7.6 cm (2 a 3 pulgadas) del borde superior del tanque (Figura 9). El tanque reposa sobre un armazón de madera de tal forma que pueda circular el aire por debajo, situado éste a 15.2 cm del suelo (6 pulgadas). La observación se realiza a partir de un tornillo micrométrico con una precisión de 1/100 de milímetro. Este tornillo reposa sobre un cilindro de 10.6 cm de diámetro (4 pulgadas), comunicado al agua a través de un orificio en su parte inferior.

Se instaló una red de cinco evaporímetros (cuatro tipo clase A y uno flotante) en la zona tomando en cuenta su altitud y posibilidad de acceso. Un pluviómetro colocado en cada uno de los evaporímetros permite registrar la lluvia diaria precipitada sobre cada tanque (Figura 9).



Figura 9. Equipo de medición instalado en cada uno de los bordos.

La observación de la evaporación a nivel del agua (dentro del embalse de un bordo) se realizó utilizando un tanque metálico flotante de forma cuadrada, de un metro cuadrado de superficie de evaporación y 30 cm de profundidad. El tanque se sostiene a su vez por un armazón metálico de 1.5 x 1.5 x 0.4 m, construido de tubo cuadrado de 3.4 x 3.4 cm (Figura 10). Sobre el armazón se fijan ocho láminas metálicas ajustables que permiten soportar ocho flotadores de 20 litros de capacidad, en los cuales el llenado parcial de los mismos permite ajustar la altura de flotación del tanque. Una placa metálica que se suelda en uno de los ángulos del tanque permite aislar la superficie de medición, dejando en el fondo un espacio de 5 cm para asegurar la libre circulación del agua entre los dos compartimentos (Nouvelot, 1993). Una pequeña varilla metálica doblada y afilada en uno de sus extremos, colocada a 10 cm del borde superior del tanque, reemplaza la función del tornillo micrométrico. El volumen evaporado se mide por el llenado del tanque justo hasta que el nivel del agua toque el extremo de la varilla. La utilización de la botella de un litro para el llenado del tanque permite obtener la precisión de un milímetro en la medición de la evaporación diaria (un litro de agregado en una superficie de un metro cuadrado corresponde a una lámina de un milímetro).

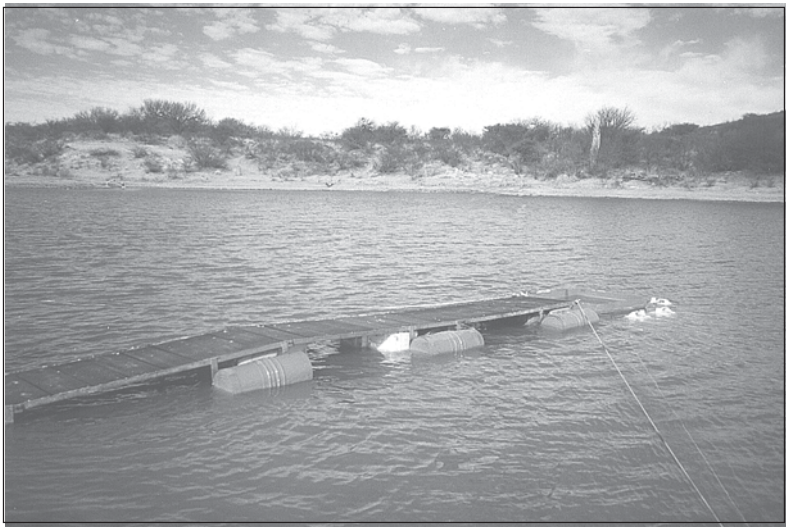


Figura 10. Evaporímetro

Valores de la evaporación. Las observaciones se realizaron diariamente a las ocho de la mañana. El balance, por lo tanto, se realizó a intervalos de 24 horas. Para el tanque clase A se calculó la diferencia entre las mediciones de dos días sucesivos, agregando a este (en caso de lluvia) la lámina precipitada que se registró en el pluviómetro correspondiente. La observación de los datos se atribuye al día precedente de la medición. Para el evaporímetro flotante, se agregó la lámina precipitada al número de litros vertidos dentro del tanque.

En el Cuadro 6 se presentan los valores promedios mensuales de la red de evaporímetros, valores resultantes de las observaciones diarias.

Cuadro 6. Evaporación media diaria mensual en la red de evaporímetros instalados durante el período de observación.

Estación Altitud (m)	Jaulas 1740		Yerbanis 1900		Zapata (evap.flot.) 1950		Zapata (evap. A) 1960		El Viejo 2150	
	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°
Ene	6.3	4.2	5.3	4.7	5.3	5.0	5.8	5.2	6.0	4.7
Feb	5.9	5.4	6.3	6.7	5.4	6.8	6.3	7.0	6.5	8.8
Mar	7.8	5.5	8.3	6.4	7.3	6.3	8.0	5.7	9.9	6.4
Abr	8.8	7.1	9.9	7.4	7.9	6.6	8.5	8.2	11.1	9.4
May	10.0	8.1	11.3	7.5	9.1	6.7	10.8	8.3	11.4	7.6
Jun	8.2	8.0	8.3	8.0	8.3	8.8	8.2	8.4	9.2	7.8
Jul	7.5	8.3	7.4	7.3	8.4	9.6	8.5	7.3	8.0	7.4
Ago	6.2	7.2	5.7	8.9	7.2	10.1	6.4	7.7	6.8	6.7
Sep	3.6	5.8	4.5	6.2	5.1	8.7	5.2	6.7	4.6	5.7
Oct	3.6	4.9	4.8	5.5	6.4	5.87	6.5	6.1	5.4	5.2
Nov	3.6	5.7	5.2	4.7	5.6	7.71	5.7	7.1	5.2	4.4
Dic	3.0	3.7	3.5	4.7	4.1	9.11	4.2	7.9	3.0	5.3
Promedio	6.2	6.1	6.7	6.5	6.7	7.6	7.0	7.1	7.3	6.7
Suma	2266	2185	2449	2312	2436	2723	2558	2606	2649	2407

Variación de la evaporación en función a la altitud. Al analizar los datos de la evaporación a la escala anual (tanques clase A), se observó un incremento de la evaporación con la altitud (Figura 11). Durante el primer año de observación y por encima de los 1,900 msnm, este incremento es de 80 mm por cada 100 m de altitud en el área montañosa de la zona, entre los bordos Zapata (1,960 msnm) y El Viejo (2,150 msnm). Para este mismo año, la evaporación es de 114 mm por debajo de los 1,900 msnm. Durante el segundo año de observación, los valores observados en Yerbanis y El Viejo son claramente inferiores que los del primer año, de tal forma que resulta difícil establecer los gradientes altitudinales de la evaporación a la escala anual.

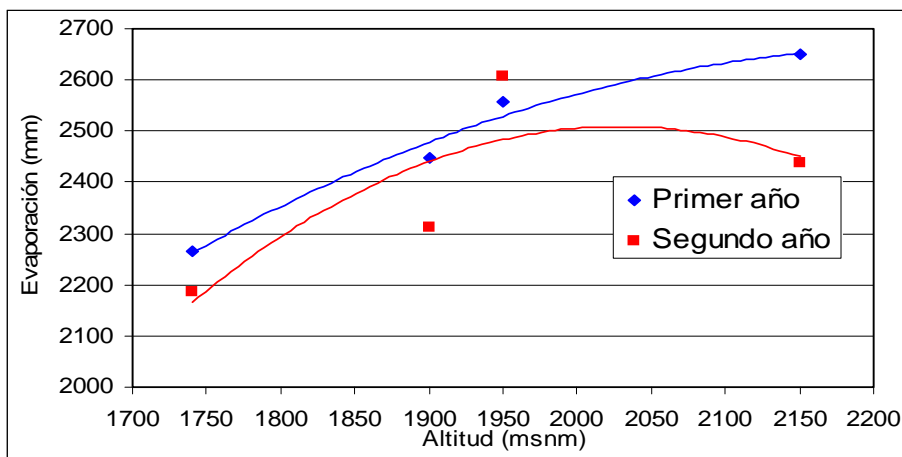


Figura 11. Relación altitudinal de la evaporación en tanques clase A.

A la escala mensual, las variaciones de la evaporación con la altitud resultan más complejas. Sin embargo, considerando la media diaria de la evaporación de los meses más fríos (noviembre, diciembre y enero) y de los meses más calurosos (febrero – mayo), se aprecia que para el período frío el valor máximo (5.5 mm día^{-1}) se sitúa alrededor de los 2,000 msnm, en tanto que para el período caluroso el incremento es continuo y el máximo (9.7 mm día^{-1}) coincide con la altitud más

elevada (Figura 12). Los valores medios del período húmedo (junio a octubre) presentan, como en el período frío, un máximo de evaporación (7.1 mm día^{-1}) alrededor de los 2,000 m de altitud.

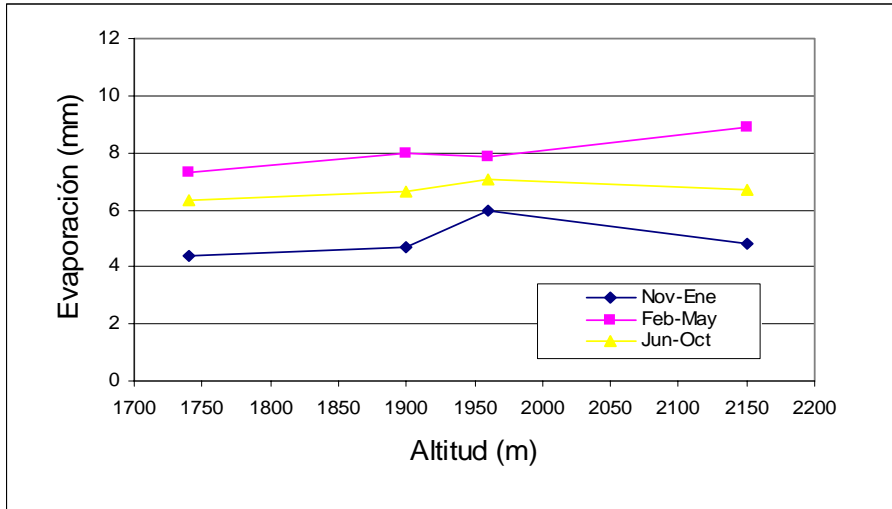


Figura 12. Variaciones de la evaporación estacional media con la altitud.

Los gradientes altitudinales de la evaporación diaria son iguales a:

- 0.40 mm por cada 100 m en período caluroso y seco (febrero a mayo),
- 0.14 mm por cada 100 en período de lluvias estivales (junio a octubre),
- 0.10 mm por cada 100 m en período frío (noviembre a enero).

El incremento general de la evaporación con la altitud se explica principalmente por el incremento de la velocidad del viento en período seco (febrero a mayo). En período estival húmedo y en período frío, la evaporación por encima de los 2,000 msnm es ligeramente superior a

la que se observa en Las Jaulas a la altitud de 1,740 msnm. Entre los dos tanques evaporímetros, la diferencia de altitud es de 410 m y la diferencia de la temperatura media de 2.4 °C. Así, la disminución de la temperatura con la altitud no es suficiente para provocar una disminución de la evaporación.

Variación estacional de la evaporación. Los valores medios diarios mensuales de la evaporación, para los dos años de observación, se muestran en las Figuras 13a y 13b.

Desde el punto de vista temporal, el análisis de las observaciones muestra que las evaporaciones más elevadas se registraron durante el mes de abril y mayo, durante la estación seca y calurosa (Figura 3), con valores máximos diarios que oscilan entre 7.5 y 9.5 mm para temperaturas medias de 21.7 °C en mayo. Los valores mínimos de 3.2 a 6.0 mm día⁻¹ se registraron durante los meses de diciembre y enero, con temperaturas medias del orden de 13 °C. En general, la evaporación decrece regularmente de junio a diciembre, aunque se puede observar un ligero incremento en los meses de octubre y noviembre.

A mayor altitud (estación El Viejo), los meses de febrero, marzo y abril presentan un incremento considerable de la evaporación debido a la importancia que tienen los vientos en esta zona (límites de la cuenca Cuencamé).

Relación entre las observaciones del evaporímetro flotante y clase A. Las relaciones entre las mediciones del tanque flotante y el de clase A se determinaron a partir de las observaciones que se realizaron en la estación Zapata, situada a una altitud de 1960 m (altitud del nivel del agua del bordo). Se eliminaron los valores que registraron una desviación superior al 30 por ciento en relación con el evaporímetro clase A, ya que las observaciones del evaporímetro flotante son, en efecto, menos precisas que las realizadas en el tanque clase A. Esto debido a su inestabilidad, producto del oleaje, al momento de realizar las mediciones (precisión máxima teórica de un milímetro y de 1/100 de milímetro para el tanque A).

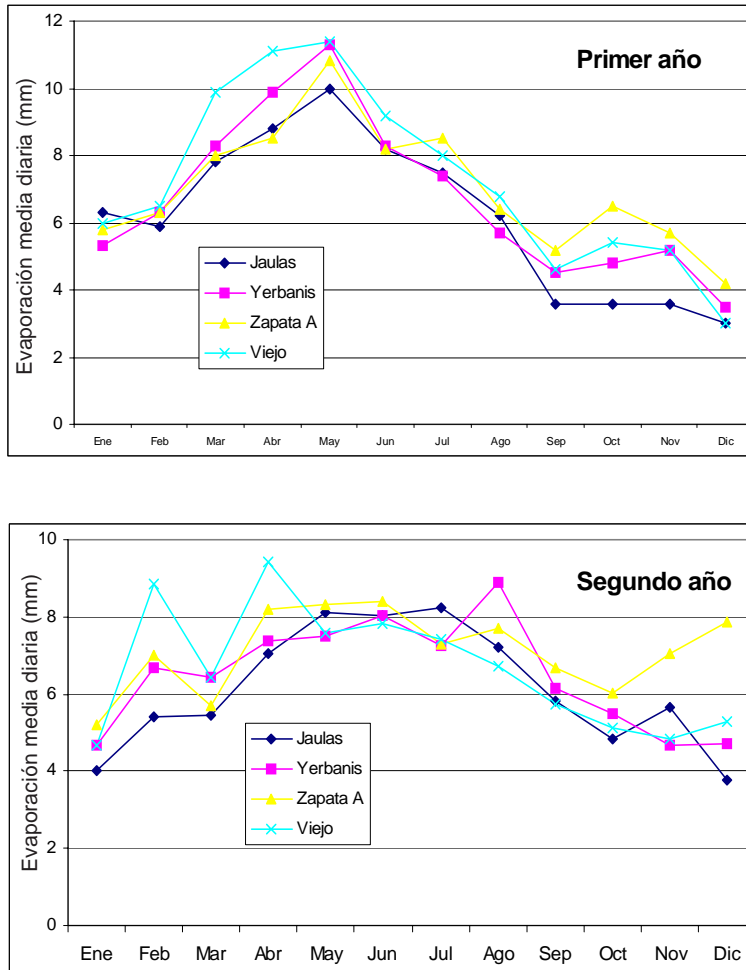


Figura 13. Evaporación media diaria mensual de los cuatro evaporímetros instalados en la zona: (a) durante el primer año y (b) durante el segundo año.

A escala mensual (Figura 14), por encima de los 4 mm día^{-1} , la relación de la evaporación en ambos tanques se comporta de la siguiente manera:

para el período de enero a mayo: $Y = 0.86 X + 0.55$ 6
 Con $R^2 = 0.87$;

para el período de junio a diciembre: $Y = 0.96 X + 0.20$ 7
 Con $R^2 = 0.81$;

Siendo X la evaporación en el tanque clase A, e Y la evaporación en el tanque flotante.

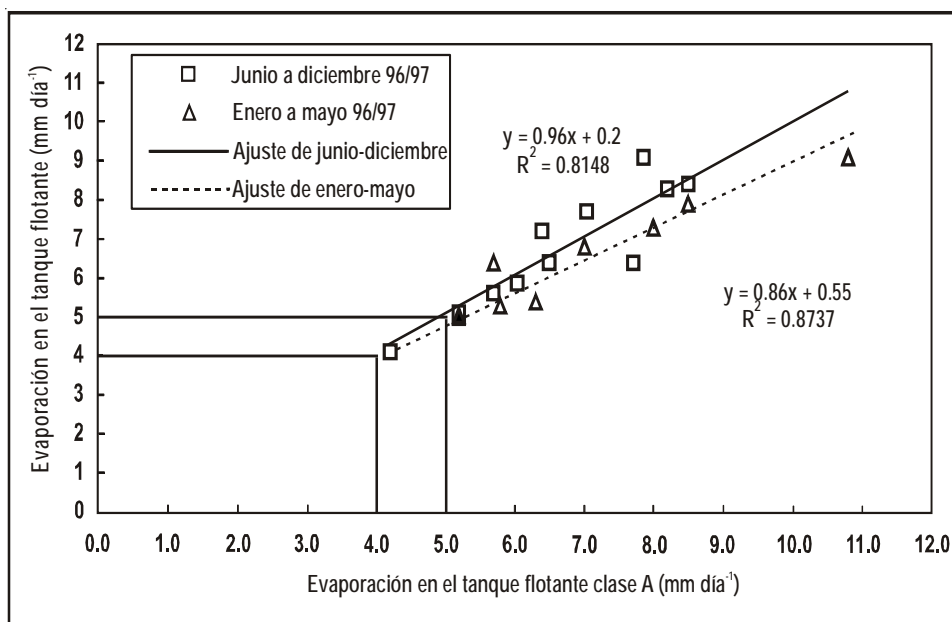


Figura 14. Relación entre la evaporación del tanque flotante y clase A durante el período de observación.

De enero a mayo, la evaporación del tanque clase A es claramente superior a la del tanque flotante, mientras que de junio a diciembre la evaporación en ambos tanques es muy similar, excepto por los dos primeros meses fríos del año, noviembre diciembre, en los cuales la inercia térmica del agua almacenada explica una evaporación

ligeramente superior en relación al tanque clase A. De hecho, esta inercia térmica juega un papel inverso durante el período caluroso.

Por debajo de los 4 mm día⁻¹, la evaporación en el tanque flotante se puede considerar equivalente a la evaporación del tanque clase A, es decir:

$$Y = X \quad 8$$

La relación anterior, aunada a la relación de la evaporación con la altitud, permitió determinar las tasas diarias de evaporación en las proximidades de los bordos de retención. Estos cálculos se efectúan suponiendo que, para dos altitudes suficientemente próximas, la evolución de la evaporación es lineal en función de la altitud. En el Cuadro 7 se presentan cada una de las ecuaciones establecidas en los bordos para el cálculo de la evaporación dentro de sus embalses.

Cuadro 7. Ecuaciones que se utilizan para el cálculo de la evaporación dentro de los bordos de retención.

Evaporación Pastelero	=	0.76 Eva Zap + 0.24 Eva Viejo
Evaporación El Viejo	=	0.45 Eva Zap + 0.55 Eva Viejo
Evaporación El Muerto	=	0.42 Eva Zap + 0.58 Eva Viejo
Evaporación Carboneras	=	0.42 Eva Zap + 0.58 Eva Viejo
Evaporación Tullido	=	Eva Zap

Nivel del agua en los embalses

En ausencia de desbordamiento, las observaciones del nivel del agua dentro del embalse tienen por único objetivo el determinar el incremento o decremento del volumen almacenado (ΔV), concatenando para ello los niveles del embalse con la curva cota-volumen. En fase de desbordamiento, la observación del nivel del agua proporciona igualmente los gastos vertidos (Ecuación 2). En período seco, el

decremento de la altura del agua se debe a la infiltración, a la evaporación y a los diversos requerimientos (Ecuación 4). Así, sin considerar las aportaciones subterráneas, estos tres fenómenos se observan globalmente por el decremento del nivel del agua.

Análisis y calidad de los datos. Para dar seguimiento a estos niveles, cada uno de los siete bordos se equiparon con una serie de escalas limnimétricas y de un limnógrafo mecánico, ubicado en el extremo de una pasarela y en la parte más profunda del embalse (Figura 15). Estos limnógrafos permiten el registro diario de los niveles del agua.



Figura 15. Pasarela y limnógrafo en el bordo El Viejo.

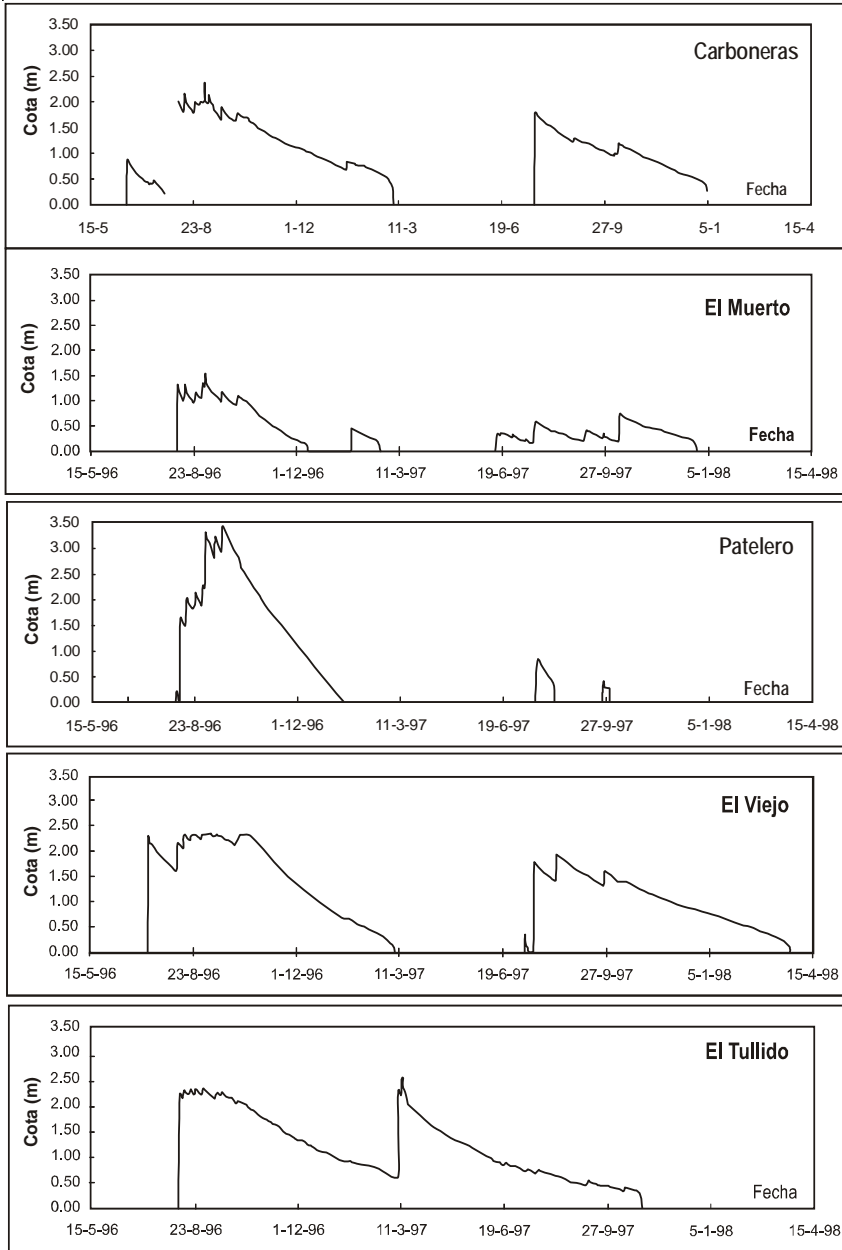


Figura 16. Valor promedio diario del nivel del agua en cada uno de los bordos durante el período de observación.

Los limnigramas se relacionaron diariamente con los niveles de agua observados a las ocho de la mañana sobre las escalas limnimétricas. Estas mediciones se digitalizaron para analizarse con la ayuda del programa de cómputo Hydrom2 (ORSTOM, 1985), obteniéndose así la crónica de los pares tiempo-cota del agua dentro del embalse (Figura 16). El balance diario del agua se establece a partir de la altura observada a las ocho horas de la mañana, hora en la cual no se presentaron avenidas o desbordamientos en el período observado.

Debido al sistema de transmisión mecánica, los limnógrafos tienen una precisión de un centímetro en la observación del nivel del agua, tanto en su incremento como en su decremento. Por otra parte, la máxima precisión del registro del tiempo es de diez minutos, debido tanto a la transmisión mecánica como al espesor de trazado de la pluma. Además de los errores relacionados con el mecanismo de los limnógrafos, existen otros tipos de errores que pueden influenciar la calidad de los datos. El análisis de las observaciones diarias de las escalas limnimétricas mostró que ciertos errores de lectura pueden inducirse por un simple cambio de observador o por la apreciación del nivel del agua sobre la escala en presencia de oleaje. En este último caso, la máxima precisión de observación es de 0.5 cm. Conjuntamente a estos dos tipos de errores, en periodo de estiaje cuando el nivel del agua desciende lentamente, los limnógrafos pueden presentar problemas de transmisión mecánica provocando un registro en «escalera». Sin embargo, todos estos tipos de errores son puntuales y no acumulables lo que permite corregirse.

El tratamiento comúnmente empleado para atenuar este tipo de errores consiste en calcular las medias móviles de la serie de datos. En este caso, para conocer el nivel del agua (H_j) de un cierto día (j), se calcula la media de los dos registros precedentes (H_{j-1} , H_{j-2}), el registro del día j (H_j) y los dos registros posteriores del día j (H_{j+1} , H_{j+2}). De esta forma se tiene que para el día j , la altura (H) del nivel del agua observada es:

$$H_j = (H_{j-2} + H_{j-1} + H_j + H_{j+1} + H_{j+2}) / 5 \quad 9$$

La Figura 17 muestra los valores observados del nivel del agua dentro del bordo Carboneras así como los resultados obtenidos a partir de la media móvil. Este mismo tratamiento de los datos se realizó para todos los bordos estudiados y sus resultados se utilizaron como base para calcular el balance del agua.

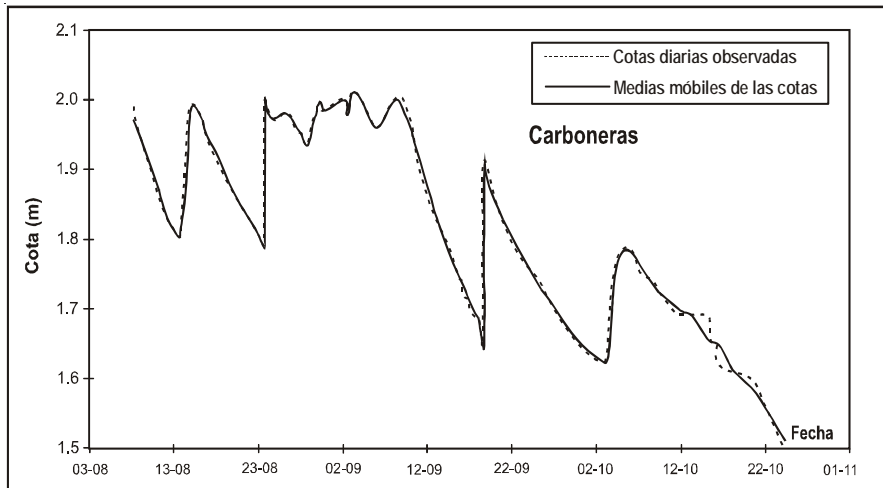


Figura 17. Crónicas de las cotas medias diarias observadas y calculadas a partir de las medias móviles.

A partir de las alturas medias del nivel del agua y de la relación cota-volumen en cada uno de los embalses, los volúmenes almacenados de agua se calcularon para cinco de los siete bordos que recibieron escurrimientos durante el período de observación. Las variaciones semanales de estos volúmenes se presentan en la Figura 18.

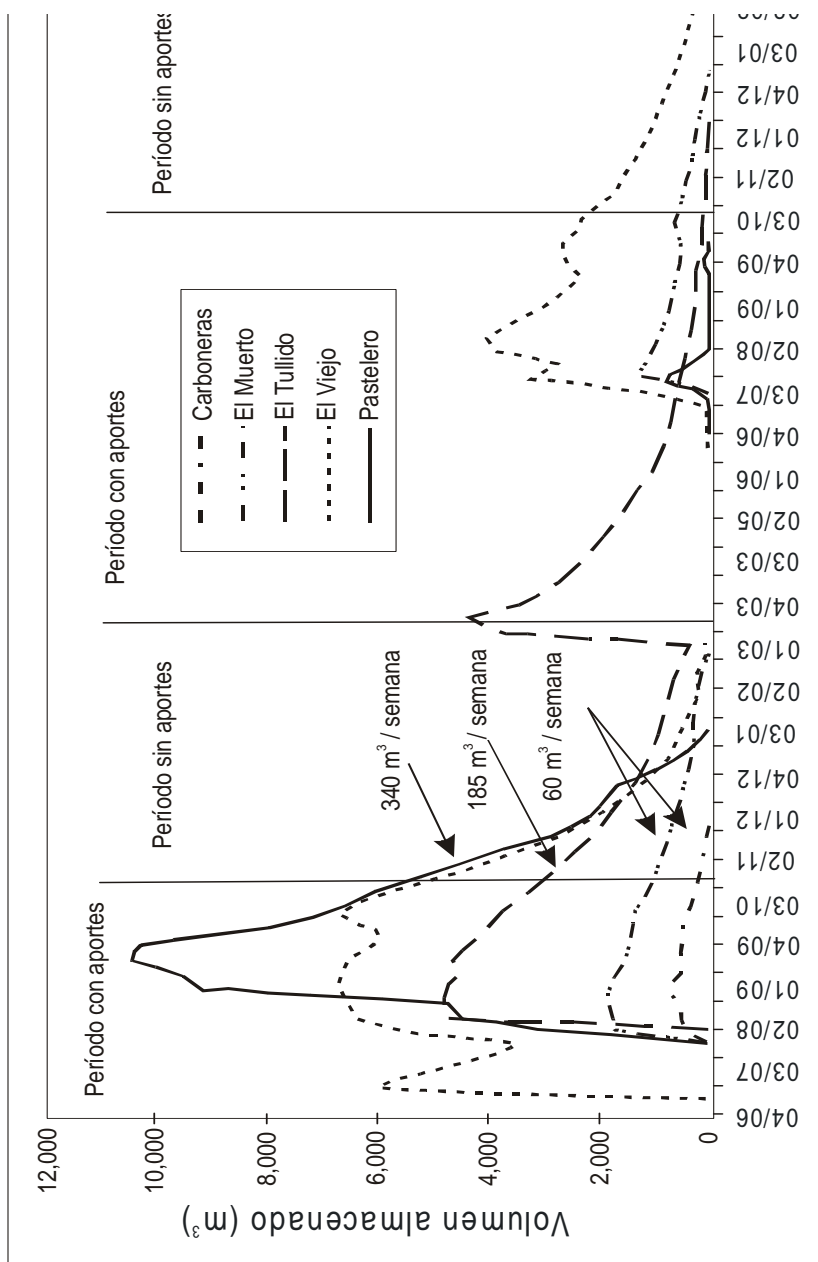


Figura 18. Crónicas de los volúmenes promedios semanales almacenados de cinco bordos de retención.

Esta figura muestra que los escurrimientos de la estación de lluvias del primer año de observación fueron superiores a los registrados durante el segundo año. El volumen total almacenado dentro de los cinco bordos fue de 47,000 m³ en el primer año, y sólo de 10,300 m³ para el segundo, a pesar de que la lluvia total anual en ambos años fue muy similar. Esta diferencia en la producción de los escurrimientos se debe principalmente al hecho de que los eventos del segundo año, aunque más numerosos que en el primero, fueron individualmente menos importantes. Esto muestra el grado de complejidad y variabilidad de la lluvia dentro de las regiones semiáridas del Norte de México (Estrada *et al.*, 1993, Nouvelot y Descroix, 1996, Descroix *et al.*, 1997).

Asimismo, en la Figura 18 se aprecian las variaciones de los volúmenes de agua acumulados durante los períodos húmedo y seco. Un análisis de estas variaciones durante el período de estiaje del primer año permite diferenciar tres tasas de disminución del nivel del agua dentro de los embalses:

- Fuerte abatimiento de 340 m³ por semana en los bordos El Viejo y Pastelero,
- Abatimiento moderado de 185 m³ por semana en el bordo El Tullido,
- Abatimiento bajo de 60 m³ por semana en los bordos de Carboneras y El Muerto.

Estas tasas de abatimiento se relacionan con el tiempo de duración del agua dentro de los diferentes embalses. Los bordos que presentaron más baja capacidad de almacenamiento mantuvieron el agua por un período más prolongado. Para el primer año de observación, el análisis del período seco mostró que el agua se mantuvo durante 19 semanas en el bordo Carboneras y durante 15 semanas en el bordo Pastelero. Al inicio de este periodo de estiaje, el bordo Carboneras presentaba un almacenamiento de 1,275 m³ y de 6,400 m³ en el bordo Pastelero.

Estimación del consumo del agua

El agua almacenada dentro de los bordos de retención se utilizó sólo para abrevar al ganado. Para ello, existen en la zona diferentes formas de extracción del agua: abrevar al ganado directamente del embalse, la extracción del agua mediante sifones y la derivación hacia una red de distribución establecida de 280 abrevaderos metálicos distribuidos en toda la zona de estudio. En el caso de los siete bordos estudiados, la utilización se limita al abrevamiento directo del ganado, sin extracción alguna por derivación.

De esta forma, el consumo representa la satisfacción de las necesidades diarias de agua por parte del ganado, el cual varía según el número total de cabezas que se localizan dentro del potrero donde se ubica el bordo de retención. De acuerdo a la edad y sexo del ganado, Anaya y Barral (1995) estiman que el ganado bovino de la raza Herford, en producción en una región semiárida como la zona de estudio, consumen en promedio 40 litros diarios de agua para el caso de una hembra adulta, 50 litros para el caso de un toro y 30 litros en el caso de los becerros. El número de animales por potrero se determinó a partir de un inventario. Así, el consumo de agua correspondiente a cada embalse finalmente se determinó al dividir las necesidades totales diarias del ganado en el potrero por el número de bordos de retención y otros abrevaderos localizados dentro del mismo potrero, suponiendo que el ganado no tiene preferencia de abrevar en alguno de ellos en particular. El Cuadro 8 resume las estimaciones de consumo para cada uno de los bordos estudiados así como el número total de animales y abrevaderos presentes dentro de cada uno de los potreros estudiados.

Cuadro 8. Estimación del consumo de agua por bordo de retención.

Nombre del bordo	El Muerto	Carboneras	El Viejo	Pastelero	El ti
Características del potrero					
Nombre del potrero	Cerro Ancho	Cerro Ancho	San Miguel	El Pilón	El M ^e
Superficie del potrero (ha)	450	450	550	415	7
Abrevaderos ubicados dentro del potrero	5	5	6	3	
Número de animales en el potrero	53	53	150	28	
Consumo medio diario (litros por animal)	40	40	30	40	
Duración del agua dentro del bordo					
Para la estación de lluvias del primer año	128	265	238	147	2
Para la estación de lluvias del segundo año	222	168	249	25	2
Total	350	433	487	172	4
Consumo del agua dentro del bordo					
Consumo del agua dentro del bordo m ³ día ⁻¹	0.42	0.42	0.75	0.37	0
Consumo total del agua durante los dos años (m ³)	148	184	365	64	2

Resultados del balance hídrico

El balance anual del agua dentro de los embalses se realizó distinguiendo los períodos secos de los períodos lluviosos con avenidas. En período seco, la ecuación del balance del agua proporciona una buena estimación de la infiltración. Por el contrario, en periodo de avenidas es imposible utilizar la ecuación del balance para estimar la infiltración. Sin embargo, la duración de las avenidas en las cuencas de esta zona rara vez sobrepasa las dos horas (Estrada, 1999). Por lo tanto, es posible estimar la infiltración para un determinado día que presente una avenida a partir de la media ponderada de las infiltraciones de los días que le preceden y le suceden a la avenida, tomando en cuenta la hora en que ocurrió el nivel máximo del agua en el embalse para determinar el coeficiente de ponderación. Durante la estación de lluvias del primer año de observación, 14 eventos de lluvia provocaron escurrimiento en cinco de las siete cuencas estudiadas, en tanto que durante el segundo año este valor descendió a tres o cuatro eventos.

Los valores de la infiltración y de la evaporación presentados en la Figura 19 (a y b) son los valores promedio de cinco días de observación en los embalses de El Viejo y Pastelero. Esta media en cinco días permite disminuir los errores de cálculo de la evaporación dentro de los bordos, dado que en ciertos casos el cálculo diario del balance arroja resultados de la evaporación superiores a la disminución del nivel del agua en el embalse, lo que representaría una infiltración nula. Para el caso de los bordos estudiados, la infiltración difícilmente puede considerarse como nula, inclusive durante periodos cortos, por lo que estos errores son probablemente inducidos por la estimación de la evaporación en el embalse al considerarse una relación altitudinal de tipo lineal.

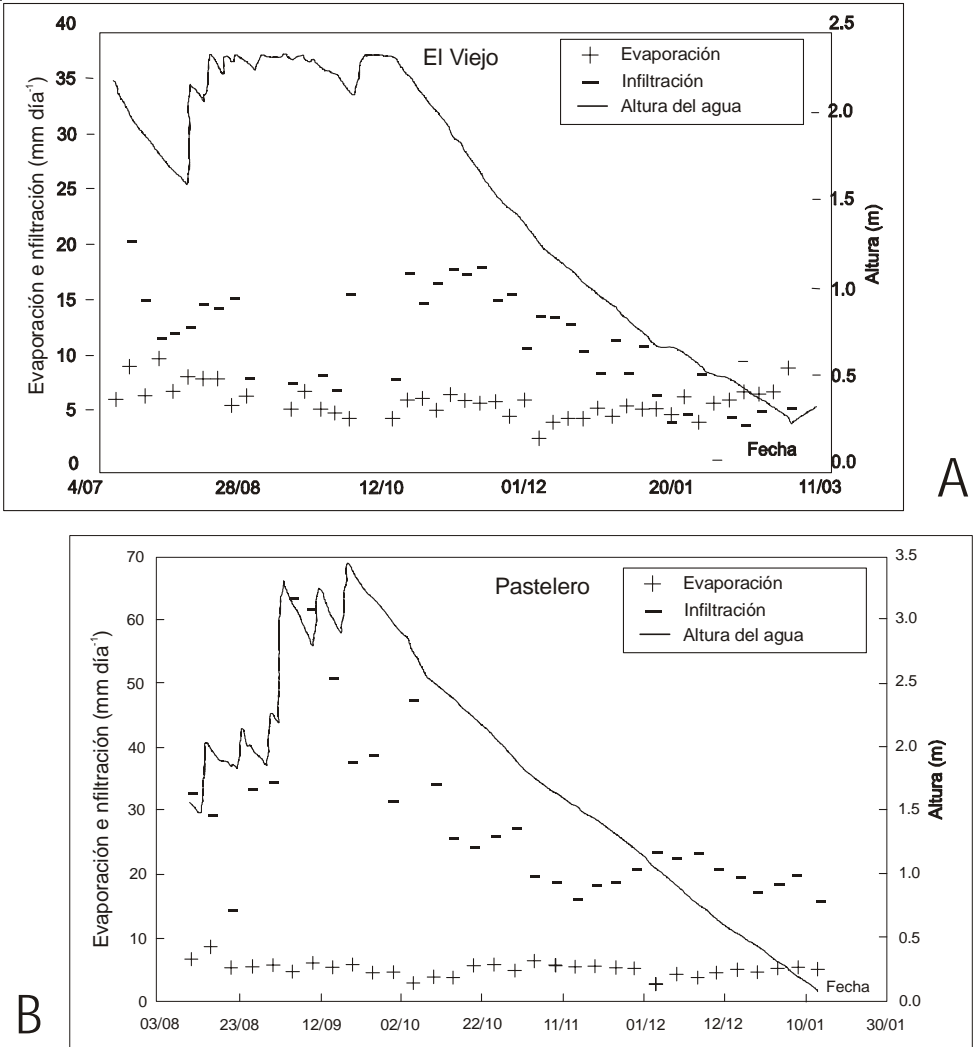


Figura 19. Valores promedio de la infiltración y la evaporación de 5 días de observación en los bordos de El Viejo (A) y Pastelero (B).

De acuerdo a las dos figuras anteriores, los volúmenes evaporados son menores aunque más estables en relación a la infiltración, principalmente en el caso del bordo Pastelero (el más profundo $H = 3.3$ m, Cuadro 5). En este caso, a mayor cota del nivel del agua la tasa de infiltración es mayor. Sin embargo, esta tasa tiende a estabilizarse por debajo de la cota de 2.5 m. Esta situación confronta la hipótesis donde, contrariamente a los bordos de retención en Túnez al norte del África (Albergel *et al.*, 1999), la infiltración juega un papel preponderante en el balance del agua de los bordos de retención dentro de la zona de estudio. El hecho de que los bordos del embalse se modifiquen con frecuencia en la zona contribuye, de cierta forma, a mantener valores elevados de infiltración. Sin embargo, probablemente la naturaleza del sustrato sea aún más importante que el propio manejo de los bordos de retención. Dada la naturaleza geológica de la región, compuesta principalmente por materiales permeables conformados de rocas eruptivas ácidas o básicas con fisuras, la infiltración del agua se ve favorecida en tanto que en Túnez, con materiales generalmente arcillosos, ésta se ve reducida de forma considerable.

De los siete bordos estudiados, cinco de ellos recibieron escurrimientos durante los dos años de observación y tres presentaron importantes desbordamientos durante el primer año, considerado éste ligeramente superior a la media anual (Estrada, 1999). Los bordos de Carboneras y El Tullido presentaron desbordamientos que representan el 70 por ciento del volumen total escurrido, en tanto que El Viejo desbordó el 23 por ciento del volumen (Figura 20).

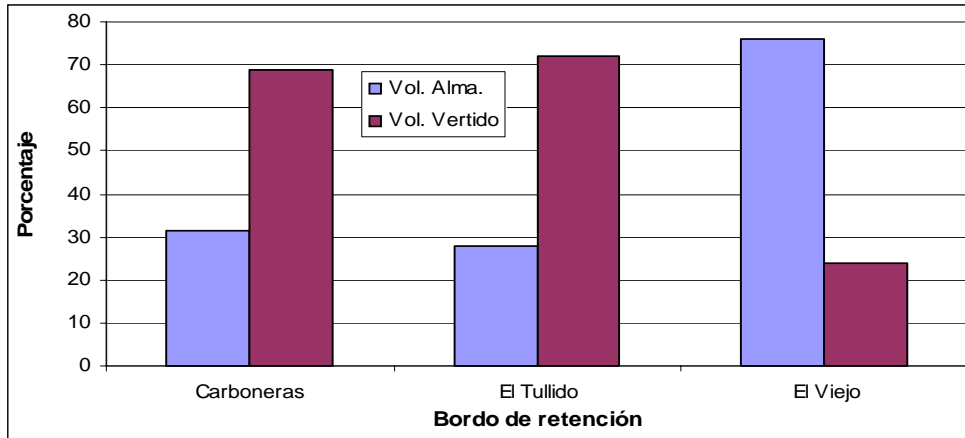


Figura 20. Volúmenes vertidos en porcentaje durante el primer año de observación en los bordos de Carboneras, El Tullido y El Viejo.

Durante la estación de lluvias del segundo año, ninguno de los bordos presentó desbordamientos, aunque este año se considera excepcionalmente deficitario en escurrimientos con un período de retorno de 0.05, es decir uno de cada 20 años (Estrada, 1999). En tanto que el periodo de retorno del primer año puede establecerse en uno de cada dos o tres años (0.5 ó 0.33).

El análisis de los volúmenes de agua utilizados en relación al total almacenado durante el primer y segundo año (Figura 21 y Cuadro 9), muestra que estos varían entre 0.3 y 2.6 por ciento para el mejor de los casos. El bordo Pastelero presenta el porcentaje más bajo de utilización, en tanto que El Muerto y Carboneras presentan los porcentajes más elevados. En el segundo año, estos porcentajes se incrementaron ligeramente debido a la poca aportación recibida en los embalses, pasando de 0.30 a 0.56 por ciento y de 2.6 a 3.6 por ciento. En todos los casos, el porcentaje utilizado del agua almacenada en los bordos es muy bajo, contrario al objetivo por el cual fueron construidos.

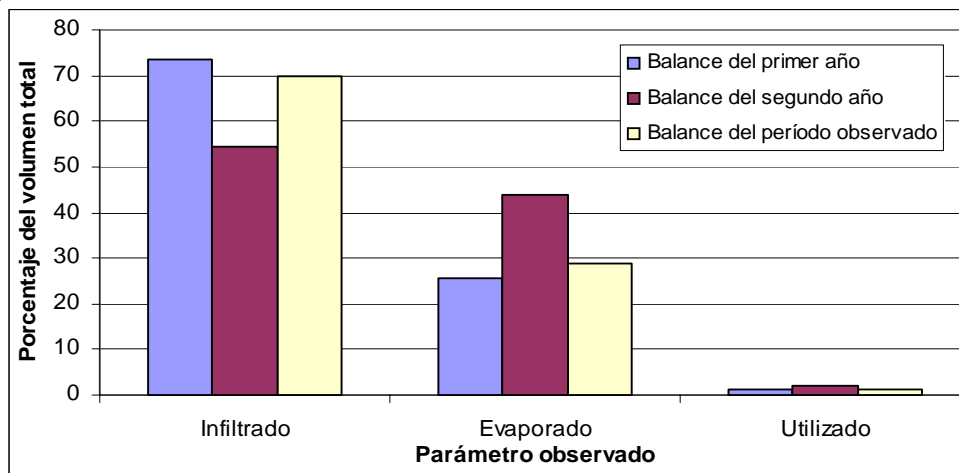


Figura 21. Promedio del balance anual y bianual del agua almacenada dentro de los cinco bordos de retención.

Para el primer año, los volúmenes evaporados representan entre el 15 y 38 por ciento del total almacenado en los embalses, en tanto que los volúmenes infiltrados representan entre el 61 y 85 por ciento. Durante esta estación de lluvias, todos los embalses estudiados presentaron mayores tasas de infiltración en relación a la evaporación. Por el contrario, durante el segundo año, la infiltración representó entre el 30 y 85 por ciento del volumen total almacenado y la evaporación entre el 16 y 70 por ciento. En ambos años, el embalse de Pastelero presentó los porcentajes más elevados de infiltración y los más bajos porcentajes de utilización.

Los resultados de estos análisis cuestionan el propósito para lo que fueron construidos los bordos de retención. Estos, favorecen en su mayoría la infiltración, proceso que se analiza a continuación.

Cuadro 9. Balance de los volúmenes de agua durante los dos años de observación.

		Volúmenes expresados en m ³					
	Bordo	Escu.	Desb.	Alma.	Evap.	Utili.	Infiltr.
Primer año	El Muerto	2345	0	2345	473	80	1812
	Carboneras	12152	8351	3801	1291	97	2413
	El Tullido	34815	25071	9744	3688	121	5935
	Pastelero	18284	0	18281	2725	54	15502
	El Viejo	16934	3860	13074	3842	181	9050
Segundo año	El Muerto	368	0	368	250	10	108
	Carboneras	1675	0	1675	871	60	743
	Pastelero	1606	0	1606	259	9	1338
	El Viejo	6655	0	6655	3122	133	3400

LOS MECANISMOS DE INFILTRACIÓN DENTRO DE LOS BORDOS DE RETENCIÓN

Como se observó anteriormente, las pérdidas por infiltración en los bordos estudiados representan el 71 por ciento del volumen total almacenado durante el primer año de observación y el 52 por ciento durante el segundo año (Figura 21). Sin embargo, estas pérdidas no son idénticas en todos los casos y varían de un año a otro en función al nivel del agua y grado de azolve que presenten los bordos.

Con la finalidad de estudiar en forma más detallada el proceso de infiltración dentro de los embalses de los bordos estudiados, se realizaron diferentes pruebas utilizando infiltrómetros tipo Muntz. Estas pruebas tuvieron como objetivo conocer las tasas de infiltración tanto en la parte colmatada del fondo del embalse como en los bordos del mismo. Los sedimentos se encuentran constituidos esencialmente de arcillas y materias orgánicas finas. El porcentaje de las partículas finas inferiores a 2 mm es de 44 por ciento en promedio para el embalse del bordo Carboneras. Cercano al 60 por ciento para el bordo El Tullido, (Loyer y Plenecassagne, 1996). En el período de desecado, los sedimentos se fisuran formando prismas hexagonales delimitados por grietas que pueden alcanzar los 15 cm de ancho. Para salvar esta situación, se utilizaron infiltrómetros tipo Muntz suficientemente grandes para integrar la heterogeneidad de las fisuras, con 1 m² de superficie para el anillo interior y de 8 m² para el anillo exterior. Sobre los bordos del embalse el infiltrómetro utilizado presenta menores dimensiones debido a su pendiente pronunciada, con una superficie de 100 cm² para el anillo interior y de 800 cm² para el exterior (Nouvelot, 1993). Estas dos observaciones de permeabilidad se realizaron en los bordos de El Muerto, Carboneras, El Tullido y El Molino. En el caso del bordo Pastelero, estas observaciones se realizaron únicamente sobre el fondo

del embalse. En todos los casos, las pruebas de infiltración se realizaron con una carga constante de 10 cm de agua, con una duración que varió entre las seis y 24 horas. El Cuadro 10 presenta un resumen de los valores observados en cada uno de los bordos de retención.

Cuadro 10. Infiltración básica, en mm día⁻¹, con una carga de 10 cm de agua dentro de los embalses de los bordos estudiados.

	El Muerto	Carboneras	El Tullido	Molino	Pastelero
Fondo del embalse	5.8	6.1	7.1	130	167
Sobre el bordo	80	27	41	263	-

Los resultados mostraron una gran variabilidad de las tasas de infiltración y valores siempre superiores en los bordes en comparación con el fondo del embalse, condición normal dada la mayor sedimentación que se realiza en este último. El bordo El Molino, (sobre basalto), con escurrimientos poco significativos durante el período de observación, presenta valores elevados de infiltración tanto en el fondo del embalse (130 mm día⁻¹) como en sus bordes (263 mm día⁻¹). En el caso del bordo Pastelero, recién reconstruido, presenta la más alta tasa de infiltración con 167 mm día⁻¹ en el fondo del bordo. Puede suponerse que estas tasas pueden llegar a los 300 mm día⁻¹ sobre sus bordes.

Es evidente que estas tasas de infiltración no pueden compararse estrictamente con aquellas que se pueden registrar en condiciones naturales, donde para la mayoría de los bordos pueden alcanzar una carga superior a los dos metros. Sin embargo, pueden evidenciar tanto las tendencias y la gran diferencia que existe entre en fondo del embalse y sus bordes como entre los propios embalses estudiados. Los resultados experimentales van en el mismo sentido que las pérdidas por infiltración observadas en el balance del agua. El bordo de Pastelero presenta, por ejemplo, las tasas de infiltración más elevadas en ambos casos.

Análisis de las láminas infiltradas en función de la carga

El análisis de la relación entre las tasas de infiltración observadas bajo condiciones naturales y el nivel del agua en los bordos, muestra diferencias significativas tanto en forma espacial como temporal. En la Figura 19, donde se muestran los valores de los niveles del agua y las tasas de evaporación e infiltración de los bordos El Viejo y Pastelero, se puede apreciar, por ejemplo, que el valor medio de la infiltración es de ocho y 20 mm día⁻¹, respectivamente. En esta figura se aprecia de igual forma que la tasa de infiltración se encuentra directamente relacionada con el nivel del agua y el período considerado. Para el bordo El Viejo, esta tasa puede llegar a los 37.5 mm día⁻¹ al inicio de la estación de lluvias del primer año a una cota de 2.2 m, y solamente de 15 mm día⁻¹ al final de esta misma estación de lluvias a la misma cota.

Análisis correspondiente a la estación de lluvias

Para el bordo de Carboneras y El Viejo se pudieron observar dos períodos de decremento del nivel del agua durante el primer año de observación: uno al inicio de la estación de lluvias y el otro en el transcurso de la misma. La Figura 22 (a y b) muestra que las tasas de infiltración son superiores al inicio de la temporada, inclusive para el bordo El Viejo, donde esta situación es menos evidente. Para el bordo Carboneras, con un nivel de 80 cm, la velocidad de infiltración se aproxima a los 25 mm día⁻¹ durante el primer período. Esta es inferior a los 5 mm día⁻¹ durante el segundo. Esta diferencia en la velocidad de infiltración se debe al estado de los sedimentos al final de la estación seca y a su fuerte retracción bajo el efecto de la desecación. Al inicio de la estación de lluvia, estos sedimentos presentan una fuerte capacidad temporal de infiltración. Esto también fue observado durante las pruebas de infiltración realizadas en el fondo del embalse, siendo necesario agregar poco más de 2 m³ de agua dentro de los anillos del infiltrómetro antes de comenzar la prueba, lo que representa una lámina de 28.6 cm. Es decir, que para poder observar el nivel del agua con una cota de 80 cm es necesaria en un principio una lámina de 28 cm sobre el fondo del embalse, la cual sirve únicamente para saturar los sedimentos fisurados. Posteriormente, es necesario que transcurran

varios días antes de llegar a un régimen de infiltración con mayor estabilización.

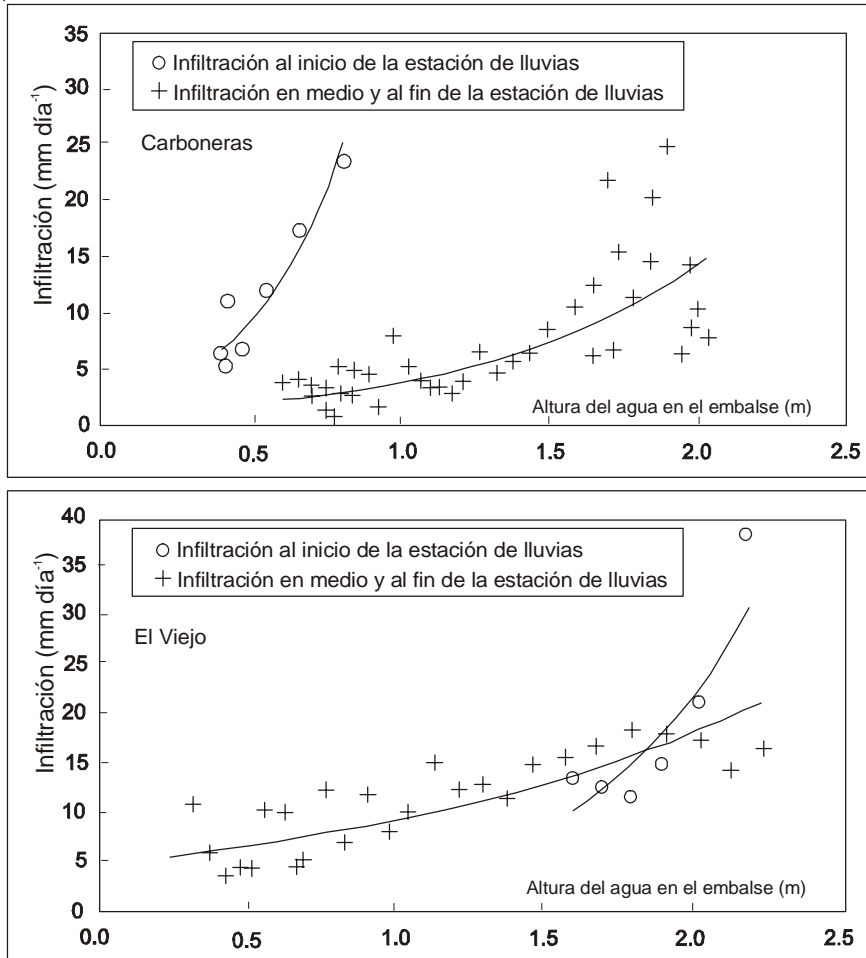


Figura 22. Infiltración dentro de los bordos de Carboneras y El Viejo en función a los niveles del agua durante la estación de lluvias.

Análisis interanual de la infiltración

Las pruebas de infiltración realizadas en el fondo de los embalses mostraron claramente la influencia de los sedimentos en las tasas de infiltración. Un análisis realizado sobre parcelas experimentales en la zona de estudio mostró que los primeros eventos lluviosos aportan la mayor cantidad de sedimentos (Estrada, 1999). Esta acumulación progresiva de los materiales a través del año modifica las condiciones que determinan las tasas de infiltración.

Durante la estación de lluvias del período de observación, las tasas de infiltración fueron observadas en cuatro de los siete embalses estudiados: El Viejo, Carboneras, El Muerto y El Tullido. Asimismo, en tres de estos bordos fue posible cuantificar los volúmenes de los sedimentos aportados durante la estación de lluvias del primer año, permitiendo comparar de un año a otro su efecto sobre la infiltración del agua dentro de los embalses.

En la Figura 23 se presentan las tasas de infiltración de los bordos Carboneras, El Tullido y El Muerto durante el primer y segundo año de observación. Su comparación muestra que la infiltración no evolucionó de manera significativa entre las dos estaciones de lluvias. Para el caso del bordo Carboneras, los aportes sólidos del primer año representaron un volumen de 107 m^3 , en tanto que para el bordo El Muerto fueron únicamente de 9 m^3 . Para el bordo El Tullido, el volumen de estos sólidos fue de 200 m^3 en ambos años. Considerando una densidad de los sedimentos de 1.85 gr cm^{-3} , estos volúmenes representan una aportación específica de 1.8 t ha^{-1} en la cuenca de Carboneras, 1.7 t ha^{-1} en la del El Muerto y de 0.9 t ha^{-1} para la cuenca de Pastelero.

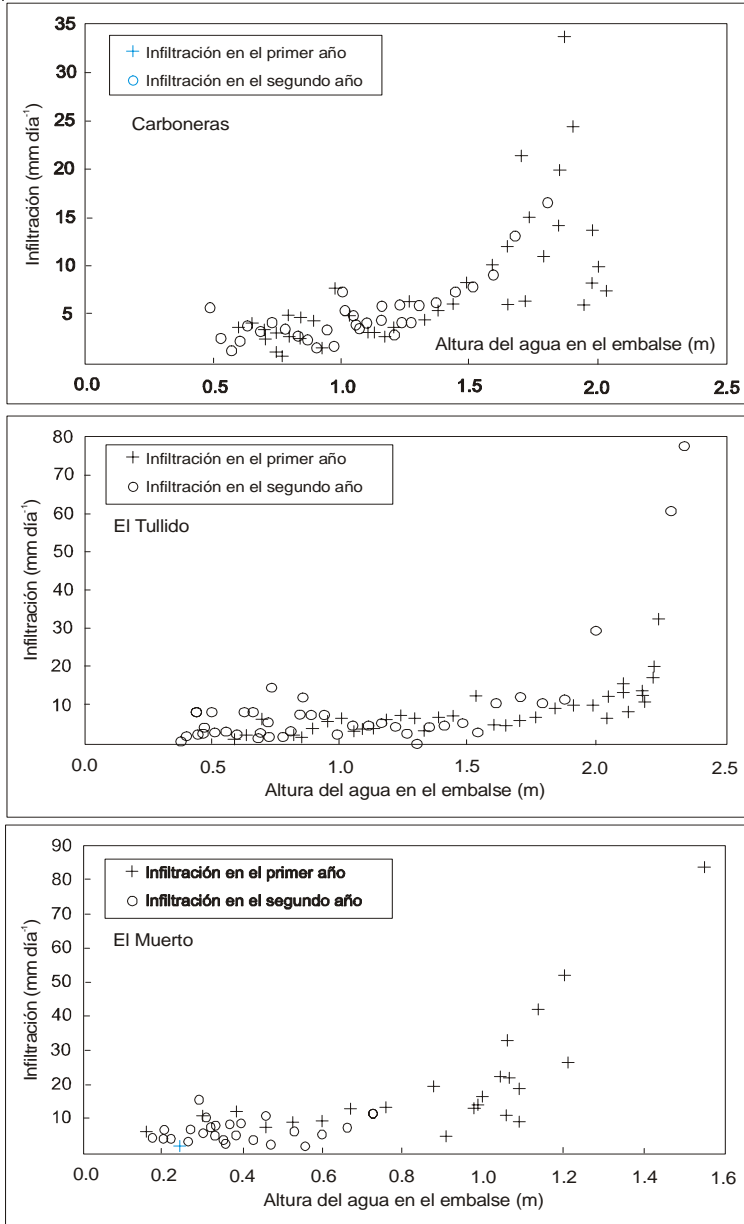


Figura 23. Infiltración dentro de los bordos Carboneras, El Tullido y El Muerto en función de los niveles del agua durante la estación seca del período de observación.

En el caso del bordo El Viejo, el análisis de las tasas de infiltración mostró una diferencia significativa en todos los niveles del agua para los dos años de observación (Figura 24). Con un volumen de sedimentos de 250 m³ en el primer año, este embalse fue el más colmatado. Esta aportación corresponde a una aportación específica de 2.5 t ha⁻¹. Las tasas de infiltración medias observadas dentro de este embalse para el primer año son superiores a las del segundo. A la cota de 1 m, por ejemplo, la infiltración fue de 8 mm/día en el primer año y solamente de 4 mm día⁻¹ en el segundo. Esta diferencia de comportamiento se debe probablemente a los procesos de decantación y compactación de los sedimentos dentro del embalse.

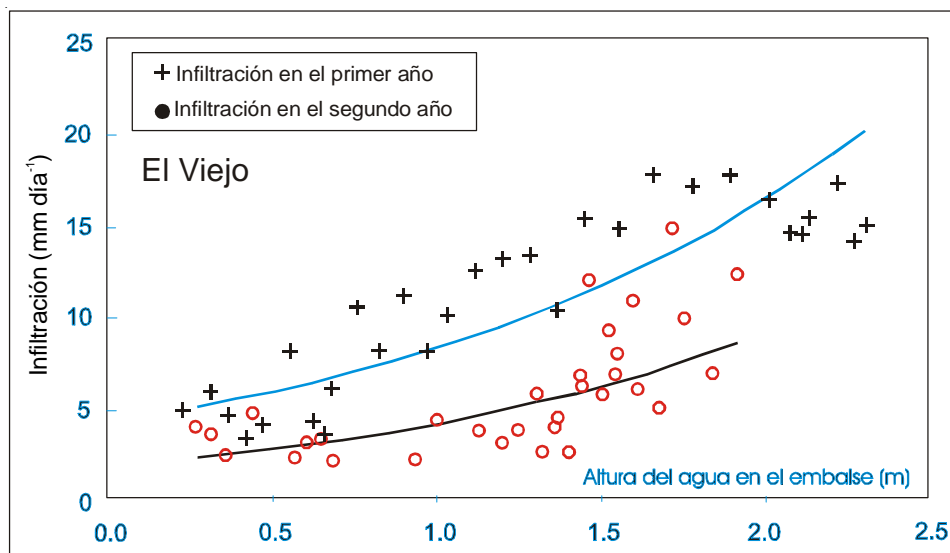


Figura 24. Infiltración dentro del bordo El Viejo en función de los niveles del agua durante las estaciones secas del período de observación.

Caracterización de la infiltración entre los diferentes bordos de retención

La comparación de las tasas de infiltración permite establecer una tipología entre los bordos estudiados. Para compararlos, se graficaron las tasas infiltradas en ambos años de observación para los bordos Carboneras, El Muerto y El Tullido, para el segundo año en el caso del bordo El Viejo y el primer año para el caso de Pastelero (Figura 25).

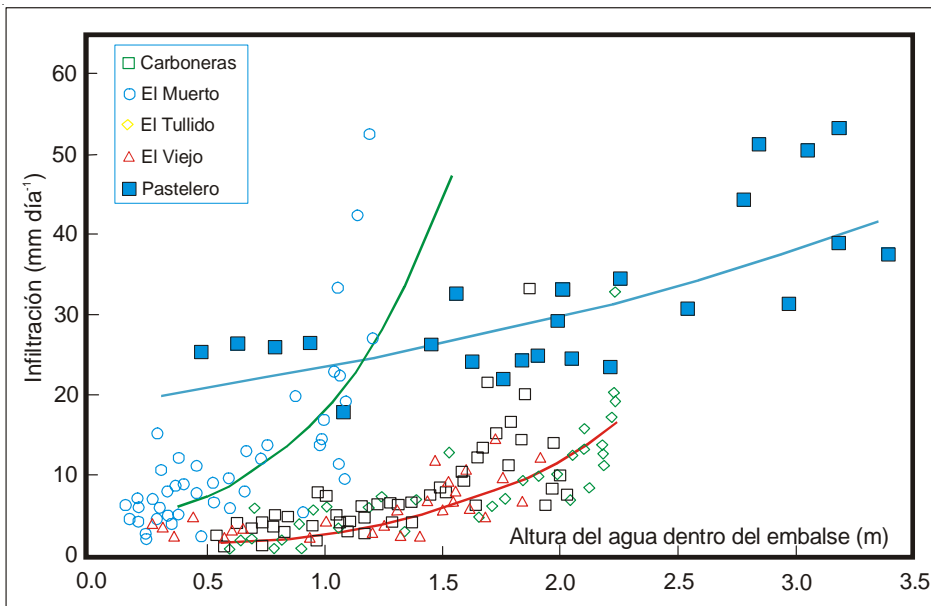


Figura 25. Comparación de la velocidad de infiltración de los bordos estudiados.

En esta figura se puede apreciar que las tasas de infiltración de los embalses Carboneras, El Viejo y El Tullido son muy similares. Éstas se incrementan a medida que se incrementa el nivel del agua debido, por una parte, al incremento de la superficie mojada sobre los bordos donde se presenta una mayor infiltración y, por otra parte, al incremento de la carga hidráulica sobre el fondo del embalse mismo. Aunque la

relación entre el nivel del agua y la infiltración presenta un comportamiento exponencial, no fue posible ajustar una función que considerara correctamente los valores extremos de la infiltración para cotas superiores a 2 m. Sin embargo, la siguiente relación permite predecir la infiltración dentro de los embalses entre las cotas de 0.5 y 2.0 m:

$$I = 1.27e^{(1.14H)} \quad 0.5 \leq H \leq 2.0m \quad 10$$

$$R^2 = 0.61$$

Donde: I representa la tasa de infiltración, expresada en mm día⁻¹, y H es el nivel del agua dentro del embalse, expresado en metros.

Para el caso del bordo El Muerto, la relación entre el nivel del agua y la infiltración, para las cotas comprendidas entre 0.2 y 1.6 m, es la siguiente:

$$I = 3.13e^{(1.76H)} \quad 0.2 \leq H \leq 1.16 \quad 11$$

$$R^2 = 0.65$$

Para el bordo Pastelero, contándose únicamente con los datos del primer año de observación, la relación es de la forma:

$$I = 18.6e^{(0.242H)} \quad 12$$

$$R^2 = 0.6$$

Las fuertes tasas de infiltración en este caso pueden explicarse por el hecho de que el embalse se encontraba recién construido. Por otra parte, a diferencia del resto de los bordos, el bordo de El Muerto se localiza sobre la parte alta de un glacis donde los suelos son generalmente de textura más gruesa (Viramontes *et al.*, 1999), lo que puede explicar el comportamiento más favorable a la infiltración. Finalmente, una mención particular para el caso del embalse de El

Viejo donde su comportamiento varía del primer al segundo año, de tal forma que la colmatación del mismo provoca un comportamiento análogo al de otros bordos tales como el de Carboneras y El Tullido.

ÍNDICES DE DESEMPEÑO DE LOS BORDOS DE RETENCIÓN

El balance del agua y los análisis realizados anteriormente indican la baja eficiencia de utilización del agua almacenada en los bordos de retención (1 a 2 %), una evaporación del orden del 40 por ciento y una infiltración comprendida entre el 58 y 59 por ciento. Sin embargo, es conveniente establecer otros indicadores que permitan valorar los bordos de retención desde otra perspectiva y dentro de una unidad de producción. Es por ello que a continuación se proponen ciertos indicadores que evalúan el desempeño y funcionamiento de las obras de retención.

Índices que caracterizan los bordos de retención

Como se mencionó anteriormente, durante el primer año de observación (ligeramente superior a la normal), dos de los siete bordos no recibieron escurrimientos significativos, mientras que tres de ellos presentaron importantes desbordamientos que alcanzaron hasta un 72 por ciento del total de los escurrimientos.

Desde de el punto de vista hidrológico, estas diferencias se establecen a partir de la capacidad de producción que tiene una cuenca para derivar escurrimientos y el lugar en donde estos pretenden almacenarse. En cierto modo, los volúmenes de agua almacenados y vertidos en los bordos expresan un equilibrio entre la ubicación de la obra (producción de escurrimientos en la cuenca) y las dimensiones de la misma (capacidad de almacenamiento de los escurrimientos producidos aguas arriba).

Se pueden utilizar dos índices en este sentido: uno de almacenamiento (IAL) y el otro de llenado (ILL).

$$IAL = (Vr - Vd) / Vr \quad 13$$

$$ILL = Vma / Cal \quad 14$$

Donde: Vr es el volumen de los escurrimientos superficiales, Vd el volumen de los escurrimientos vertidos, Vma volumen máximo almacenado en la obra, Cal es la capacidad de almacenamiento.

Existe en la literatura índices que evalúan las fallas de las obras en función a las dimensiones de la misma (Gould, 1961). Sin embargo, este tipo de criterios se establecen únicamente cuando el costo, tamaño e importancia de la obra lo justifican. Existen también otros indicadores que consideran el costo económico de los bordos sobredimensionados comparando con el volumen de tierra de la presa y su capacidad de almacenamiento. No obstante, en el caso de los bordos de retención para abrevadero, estos se construyen de manera económica y sin mucha mano de obra adicional, por lo que el costo de una obra sobredimensionada no resulta excesivo.

El primer criterio indica la importancia del desbordamiento durante el año. Entre mayor sea el desbordamiento, el índice se aleja del valor de uno y se aproxima al valor de cero. El segundo criterio denota la mayor o menor capacidad de la obra para almacenar los escurrimientos superficiales. El valor de uno del índice ILL corresponde a un nivel máximo anual próximo a la cota de desbordamiento. Entre más se aleje el valor máximo anual de la cota de desbordamiento, el valor de ILL se aproxima al valor cero.

Índices que valorizan los bordos de retención

Abreviar al ganado es la única finalidad programada de los bordos de retención en la zona de estudio, por lo que el volumen utilizado para este fin (V_u) es comparado tanto con los volúmenes almacenados como con las necesidades de agua por el ganado. Así, el primer índice que se define es un criterio de asignación (IA), que representa una simple relación entre los volúmenes utilizados y los volúmenes almacenados:

$$IA = V_u / V_a \qquad 15$$

Donde: V_u es el volumen utilizado y V_a es el volumen total almacenado.

Si bien es cierto que este índice expresa el desempeño de la obra para lo cual fue creada, éste no permite apreciar las fallas de suministro de agua del ganado que le fue asignado abastecer. De manera general, estas fallas se analizan en función de sus intensidades, de su duración y de sus frecuencias (análisis *IDF*). En este caso, se considera como falla de suministro a todo el período de tiempo durante el cual el bordo de retención no puede satisfacer las demandas de agua del ganado que le fue asignado satisfacer. Dado que el ganado requiere un suministro constante de agua a lo largo del año, una sola falla en este suministro supone otra fuente de abastecimiento. En el caso de la zona de estudio, el almacenamiento de los escurrimientos superficiales no logra satisfacer estas necesidades durante todo el año, por lo que es necesaria la extracción de agua subterránea para satisfacer al ganado. En este sentido, es importante precisar que el número de animales que abastece un bordo de retención puede incrementarse si se establece una red de distribución de agua a través de abrevaderos colocados aguas abajo de la obra. Esto permite aumentar el número de animales asignados por bordo de retención y no por unidad de superficie (potreros), como ocurre en la mayoría de los agostaderos del norte de México. De esta forma, resulta interesante establecer índices que evalúen la eficiencia de los bordos en cuanto a la satisfacción de agua para el ganado. Así, se establecen dos índices que definen por una parte la función asignada al bordo de retención en

relación al total de la unidad de producción (IN) y por otra parte, el servicio que éste realiza cuando se le asigna una determinada tarea de satisfacción (IS). De igual forma, se define un índice (DS) que relaciona la duración del agua en el bordo de retención con el período durante el cual debe satisfacer a un determinado número de animales.

$$IN = Vns / Vnt \quad 16$$

$$IS = Vab / Vns \quad 17$$

$$DS = Db / Dp \quad 18$$

Donde: Vns es el volumen de agua requerido para un determinado número de animales, Vnt es el volumen total requerido por el ganado en toda el área de explotación, Vab es el volumen de agua abastecido por el bordo de retención, Db es la duración del agua dentro del bordo de retención, Dp duración del período durante el cual se debe satisfacer al ganado.

Finalmente, si se considera la infiltración del agua en los bordos de retención como un componente de la recarga de los acuíferos en la zona, se propone un primer índice (II) que relaciona los volúmenes infiltrados con los almacenados. De igual forma, se propone un segundo índice que considere los volúmenes utilizados por el ganado (IR) como parte del desempeño del bordo de retención.

$$II = Vi / Va \quad 19$$

$$IR = (Vi + Vu) / Va \quad 20$$

Donde: Vi es el volumen infiltrado, Va es el volumen almacenado, Vu es el volumen utilizado.

Valores de los índices de caracterización y valoración

En el Cuadro 11 se aprecian los valores de todos los índices que caracterizan los siete bordos estudiados, la utilización de sus aguas

y su impacto sobre la recarga de los acuíferos. Los valores de estos índices corresponden al funcionamiento individual de los bordos de retención, considerando la utilización del agua directamente de sus embalses, sin estar interconectados a una red de distribución como se propone en párrafos anteriores.

En este cuadro se pueden constatar los importantes desbordamientos de los bordos Carboneras y El Tullido ($IAL \ll 1$ durante el primer año de observación) en tanto que los bordos de El Molino y Oso Negro presentan sobredimensiones ($ILL \ll 1$). Estos dos últimos bordos debido a la ausencia de escurrimientos, lo que indica la poca capacidad de su cuenca para su producción. La utilización del volumen almacenado (IA) se presenta considerablemente baja, siempre por debajo del 3.6 por ciento y la contribución de los siete bordos a la satisfacción de las necesidades de agua de la totalidad del ganado en la zona de estudio (IN) es de 10.7/1000 (correspondiente a la suma de los siete valores individuales). Finalmente, el índice de infiltración (II) muestra la importancia por esta variable dentro de la zona de estudio, alcanzando valores de hasta 86 por ciento en el bordo Pastelero.

Cuadro 11. Índices que caracterizan los bordos de retención y el uso del agua superficial almacenada.

Bordo	IAL	ILL	IA %		IN	IS		DS		II
	1° año	1° año	1° año	2° año	% _{oo}	1° año	2° año	1° y 2° año	1° año	2° año
El Muerto	1	0.7	2.6	2.8	1.5	44	13	48	72	30
Carboneras	0.3	1	0.8	3.6	1.5	80	50	59	66	48
Pastelero	1	0.8	0.3	0.6	0.8	68	9	23	86	83
El Viejo	0.8	1	1.1	2	2.3	77	57	67	69	51
El Molino	0	0	0	0	0.9	0	0	0	-	-
Oso Negro	0	0	0	0	2.2	0	0	0	-	-
El Tullido*	0.3	1	0.4	1.2	1.5	40	40	61	61	61
Total en los siete bordos					10.7					

*(1° y 2° año)

CONCLUSIÓN

El análisis del balance hídrico en los bordos de retención, permitió esclarecer los mecanismos que rigen su funcionamiento. Sin embargo, también provocaron ciertos cuestionamientos en cuanto a la utilidad. El agua almacenada en ellos es poco utilizada por el ganado (1.26 % en promedio durante los dos años de observación). Los embalses se desecan rápidamente impidiendo abreviar al ganado durante todo el año, lo que origina la necesidad de garantizar el suministro del agua mediante otros sistemas de abastecimiento.

Los bordos se desecan principalmente por evaporación e infiltración con una clara preponderancia de esta última. La gestión y mantenimiento de los embalses influyen las tasas de infiltración tanto en el fondo de los embalses como en sus bordes. Así, el fondo del bordo Pastelero, reconstruido en el período seco del primer año observado, inició la temporada de lluvias sin sedimentos y en contacto directo con el sustrato riolítico favorable para la infiltración. Por el contrario, en el bordo El Viejo, sin mantenimiento al menos durante los últimos ocho años, la presencia de sedimentos arcillosos de un espesor considerable limitó la infiltración. A pesar de esto, el bordo El Viejo presenta la misma tasa de desecamiento que el bordo Pastelero. En este caso, sin embargo, es la geometría del bordo El Viejo que condiciona la velocidad de decremento del nivel del agua. Así, la mayor superficie de exposición del espejo del agua y de la superficie de contacto con el suelo, favorece tanto la evaporación como la infiltración de tal forma que su tasa de decremento de los volúmenes almacenados es idéntica a la del bordo Pastelero.

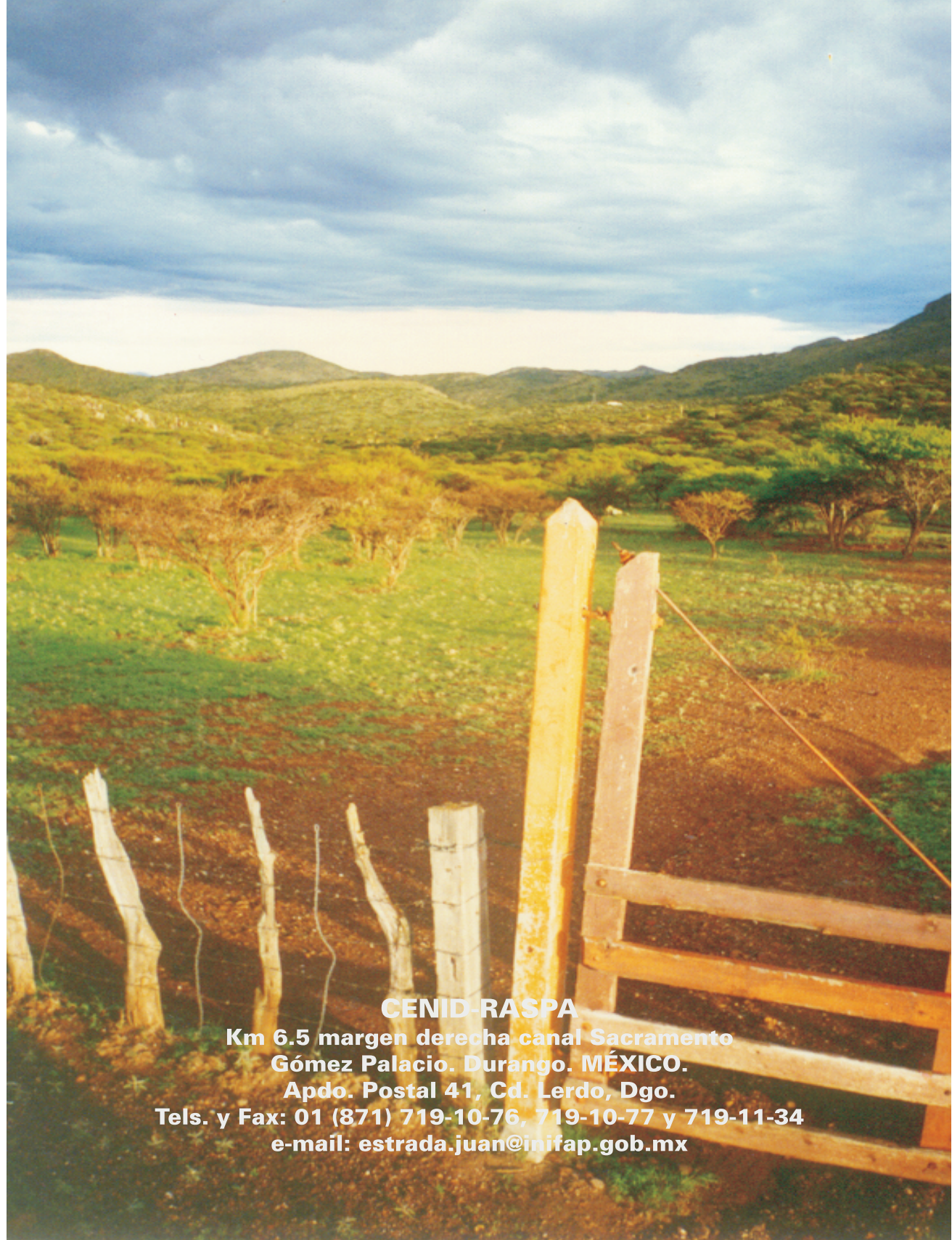
Por otra parte, se propuso un índice de forma de los bordos de retención que permite clasificarlos en relación a la forma geométrica que minimiza la superficie mojada y expuesta al aire y, maximiza el volumen almacenado. Esta forma geométrica corresponde a la de 1/4 de esfera. Sin embargo, la desventaja de este índice es que considera únicamente la forma del embalse. Por otra parte, las observaciones de infiltración efectuadas dentro de los embalses mostraron la importancia que tienen los sedimentos al colmatar el fondo que generalmente se presenta con altas tasas de infiltración (20 a 40 mm día⁻¹ para el bordo Pastelero). Así, la rehabilitación de los bordos puede ser la responsable de un desecamiento acelerado durante los primeros años de vida del bordo de retención.

BIBLIOGRAFIA

- Abramowitz, M., and I. Stegun, 1972, Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, New York.
- Albergel, J. (2000). Seminario de restitución CENID RASPA
- Albergel, J. et N. Rejeb. 1997. Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France (FRA), Vol. 83, No 2, p. 77-88; p. 101-104, bibl., tabl., graph.
- Anaya, E. y H. Barral 1995. La ganadería y su manejo en relación con los recursos agua y pastizal en la zona semiárida de México. Folleto Científico No. 5. INIFAP ORSTOM, Gómez Palacio Dgo. 78 p.
- Comisión Mundial de Represas 2000. Represas y desarrollo: un nuevo marco para la toma de decisiones. Informe de la comisión mundial de represas, noviembre 2000. 46p.
- Descroix, L., J. F. Nouvelot. y J. Estrada. 1997. Geografía de las lluvias en una cuenca del norte de México. Regionalización de las precipitaciones en la Región Hidrológica 36. INIFAP ORSTOM Gómez Palacio Dgo. 52 p.
- Estrada, J. 1999. Importance et Fonctionnement des petits Barrages dans une Semi-aride du Nord-Mexique. Thèse doctorat. Université de Montpellier II. 462 p.
- Estrada, J., C. Bouvier y L. Descroix. 1993. Régimen pluviométrico de la RH36. En: Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la Región Hidrológica 36. INIFAP CENID RASPA–ORSTOM. Gómez Palacio Dgo., p. 25-61.
- Estrada, J., I. Orona., G. González y M. Rivera. 2004. Los bordos de retención de agua en el norte de México: diversidad de

- condiciones y usos. Memorias de la XVI Semana Internacional de Agronomía. Gómez Palacio Dgo., septiembre 2004. 359-364 p.
- Gould, B. W. 1961. Statistical methods for estimating the desing capacity of dams. Journal of the Institution of Engineers, Australia, 33 (12), 405-16.
- J. Albergel, S. Nasri, and M. Boufaroua. 1999. Small dams' water balance: experimental conditions, data processing and modelling. IN: Berndtsson, R. (ed.) - Proceedings of the international seminar rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas. Lund University, Lund (SWE), 1999, No 3222, p. 45-58.
- Loyer, J. Y. et A. Plencasagne. 1996. Note sur le sédimentation dans les presones de Carboneras et El Tullido. ORSTOM-CENID RASPA INIFAP. Gómez Palacio, Dgo. 5 p.
- Martín Rosales, W. 1997. Efectos de los diques de retención en el borde meridional de la sierra Dador (Almería) Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 266 p.
- Nouvelot, J. F. et L. Descroix. 1996. Aridité et secheresses du Nord-Mexique. En TRACE México : 9-25, diciembre 1996.
- Nouvelot, J. F. 1993. Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. ORSTOM-CIEH, 539 p.
- ORSTOM, 1985. HYDROM. Logiciel de banque de données hydrométriques. Laboratoire d'hydrologie, Montpellier France.
- Peugeot, C. 1995. Influence de l'encroûtement superficiel du sol sur le fonctionnement hydrologique d'un versant sahélien (Niger). Expérimentations *in-situ* et modélisation. Thèse de Doctorat, Uni. Joseph Fourier, Grenoble 1 : 356 p.
- Ruf, Terry. 1992. Aménagements Hydroagricoles anciens. CIRAD, Montpellier (FRA), 1992, p. 7-13, bibl., III.-Systèmes Irrigués: Rencontres, 02 septembre 1992, Montpellier, FRA.

- Velasco M., H. 2000. Derivación y distribución de torrentes, México 2. En: Manual de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia, Experiencias en América Latina. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago de Chile (2000). 231 p.
- Viramontes, D., J. Y. Loyer y A: Plenecassagne. 1999. Cuencas experimentales en la zona semiárida de la Región Hidrológica 36: estudio de los suelos. INIFAP CENID RASPA ORSTOM. Gómez Palacio Dgo. 49 p.



CENID-RASPA

Km 6.5 margen derecha canal Sacramento

Gómez Palacio. Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41, Cd. Lerdo, Dgo.

Tels. y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: estrada.juan@inifap.gob.mx