



**Instituto Mexicano de Tecnología del Agua**

**Programa de Posgrado**

## **Tesis**

**ANÁLISIS DE LAS VARIABLES RELACIONADAS AL FUNCIONAMIENTO  
DEL VASO FRANCISCO ZARCO (LAS TÓRTOLAS) Y PROPUESTA  
DE ALTERNATIVAS PARA MEJORAR SU OPERACIÓN**

que para obtener el grado de  
**Maestría en Ciencias del Agua**  
**(Hidrometeorología y Meteorología Operativa)**

presenta  
**José Luis Ernesto Montoya Murillo**

Tutor: **Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa**



**Instituto Mexicano de Tecnología del Agua**

**Programa de Posgrado**

## **Tesis**

**ANÁLISIS DE LAS VARIABLES RELACIONADAS AL FUNCIONAMIENTO  
DEL VASO FRANCISCO ZARCO (LAS TÓRTOLAS) Y PROPUESTA  
DE ALTERNATIVAS PARA MEJORAR SU OPERACIÓN**

que para obtener el grado de  
**Maestría en Ciencias del Agua**  
(Hidrometeorología y Meteorología Operativa)

presenta  
**José Luis Ernesto Montoya Murillo**


Tutor: Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada "ANÁLISIS DE LAS VARIABLES RELACIONADAS AL FUNCIONAMIENTO DEL VASO FRANCISCO ZARCO (LAS TÓRTOLAS) Y PROPUESTA DE ALTERNATIVAS PARA MEJORAR SU OPERACIÓN", otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

**JOSÉ LUIS ERNESTO MONTOYA MURILLO**

JIUTEPEC, MORELOS, A 21 DE ENERO DE 2011

Lugar y fecha

  
Firma



El presente trabajo, lo dedico con todo mi amor a mi esposa Lupita y mis hijos Iván y Valeria, de quienes siempre sentí su apoyo al mostrarse pacientes, solidarios y respetuosos con mi persona, con mi trabajo y mis estudios durante el tiempo que duró mi formación dentro del posgrado.

A mis padres Dolores y José, que de siempre han motivado en mí el deseo de superación.



El imposible no existe.  
Donde hay una voluntad,  
hay un camino.

Agradezco a Dios por darme luz en mi camino, claridad en mis pensamientos y la fortaleza necesaria en mi vida.

Con gran respecto manifiesto mi gratitud al Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa, al M.I. Ernesto Aguilar Garduño y al M.I. Jose Alfredo González Verdugo por creer en mí y por todo el apoyo que me brindaron en la realización de este trabajo.

Así mismo, agradezco al M.I. Edmundo Pedroza González por sus oportunos comentarios y buenos consejos que sirvieron para que no dejara de lado este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros que siempre me dieron una palabra muy oportuna de aliento, la cual siempre fue como una sonrisa en mi momentos de desolación y fuerza suficiente para mantenerme día a día en la consecución de mi objetivo, GRACIAS A TODOS.



**Indice:**

<u>Tema</u>	<u>Hoja</u>
I.- Antecedentes	6
II.- Justificación	31
III.- Objetivos	33
IV.- Hipótesis	34
V.- Metodología	35
VI.- Revisión de los datos y de la metodología propuesta	54
VII.- Resultados	94
VIII.- Conclusiones	103
IX.- Glosario de Términos	105
X.- Bibliografía	109
XI.- Anexo	113

## I.- Antecedentes:

El norte de la República Mexicana se caracteriza por una baja precipitación y un alto índice en el aprovechamiento del agua superficial, generando una presión actual mayor de 45% sobre la disponibilidad natural (Estadísticas del Agua, 2008), principalmente en riego agrícola; en este sentido y dada la gran variabilidad en su distribución espacial y temporal, se construyeron importantes presas de almacenamiento que facilitan el control y la planeación y distribución del agua.

La Comarca Lagunera, es una región donde el uso del agua superficial es extensiva, en ella se encuentra inmerso el Distrito de Riego 017 y se ubica en la parte central de la porción Norte de la República Mexicana, entre los meridianos 102° 22' 00" y 104° 47' 00" de Longitud Oeste y los paralelos 24° 22' 00" y 26° 23' 00" Latitud Norte. La altura sobre el nivel del mar es de 1,139 m. Cuenta con una extensión montañosa y una superficie plana, donde se localizan las áreas agrícolas, así como las áreas urbanas. En el sector hidráulico, administrativamente forma parte de la Región VII Cuencas Centrales del Norte de la Comisión Nacional del Agua y de la Región Hidrológica No. 36 Nazas Aguanaval (Fig. 1), misma que comprende las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval, constituye una amplia zona endorreica enclavada en la mesa del norte de la República Mexicana, entre los paralelos 22° 39' y 26° 36' de latitud norte y los meridianos 101° 26' y 106° 21' de longitud oeste, abarca una porción de los estados de Durango, Zacatecas y Coahuila. (Ver figura 2).

Al norte, la Región Hidrológica No. 36 está limitada por la Región Hidrológica No. 35 "Mapimí" y la Región Hidrológica No. 24 "Río Bravo" (Cuenca Río Conchos), por medio de un parteaguas formado por La Sierra del Oso, con elevaciones de hasta 2,250 m.s.n.m., así como por medio de un conjunto orográfico complicado formado por las cuchillas de La Zarca (2,127 m.s.n.m) y la Sierra de La Campana (1,705 m.s.n.m.), en el estado de Durango y por las sierras de Tlahualillo (1,863 m.s.n.m.), Las Delicias (1,652 m.s.n.m.), La Candelaria (1,673 m.s.n.m.) y Los Alamitos (1,758 m.s.n.m.), en el estado de Coahuila.

Al oriente colinda con la Región Hidrológica No. 24 "Río Bravo" (Cuenca del Río San Juan), a través de las sierras de La Paila (2,360 m.s.n.m.), Las Palmas (2,505 m.s.n.m.) y La Guitarra (2,662 m.s.n.m.), localizadas en el estado de Coahuila, además con La Región Hidrológica No. 37 "El Salado", cuyos límites son las cumbres de Las Sierras de Zuloaga (2,250 m.s.n.m.), Santa Rita (2,460 m.s.n.m.), El Mimbres (2,140 m.s.n.m.) y Del Zapato (2,500 m.s.n.m.) situadas

en el estado de Zacatecas y las sierras de La Punta (1,650 m.s.n.m.), Santa Cristina (2,038 m.s.n.m.) y Guadalupe (2,553 m.s.n.m.) en el estado de Durango.

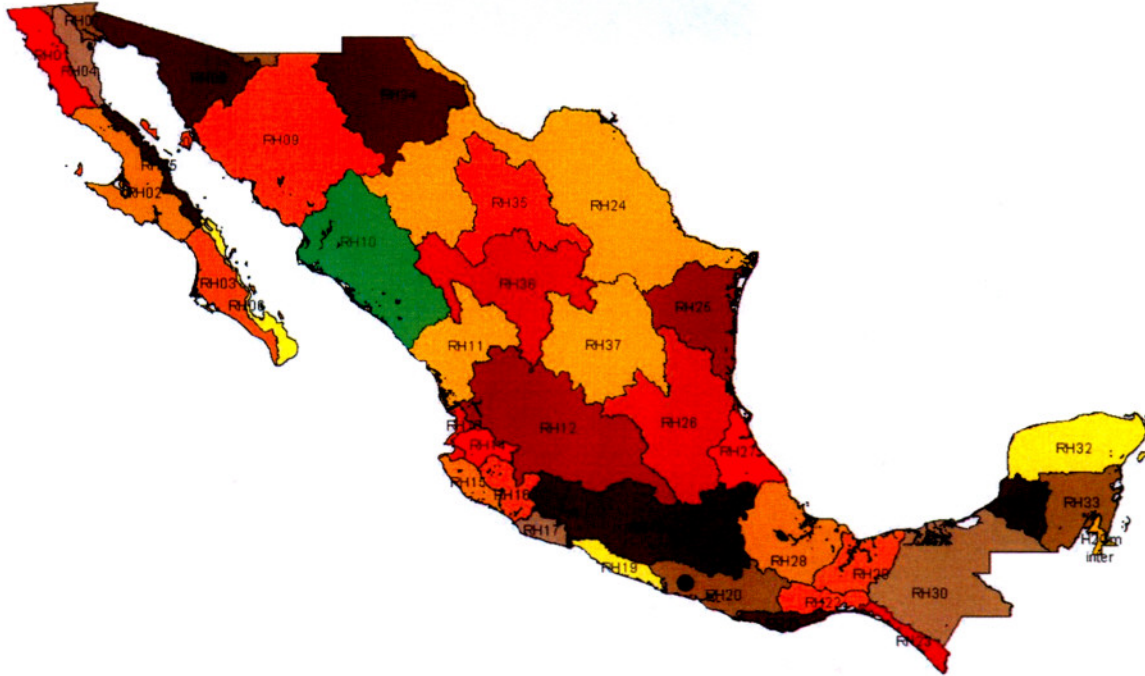


Figura 1.- Regiones Hidrológicas de la República Mexicana

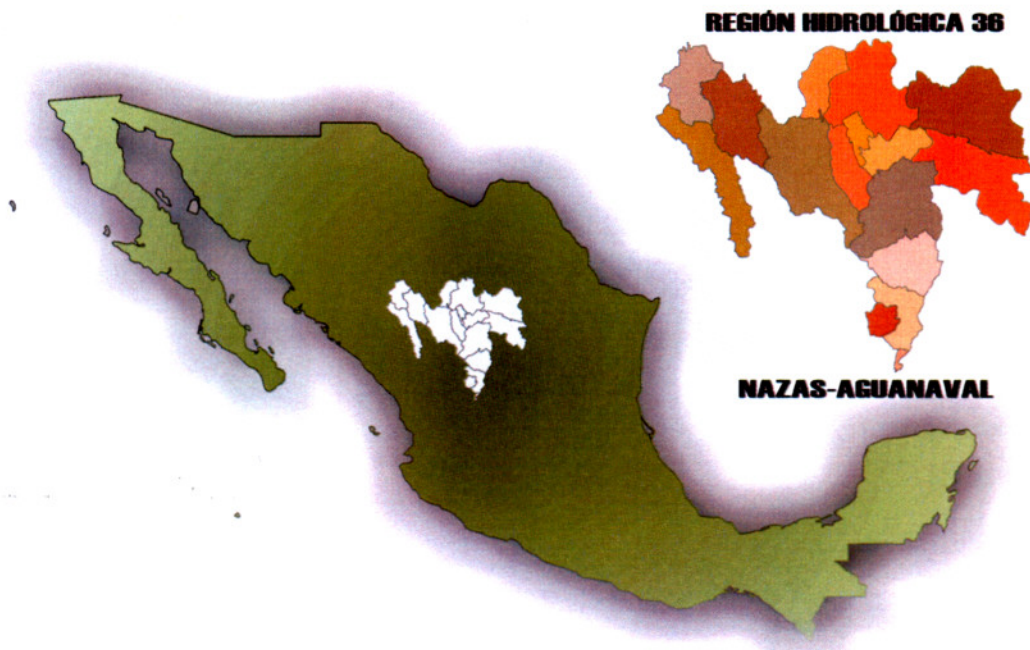


Figura 2.- Región Hidrológica 36



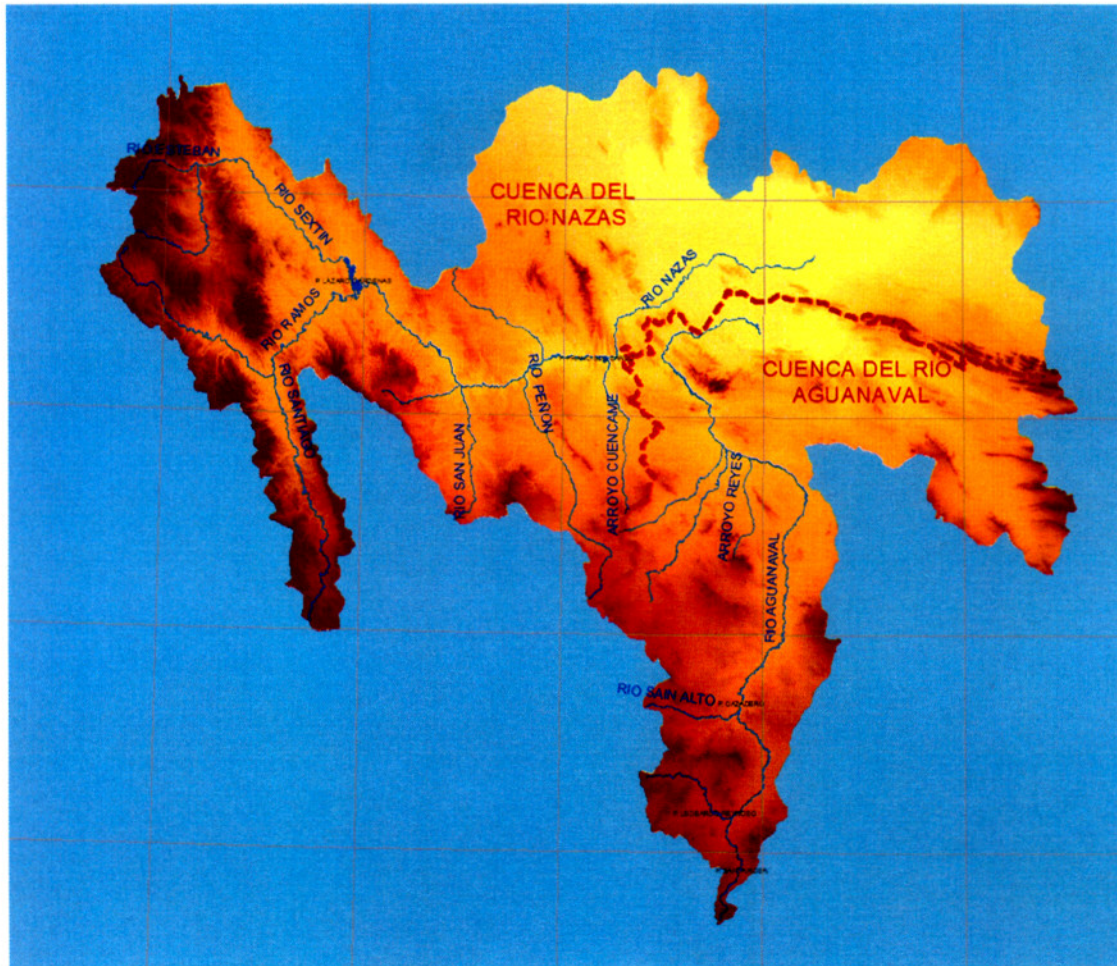
Al sur tiene como división el parteaguas de la Sierra Madre Occidental, que la limita con la Región Hidrológica No. 12 "Lerma-Chapala-Santiago" (Cuenca Río Lerma), y al poniente con la Región Hidrológica No. 11 "Presidio-San Pedro" (Cuenca de los ríos Presidio y San Pedro) y la Región Hidrológica No. 10 "Sinaloa" (Cuencas de los ríos Piaxtla, San Lorenzo y Humaya).

Topográficamente, la Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval" tiene un límite orográfico bien definido hacia su parteaguas occidental, que en general está constituido por la Sierra Madre Occidental y sus estribaciones; esto mismo ocurre, aunque en una escala menor, hacia el límite sur de la región.

Los Ríos Nazas y Aguanaval, al llegar a su desembocadura en las lagunas de Mayrán y de Viesca respectivamente, situadas hacia la porción noreste de la región, las han sometido a un proceso de relleno y de desecación, que se ha acelerado por los aprovechamientos realizados en una y otra corriente. Este hecho concuerda con la circunstancia de que las aportaciones que reciben esas lagunas de la parte de sus cuencas propias situadas hacia el oriente de ellas son mínimas.

La mayoría de las zonas planas (menor de 10%), se encuentran ubicadas al noreste de la cuenca y en menor grado al sureste de la misma. Las mayores pendientes, (mayores de 30% se localizan mayoritariamente al oeste de la región (Sierra Madre Occidental) y en menor grado en la parte central. (Figura 3).

Durante 1991 el Centro Nacional de Investigaciones Disciplinarias en relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA), del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), y El Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo por Cooperación (ORSTOM), iniciaron el proyecto "Manejo y Uso del Agua en las Cuencas Hidrográficas del Norte de México", tomando como prototipo a la Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval" y en el aspecto geológico esta es la descripción que hace Jean Yves Loyer: "La Región Hidrológica 36 se localiza en el altiplano central al Norte de México, el cual está limitado por la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental, es una zona endorreica (sus escurrimientos no tienen salida hacia el mar).



**Figura 3.- Topografía de la Región Hidrológica No. 36 "Nazas-Aguanaval"**

La Sierra Madre surgió en el terciario y constituye un apilamiento de rocas volcánicas que pueden alcanzar hasta los 3,000 m de espesor. Este surgimiento plegó los terrenos sedimentarios secundarios (esencialmente Jurásicos y cretácicos); alzó el conjunto de los terrenos volcánicos y de los sedimentarios pre-existentes, así como el zócalo de granito. De esta manera, la toba ácida e intermedia terciaria empujó y cubrió estos terrenos, ocupando más de la tercera parte de la superficie de la Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval", es decir la porción alta de la cuenca del Río Nazas, así como parte de su cuenca media y de la del Aguanaval. (Figura 4).

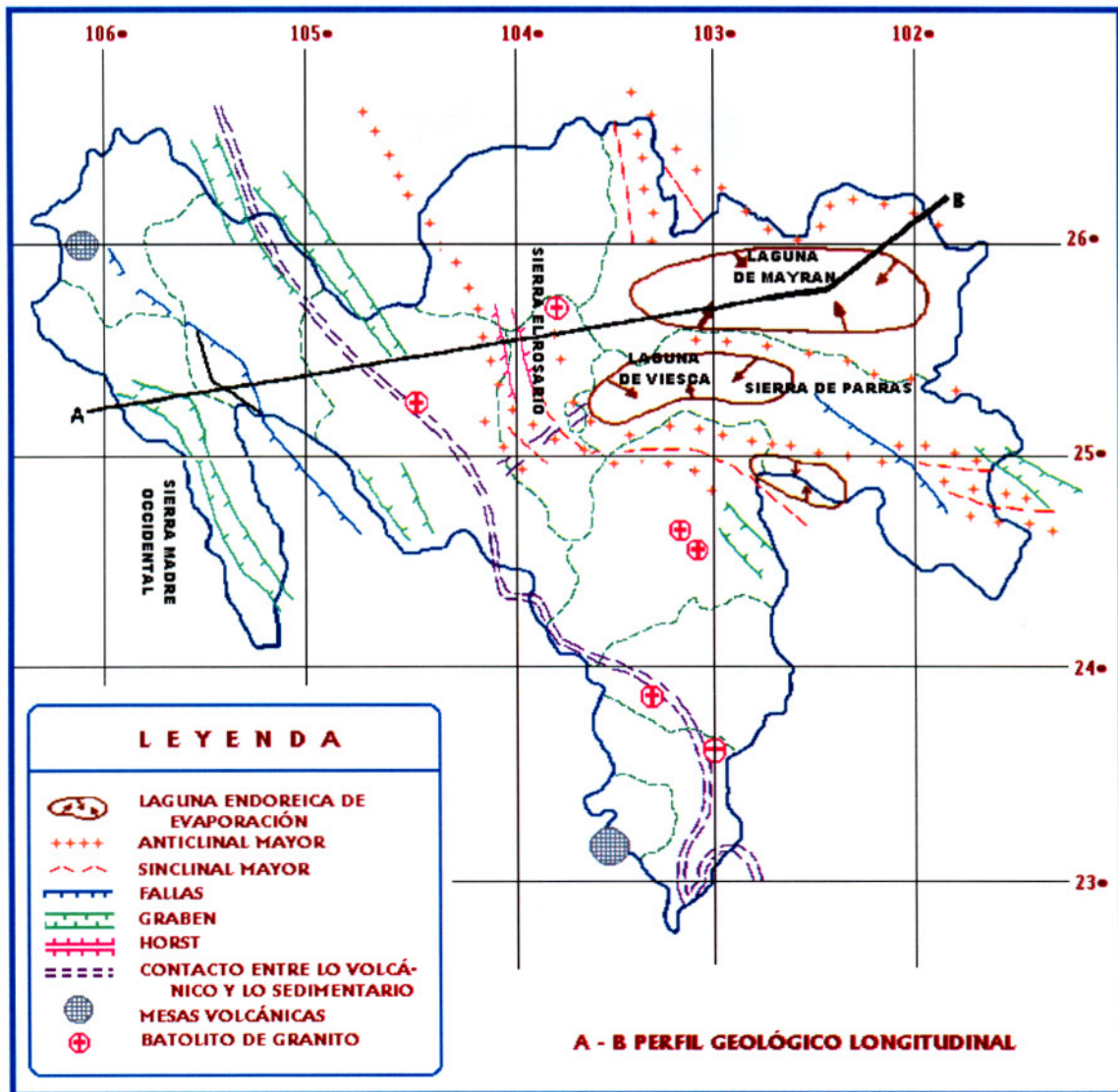
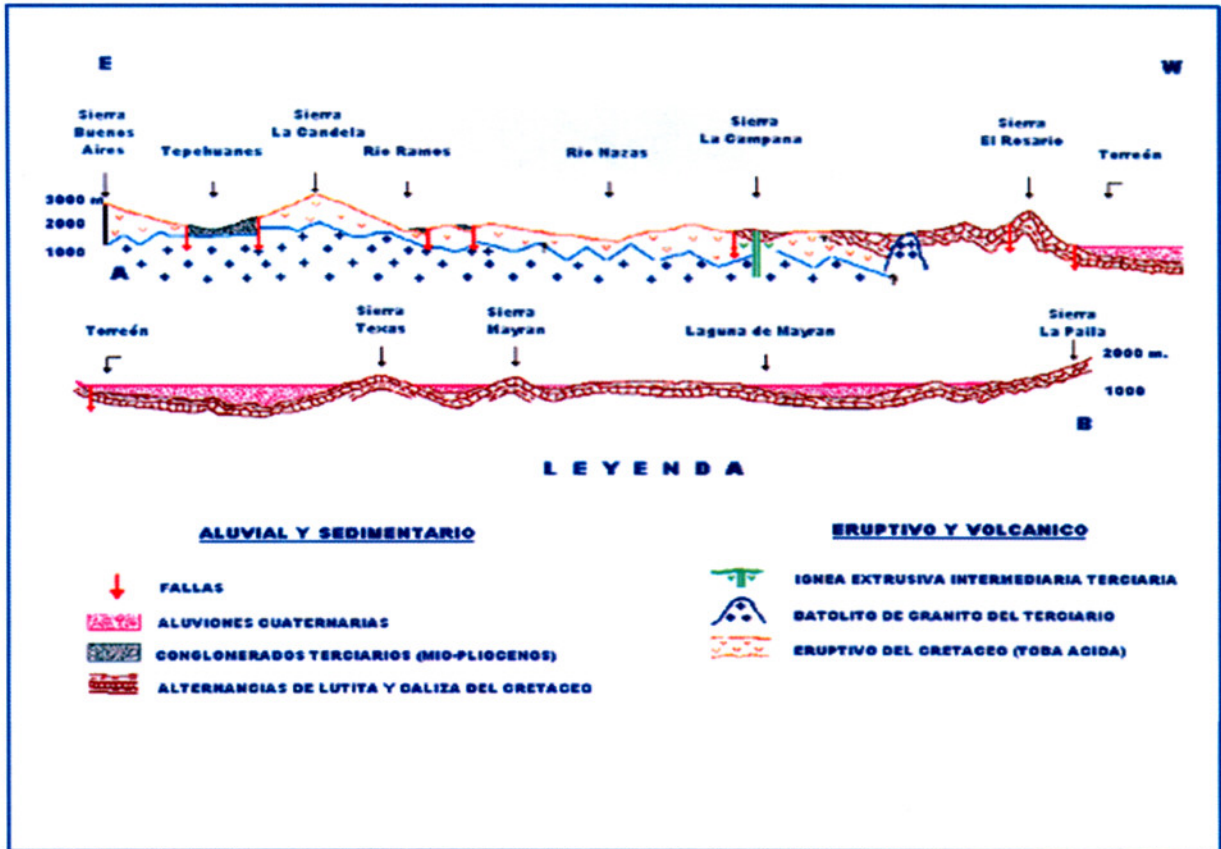


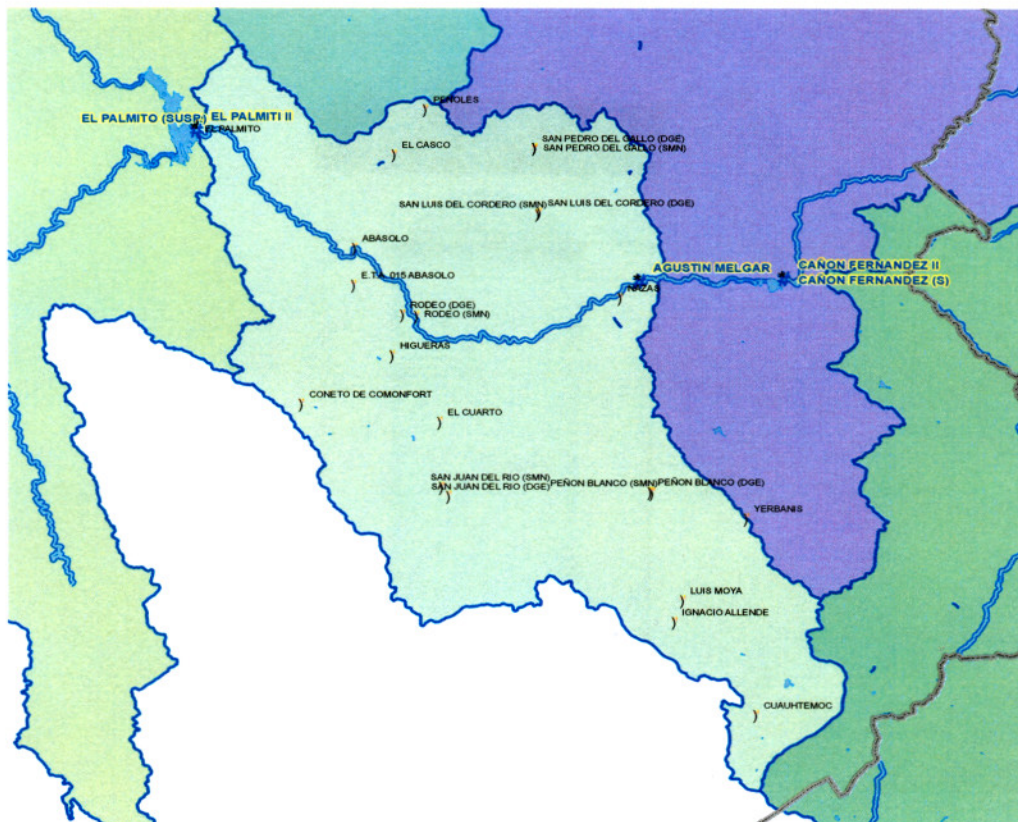
Figura 4.- Perfil geológico longitudinal de la Región Hidrológica No. 36

El relieve quedó en su mayoría ordenado en función de este alzamiento y de los plegamientos consecuentes; sus elementos tienen una orientación predominante del NNO al SEE: parteaguas con el pacífico, cadenas de la Sierra Madre, elementos tectónicos (fallas), contacto entre rocas volcánicas y sedimentarias, pliegues de los terrenos sedimentarios. Sólo en la parte baja (Lagunas) se nota una dirección Oeste-Este de los elementos del relieve (Ver figura 5).



**Figura 5.- Perfil Este-Oeste del relieve en la Región Hidrológica No. 36**

El clima de la Región Hidrológica 36 “Nazas-Aguanaval”, según la clasificación de Köppen, es muy variado debido a la orografía irregular de la zona. Hay climas (BSkw), en las cuencas de los ríos Santiago, Tepehuanes, de Ramos, Sextín o del Oro y aguas abajo de la confluencia de estos dos últimos, o sea en la parte alta del río Nazas; y en la cuenca alta del río Aguanaval, en los ríos Chico, de los Lazos y Trujillo. En la parte baja, desde la formación del río Nazas, dentro de la cuenca del mismo, hasta su desembocadura en la Laguna de Mayrán, el clima es “caliente desértico” (BW<sub>hw</sub>). En la parte media del río Aguanaval, desde la estación hidrométrica Cazadero hasta su desembocadura en la planicie de la laguna de Viesca, el clima es “caliente desértico” (BW<sub>hw</sub>).

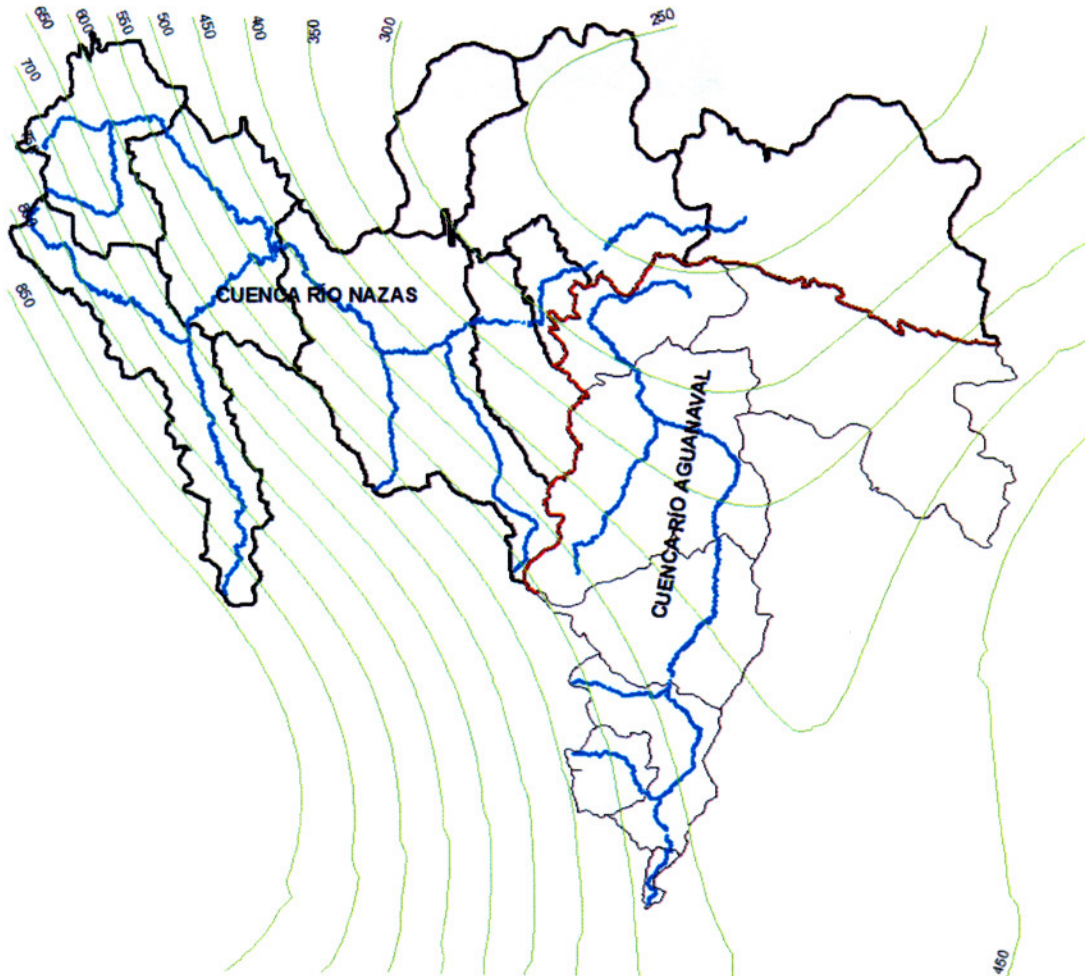


**Figura 6.- Estaciones climatológicas con influencia en la Región Hidrológica No. 36**

El registro de las variables climáticas se hace mediante las estaciones climáticas ubicadas a lo largo y ancho de la cuenca, de las cuales, 38 son las más representativas pues cuentan con los registros más completos. (Ver figura 6 “Estaciones climatológicas con influencia en la Región hidrológica 36”).

Respecto a los registros de temperatura, se observa un comportamiento térmico extremo, con temperaturas inferiores a 0 °C en invierno y con temperaturas máximas superiores a los 30 °C en el verano. Las temperaturas más bajas de la región se registran en la parte oeste de la Región Hidrológica 36 “Nazas-Aguanaval” y las más altas, al noreste de la misma (Ver figuras 7 “Isotermas en la Región Hidrológica 36 Nazas-Aguanaval”)





**Figura 8.-Isoyetas en la Región Hidrológica No. 36 "Nazas-Aguanaval"**

La región hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval" está integrada por las cuencas cerradas de la Laguna de Viesca con su afluente principal el río Aguanaval, y la de Mayrán con su afluente principal el río Nazas, así como una fracción del Bolsón de Mapimí.

Río	Longitud (Km)	Área (km <sup>2</sup> )
Río Tepehuanes	161.68	3,138.40
Río Santiago	331.58	6,518.99
Río Ramos	100.30	3,307.02
Río Sextín	238.56	8,122.08
Río Nazas	279.51	10,916.06
Arroyo Vizcaino	53.17	411.85
Río San Juan	85.03	2,380.68
Río Peñón	153.63	3,496.80
Río Cuencamé	92.06	2,140.93
Río Chico	77.04	709.27
Río de los Lazos	71.34	1,532.11
Río Trujillo	108.35	1,712.41
Río Saín Alto	64.64	1,047.39
Río Aguanaval	415.38	13,772.59
Arroyo Reyes	62.25	623.28
Arroyo Mazamitote	85.40	981.69

**Tabla 1.- Ríos principales de la Región Hidrológica No. 36 "Nzas-Aguanaval"**

Suelos: Estudios realizados por INIFAP (CENID-RASPA)-ORSTOM, indican que en la Región Hidrológica 36 "Nzas-Aguanaval" de acuerdo a la clasificación propuesta por la FAO/UNESCO (1970); modificada por la Dirección General de Geografía del INEGI, se presentan 13 unidades principales de suelo, de las cuales el Litosol ocupa la mayor proporción, (35.6%), le siguen en orden descendente los Xerosoles y Feozem (20.3% y 13.2% respectivamente), que juntos constituyen un 69.1% de su superficie. Las unidades del suelo Regosol, Castañozon, Rendzina, Yermosol, Solonchak y Cambisol, equivalen a menos del 10%; Fluvisol, Chernozem, Vertisol y Solonetz representan porcentajes menores del 1% en las áreas de escurrimientos ordenados (parte alta) predominan los Litosoles, que ocupan un 32.8% de superficie, le siguen en orden decreciente los Feozems con 21.8%, los Xerosoles con 12.1% y Castañozems, con un 10.1%, en conjunto representan un 66.7% de la superficie.

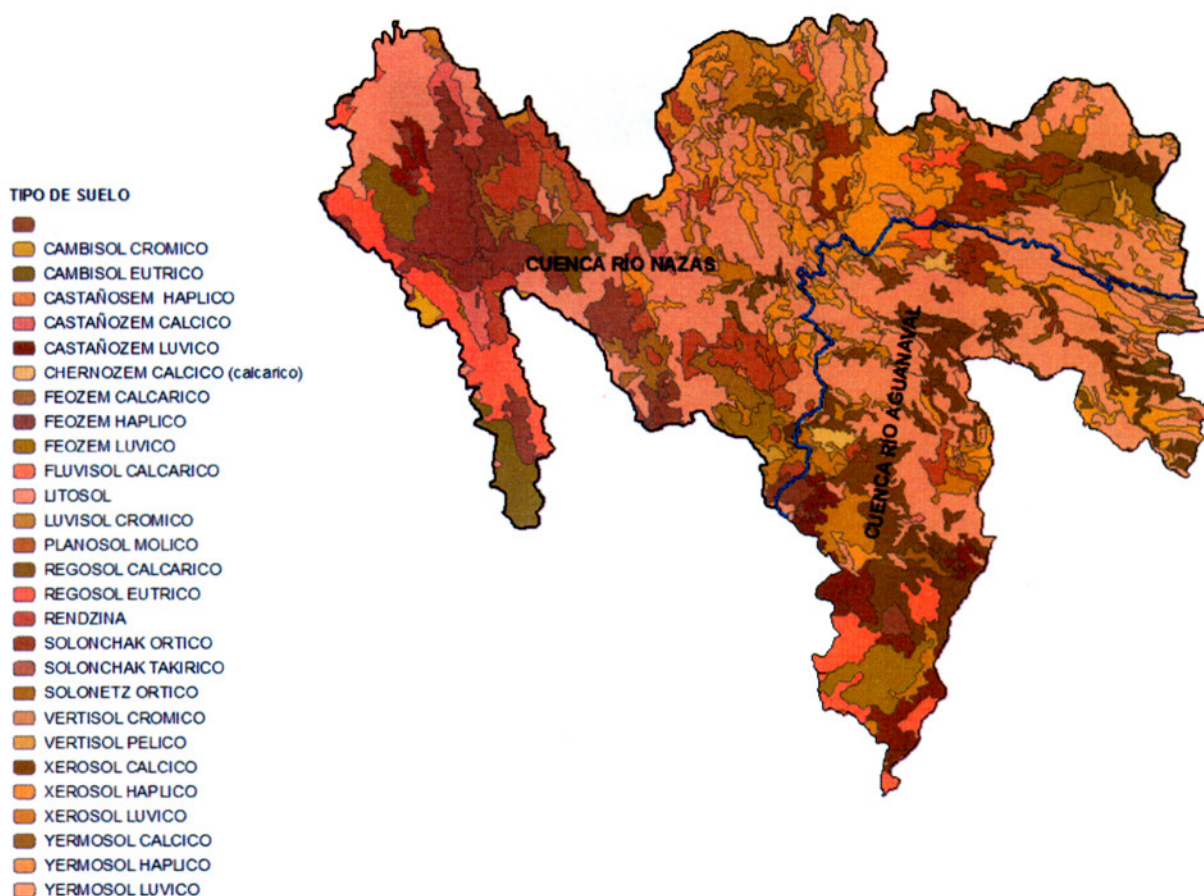




**Figura 9.- Red hidrológica en la Región Hidrológica No. 36 "Nazas-Aguanaval"**

Las unidades del suelo Regosol, Rendzina y Cambisol ocupan proporciones menores del 10%, los Fluvisoles, Vertisoles, Solonchaks y Yermosoles, menos del 1.0%.

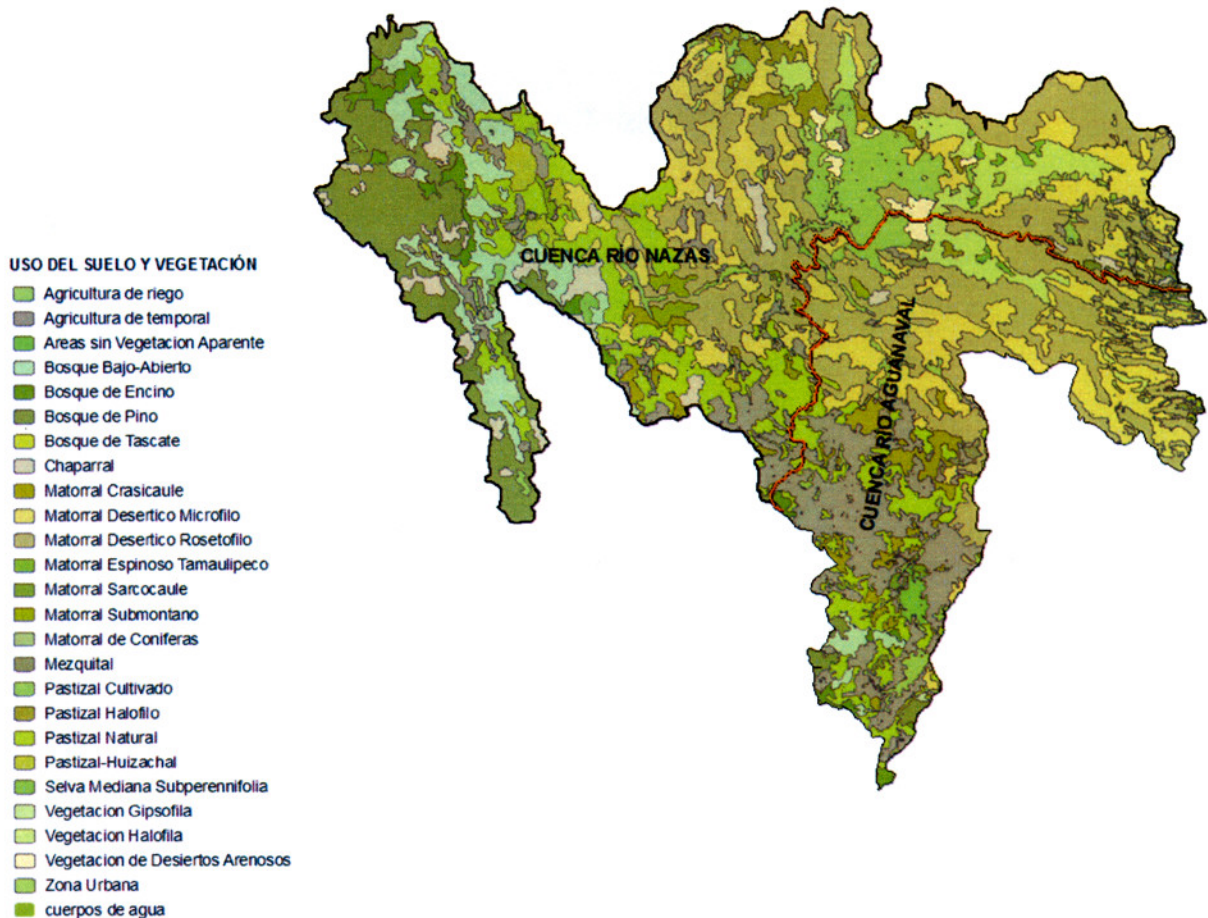
En las áreas de escurrimiento no ordenado de la parte baja no se presentan los suelos Fozzems, Cambisoles y Solonetz, pero en forma similar a la parte alta, también predominan los Litosoles (39.9%), le sigue en forma descendente los Xerosoles y Yermosoles (32.9 y 11.4%, respectivamente) que en conjunto representan un 84.2% de esta zona.



**Figura 10.- Unidades de suelo en la Región Hidrológica No. 36 "Nazas-Aguanaval"**

Los suelos Solonchaks, Regosoles y Rendzinas se presentan en proporciones menores del 9 %; los Fluvisoles, Vertisoles, Chernozems y Castañozems, menores del 1% (Figura 10).

En la cuenca del Nazas, que es 1.8 veces más extensa que la del Aguanaval, se presentan diez unidades de suelo de las cuales, los Litosoles, Feozems, Rendzinas y Regosoles son los que dominan con porcentajes del 33.2, 25.2, 13.1 y 11.1, respectivamente, que en conjunto suman un 82.6% de la cuenca. Los Xerosoles, Cambisoles y Castañozems ocupan proporciones menores del 9% que suman en conjunto un 16.6% de su superficie; los Vertisoles, Yermosoles y Fluvisoles suman un 0.8%.



**Figura 11.- Uso del suelo y vegetación en la Región Hidrológica No. 36 “Nazas-Aguanaval”**

En forma similar, en la cuenca del Aguanaval predominan los Litosoles (32.1%); le siguen en orden decreciente los Castañozems, Xerosoles y Feozems con 20.8, 19.3 y 15.7% respectivamente. Los Regosoles, Rendzinas, Chernozems, Solonetz, Fluvisoles y Solonchaks en conjunto representan únicamente un 12.1% de su superficie.

Vegetación: De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEGI) para la Región Hidrológica 36 “Nazas-Aguanaval” se identificaron diversos usos del suelo y vegetación (Figura 11).

La ocupación del suelo por la vegetación natural en toda la Región Hidrológica 36 “Nazas-Aguanaval” es de alrededor de 7.25 millones de ha, el resto son áreas dedicadas a las

actividades agrícolas (aproximadamente 19.37 millones de ha); hay también, en menor grado, la superficie sin vegetación aparente (0.0021 millones de ha).

El Bosque de encino y pino comprende un 13.14% de la superficie de la Región Hidrológica. Esta comunidad, además de constituir el principal recurso forestal, presenta el recubrimiento aéreo más importante en cuanto a densidad y permanencia. Las estimaciones de cubierta son muy variables, con un rango que varía de 10 a 80%, pues el crecimiento y densidad de esta vegetación están fuertemente influidos por varios factores como son la pluviosidad, la exposición, la pendiente y la profundidad del suelo, entre otros.

Las especies que definen esta gran formación están comprendidas dentro de las comunidades de coníferas aciculifoliadas, con los géneros *Pinus*, *Abies* y *Pseudotsuga*, coníferas escuamitoliadas, como son los géneros *Luniperus* y *Cupressus*; latifoliadas, de los géneros, *Arbutus*, *Quercus* y *Arctostaphylos*, principalmente.

El Chaparral se distribuye escasamente en un 2.13% de la superficie de la Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval". Usualmente constituye un tipo de vegetación secundaria del bosque latifoliado, con el que tiene afinidades climáticas y florísticas, sin embargo es de poco interés forestal por su hábito de crecimiento y su bajo tamaño. En la zona árida tiene mucha menor distribución, donde se encuentra como el límite latitudinal del matorral, sobre la cima de sierras altas. El dosel del chaparral comúnmente se presenta abierto, con individuos espaciados entre sí, pero llega a tener un estrato herbáceo bien definido, no obstante el fuerte recubrimiento de piedras y los afloramientos de roca.

Los grados de recubrimiento más comunes son moderados, de 20 a 40 %, sobre pendientes suaves a fuertes; esto es, en cimas, laderas y valles de zonas entre lomas. En ocasiones se observan cubiertas de sólo un 10 %, sobre todo en laderas. Sus alturas no sobrepasan los cuatro metros.

El Matorral xerófilo es la formación más extensa dentro de la Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval", con un 41.26% de la superficie. Esta asociación de elementos de variada fisonomía está gobernada por las características continentales del clima, que se reflejan en el tamaño, cobertura, densidad y distribución de las plantas. Dada la amplia distribución de este tipo vegetativo, los cálculos de recubrimiento tienen una gran variabilidad, desde las cubiertas escasas hasta las de mayores densidades.

Dentro del matorral xerófilo están incluidos los matorrales desértico rosetófilo, crasicaule y desértico micrófilo, los cuales tienen requerimientos particulares en cuanto al desarrollo del sustrato, la pendiente y el drenaje, entre otros factores físicos.

El matorral rosetófilo se caracteriza por sus hojas dispuestas en roseta. Participa con un 53% del matorral xerófilo. Las especies más típicas son *Agave lechuguilla*, *Agave asperrima*, *Yucca filifera*, *Yucca carnerosana* y *Dasyliropsis* spp.

El matorral micrófilo, con elementos inermes y espinosos, alcanza la mayor superficie dentro del matorral xerófilo de la Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval" con un 58%. Aquí están comprendidas una gran cantidad de especies, de hábitos muy variados, como son *Larrea tridentata*, *Flourensiacernua*, *Parthenium incanum*, *P. Argentatum*, *Acacia* spp., *Prosopis glandulosa*, *Mimosa* spp., *Fouquieria splendens*, y las halófitas *Suaeda* spp., *Sesuvium portulacastrum* y *Atriplex* spp., entre otras.

El Pastizal. En la Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval", el pastizal representa el 16.2% de la superficie con vegetación natural. Sus cubiertas alcanzan densidades moderadas y tienen la característica de ocupar pendientes muy variables, desde las más bajas (1 a 9 %), hasta las más altas (más de 30 %), así como distintos ambientes ecológicos. Los elementos que caracterizan el pastizal generalmente son de poca altura, la que no sobrepasa los 100 cm; sus valores de recubrimiento más frecuentes varían de 50 a 70 %.

Algunas de las gramíneas que dan origen a esta formación son: *Bouteloua gracilis*, *B. Curtipendula*, *B. Hirsuta*, *Muhlenbergia rígida*, *M. Dubia*, *M. Pulcherrima*, *Tridens pulchellus* - *phleoides*, *Aristida* spp., *Andropogon* spp. y otras.

Muchas áreas de pastizal se encuentran en una marcada etapa de desertificación, que se evidencia en el reemplazo de los pastos perennes por arbustivas espinosas, a causa del intenso sobrepastoreo y la apertura de tierras al temporal (principalmente en la cuenca Aguanaval). Esta actividad deja grandes áreas de suelo descubiertas durante una larga estación del año, sometidas al impacto de las lluvias. Los cambios se acompañan de erosión, que se evidencia en distintos grados. El problema tiende a crecer con el desarrollo de las ciudades y la ampliación de la agricultura mecanizada.)

Geohidrología: Debido a que en la región predomina un clima semidesértico, sus recursos hidráulicos subterráneos son escasos por la insuficiente precipitación pluvial lo que aunado a las condiciones geológicas no favorece al escurrimiento y almacenamiento del recurso.

En la porción centro y sur del estado de Zacatecas la situación hidrológica es menos crítica debido a que es la que presenta mejores posibilidades acuíferas, ahí se localizan los valles de gran producción Fresnillo, Calera y Chupaderos.

La Región Hidrológica 36 "Nazas – Aguanaval", comprende una gran porción del norte del estado de Zacatecas y parte de los Estados de Coahuila y Durango. Se caracteriza por su clima desértico y es la más crítica en cuanto a disponibilidad de agua. La escasa renovación del recurso, baja transmisibilidad, una pobre capacidad de almacenamiento y con frecuencia agua de mala calidad, son características del subsuelo de esta región debido a que la precipitación es apenas de 300 a 400mm anuales.

Los valles aluviales presentan características geohidroológicas favorables para la explotación de las aguas subterráneas. Sin embargo, de acuerdo con estudios geoquímicos realizados en el área, solo algunos de ellos, como el de Cedros, tienen agua de calidad aceptable para usos domésticos y riego; en otros, como Avalos y Gruñidora, la concentración salina es tan grande que podría utilizarse para producir sales.

Las calizas del área presentan buenas posibilidades acuíferas, sin embargo, su potencialidad varía de acuerdo a las zonas por lo que su aprovechamiento requiere de un estudio más específico.

La recarga de los acuíferos se debe a la infiltración directa del agua pluvial sobre las unidades geológicas permeables, sobre todo a través de los depósitos fluviales de los ríos y arroyos existentes.

Por lo general las zonas de recarga más importantes se localizan en las estribaciones de las sierras, donde los materiales son más permeables y facilitan la infiltración de los escurrimientos. Por otra parte, la descarga de los acuíferos se realiza en dos formas: artificial y natural. La artificial se lleva a cabo por medio de pozos y norias, en tanto que la natural ocurre espontáneamente en los manantiales existentes o bien como flujo subterráneo hacia otras zonas.

No debe descartarse la posibilidad de que una parte de la descarga pueda tener lugar a través de los principales ríos, los cuales funcionan como drenes superficiales y subterráneos regionales.

Pueden identificarse seis tipos de unidades geohidrológicas, las cuales están constituidas por la unidad de roca con agua, misma que está formada por tobas arenosas de composición ácida. En la región suroeste, la unidad presenta horizontes de conglomerado y arenisca; en general, ésta es poco consistente y de permeabilidad alta. La existencia de agua está comprobada por los pozos y manantiales existentes.

Unidad de roca con posibilidades de agua. Compuesta por calizas con un alto grado de permeabilidad, debida principalmente, a fracturamiento y disolución.

Unidad de roca sin agua. Construida por riolitas, tobas riolíticas, lutitas, areniscas, calizas, esquistos y en menor proporción, andesitas, basaltos e intrusivas.

Unidad de material granular con aguas. Está constituida por suelos aluviales y lacustres, así como por conglomerados y areniscas semiconsolidados.

Unidad de material granular con posibilidades de contener agua. Está formada por aluvión, arenisca y conglomerado poco consolidado, Se le ha considerado susceptible de contener agua, debido a su alta permeabilidad, así como por la presencia de manantiales.

Unidad material granular sin agua. Se encuentra formada, principalmente, por conglomerados mal cementados, suelos residuales y aluviales.

Los principales acuíferos son de tipo libre y se encuentran en materiales de relleno y rocas (valles) de la cuenca. La recarga natural proviene principalmente de las sierras que colindan con los grandes valles.

Ahora bien, la zona de estudio se ubica dentro del Distrito de Riego 017, el cual comprende los Municipios de Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Nazas, Rodeo, Mapimí, San Juan de Guadalupe y Simón Bolívar, los cuales se encuentran localizados en la porción Noreste del Estado de Durango y los municipios de Torreón, Matamoros, San Pedro de las Colonias, Francisco I. Madero y Viesca, localizados en la porción Suroeste del Estado de Coahuila.

El Distrito de Riego empezó a operar con riego mediante infraestructura incipiente a principios del siglo XX, posteriormente por acuerdo presidencial del 15 de diciembre de 1936, fue publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) del 18 de marzo de 1937, el establecimiento del Distrito de Riego 017 denominado Región Lagunera.

Como producto del Decreto de creación del Distrito de Riego 017 Región Lagunera, los agricultores de la Región disponen de concesiones de agua para riego en base a superficie, por lo que la distribución de los caudales de agua tan variables que ocurren temporal y anualmente generan permanentes conflictos entre los usuarios de riego y se considera una causa importante de la presión ejercida por los agricultores de la región sobre el recurso agua.

A partir del Programa Nacional de Modernización del Campo (1990), se inició la transferencia de la infraestructura de los Distritos de Riego a los usuarios, para que se hicieran cargo de su operación y mantenimiento, por lo que los Módulos del Distrito de Riego, se tenían que constituir legalmente en asociaciones civiles; en el caso del Distrito Riego 017 la transferencia se inició en 1990, con el Módulo VI Tlahualilo y se terminó en 1998, con el Módulo X Masitas, faltando por transferir solo la red mayor.

Actualmente se encuentra en proceso la constitución de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del Distrito de Riego 017 (SRLDR), con lo cual iniciará el proceso de entrega de la red mayor de este Distrito. Independientemente, interactúan ó influyen los Gobiernos de los Estados de Durango y Coahuila, Organizaciones Sociales y Privadas, Dependencias del Sector Agropecuario, Asociaciones Ganaderas, Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS), Centrales Campesinas, Cámaras Agrícolas y Ganaderas, etc.

Para cada año agrícola, de acuerdo a la disponibilidad existente en el sistema de presas al 1° de octubre de cada año, el Comité Técnico de Operación de Obras Hidráulicas (CTOOH en oficinas centrales) autoriza el volumen a extraer, debiéndose observar los decretos publicados y los volúmenes mínimos para conservación y ecología. Una vez conocido el volumen autorizado, en el Comité Hidráulico se asignan los volúmenes por Módulo considerando los derechos con que cuente en el padrón, para que éstos, de acuerdo a la condición octava y novena de los títulos de concesión presenten los planes de riego y sea concentrado y validado a nivel Distrito de Riego por la CNA.



En cuanto a la cuestión reglamentaria de las asociaciones civiles de usuarios, de 1994 a 2002 en sesiones del Comité Hidráulico del Distrito de Riego se han formulado y discutido en términos generales diferentes versiones del Proyecto de Reglamento de Operación del Distrito, habiendo sido revisado y adecuado en su clausulado por parte del Comité Hidráulico del Distrito de Riego 017 para su aprobación por parte de CNA en agosto de 2003 el "Documento Proyecto de Reglamento", a la fecha su legalización sigue pendiente.

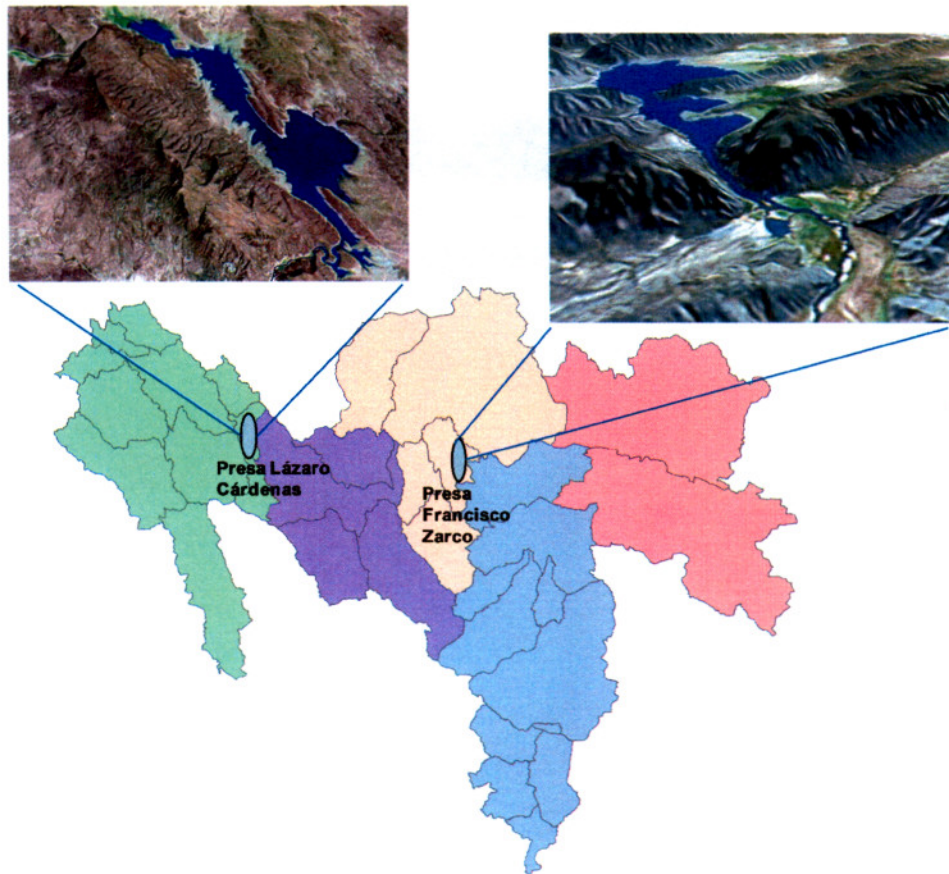
Para su operación el Distrito de Riego 017 está integrado por 20 Módulos de riego de los cuales 17 reciben agua para riego del Río Nazas y los 3 restantes del Río Aguanaval con una superficie física total de 223,632 ha que cuenta con infraestructura; de esta superficie, según el padrón de usuarios, 93,307 ha tienen derechos; 87,307 ha corresponden a la zona del Río Nazas y 6,000 ha a la del Río Aguanaval.

El volumen anual concesionado es de 979.916 Mm<sup>3</sup>, de los cuales 932.113 Mm<sup>3</sup> corresponden a la zona del Río Nazas (Módulos I al XVII) y 47.803 Mm<sup>3</sup> a la zona del Río Aguanaval (Módulos XVIII, XIX y XX), que de acuerdo a la concesión, con estos volúmenes se regarían 87,307 ha en la zona del Río Nazas y 6,000 ha en la del Aguanaval, dando un total de 93,307 ha.

En cuanto al número de usuarios con derechos de riego, en la zona del Río Nazas 30,967 son ejidatarios y 2,393 pequeños propietarios totalizando 33,360 usuarios, en la zona del Río Aguanaval 4,166 son ejidatarios y 463 pequeños propietarios para un total en esta zona de 4,629 usuarios. A nivel Distrito el total de usuarios es de 37,989 de los cuales 35,133 corresponden al régimen ejidal y 2,856 de la pequeña propiedad.

En cuanto a la superficie regada en la zona del Río Nazas en los últimos 10 años se registra un promedio de 38,505 ha que comparadas con las 89,526 ha de la superficie que cuenta con derechos de riego resultan menos del 56% de ocupación, lo cual es producto del periodo de sequía que ha tenido en la Comarca Lagunera. En este periodo la mayor superficie sembrada se dio en el año 1997 con 71,004 ha, y la más baja en el año de 2002 con 12,373 ha.

En la zona del Río Aguanaval, la superficie promedio es de 3,486 ha, con un mínimo de 1,626 ha en el año de 1997 y 4,919 ha en el año de 2003.



**Figura 12.- Región Hidrológica 36 "Nazas-Aguanaval" con la localización del sistema de presas Lázaro Cárdenas-Francisco Zarco**

En cuanto a infraestructura en la parte correspondiente al Río Nazas, actualmente el Distrito de Riego 017 cuenta con dos presas de almacenamiento importantes: Lázaro Cárdenas con una capacidad total de 4,438 Mm<sup>3</sup> incluye superalmacenamiento y una capacidad de conservación de 2,873 Mm<sup>3</sup> y la Presa Francisco Zarco con una capacidad total de 436 Mm<sup>3</sup> y una capacidad de conservación de 365 Mm<sup>3</sup> (Fig. 2); además de 40 presas derivadoras; así como 655 km de canales principales, 1,778 km de canales secundarios y 12,167 estructuras de operación y control.

En la parte correspondiente al Río Aguanaval, no se cuenta con presas de almacenamiento, utilizándose 11 presas derivadoras y 513 km de canales principales que derivan directamente a

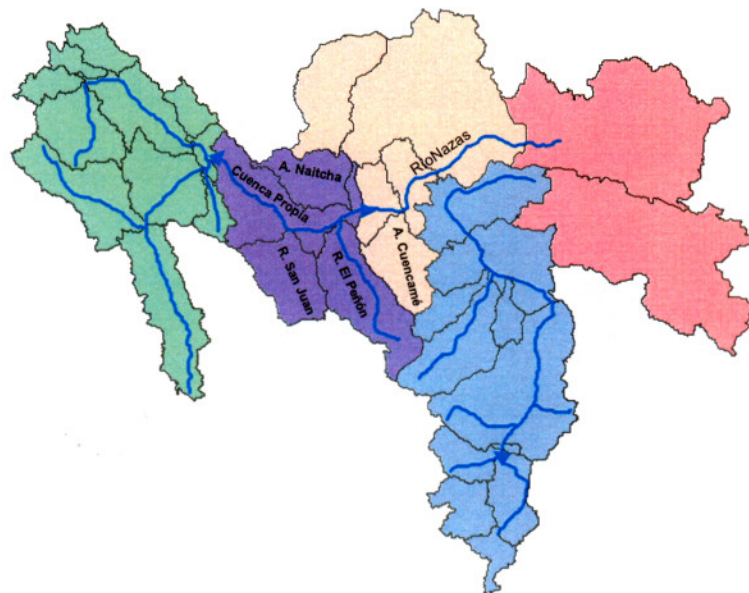
las parcelas para el riego de 6,000 ha. Existe una red de canales de distribución de 2,465.4 km. y 1,834.8 km de caminos.

Las fuentes de aprovechamiento del Distrito de Riego 017 Región Lagunera la integran únicamente las aguas superficiales que escurren de los Ríos Nazas y Aguanaval.

La aportación media a la presa Lázaro Cárdenas en el periodo 1936 – 2004 es de 1,156 millones de m<sup>3</sup>, y para la presa Francisco Zarco en este mismo período resulta de 213 millones de m<sup>3</sup>.

El Río Aguanaval es la fuente de abastecimiento de los Módulos XVIII, XIX y XX, esta corriente es de régimen muy errático, en el periodo 1941-2003 el escurrimiento medio anual fue de 135 millones de m<sup>3</sup>.

La zona de interés se encuentra ubicado en la cuenca media del río Nazas, comprendida entre las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco.



**Figura 13.- Principales corrientes en la cuenca media del río Nazas.**

La operación de Distrito de Riego 017, es a partir de la presa Francisco Zarco, donde la cuantificación de volúmenes extraídos se debe hacer de la manera mas precisa, para garantizar las demandas de agua y asegurar las disponibilidad de la misma en los próximos ciclos agrícolas a través de evitar excesos en la extracción.

Día	Variación de almacenamiento	Precipitación	Ríos Aforados	Aportación deducida positiva	Entrada total	Aportación deducida negativa	Extracción	Filtración	Evaporación	Salida total
1	11.48	0	9.984	1.6	11.584	0	0	0.017	0.087	0.104
2	12.09	0	10.369	1.869	12.238	0	0	0.017	0.131	0.148
3	10.98	0	10.032	1.073	11.105	0	0	0.017	0.108	0.125
4	7.6	0	9.57	0	9.57	1.864	0	0.017	0.089	1.97
5	0.6	0	7.945	0	7.945	0.756	6.48	0	0.109	7.345
6	-0.8	0	7.217	0	7.217	0.569	7.344	0	0.104	8.017
7	-1.8	0	7.189	0	7.189	1.552	7.344	0	0.093	8.989
8	-2	0	7.24	0	7.24	1.202	7.949	0	0.089	9.24
9	-1.8	0	7.22	0	7.22	1.242	7.661	0	0.117	9.02
10	-1.8	0	7.263	0	7.263	1.645	7.329	0	0.089	9.063
11	-1.8	0	7.335	0	7.335	1.88	7.138	0	0.117	9.135
12	-1.44	0	7.382	0	7.382	1.589	7.13	0	0.103	8.822
13	-1.98	0	7.384	0	7.384	2.152	7.107	0	0.105	9.364
14	-1.8	0	7.361	0	7.361	1.567	7.495	0	0.099	9.161
15	-1.98	0	7.344	0	7.344	1.735	7.481	0	0.108	9.324
16	-1.98	0	7.39	0	7.39	1.651	7.577	0	0.142	9.37
17	-1.8	0	7.316	0	7.316	1.419	7.568	0	0.129	9.116
18	-2.81	0	7.329	0	7.329	2.484	7.547	0	0.108	10.139
19	-2.04	0	7.305	0	7.305	1.731	7.574	0	0.04	9.345
20	-2.04	0	7.37	0	7.37	1.72	7.577	0	0.113	9.41
21	-1.7	0	7.401	0	7.401	1.434	7.557	0	0.11	9.101
22	-2.55	0	7.468	0	7.468	2.354	7.56	0	0.104	10.018
23	-2.21	0	7.456	0	7.456	1.979	7.565	0	0.122	9.666
24	-2.38	0	7.407	0	7.407	2.127	7.573	0	0.087	9.787
25	-2.38	0	7.433	0	7.433	2.154	7.565	0	0.094	9.813
26	-2.01	0	7.402	0	7.402	1.766	7.543	0	0.103	9.412
27	-1.95	0	7.369	0	7.369	1.658	7.553	0	0.108	9.319
28	-2.4	0	7.395	0	7.395	2.177	7.53	0	0.088	9.795
29	-3	0	6.873	0	6.873	2.447	7.303	0	0.123	9.873
30	-2.1	0	5.528	0	5.528	0.771	6.756	0	0.101	7.628
31	1.2	0	6.192	0	6.192	0	4.892	0	0.1	4.992

Nota: Datos en miles de metros cúbicos

**Tabla 2.- Variables del balance agua en una presa de almacenamiento (Ejemplo Francisco Zarco, Marzo 2008).**

**SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS**  
SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA  
DEPARTAMENTO DE HIDROMETRÍA  
**SERVICIO HIDROMÉTRICO**

REGISTRO DE RÉGIMEN DE ALMACENAMIENTO

DIVISIÓN COEFICIENTE DE EVAPORACIÓN 0.77    NOMBRE DEL VASO: FRANCISCO ZARCO    EDO. VERAGÜEZ    MUNICIPIO: CUERNAVACA

PÁGINA 211 DE 118

MES DE: ENERO    DE 2002  
CORRIENTE: RIO NAZAS    Y  
CUENCA: RIO NAZAS  
MUNICIPIO: CUERNAVACA

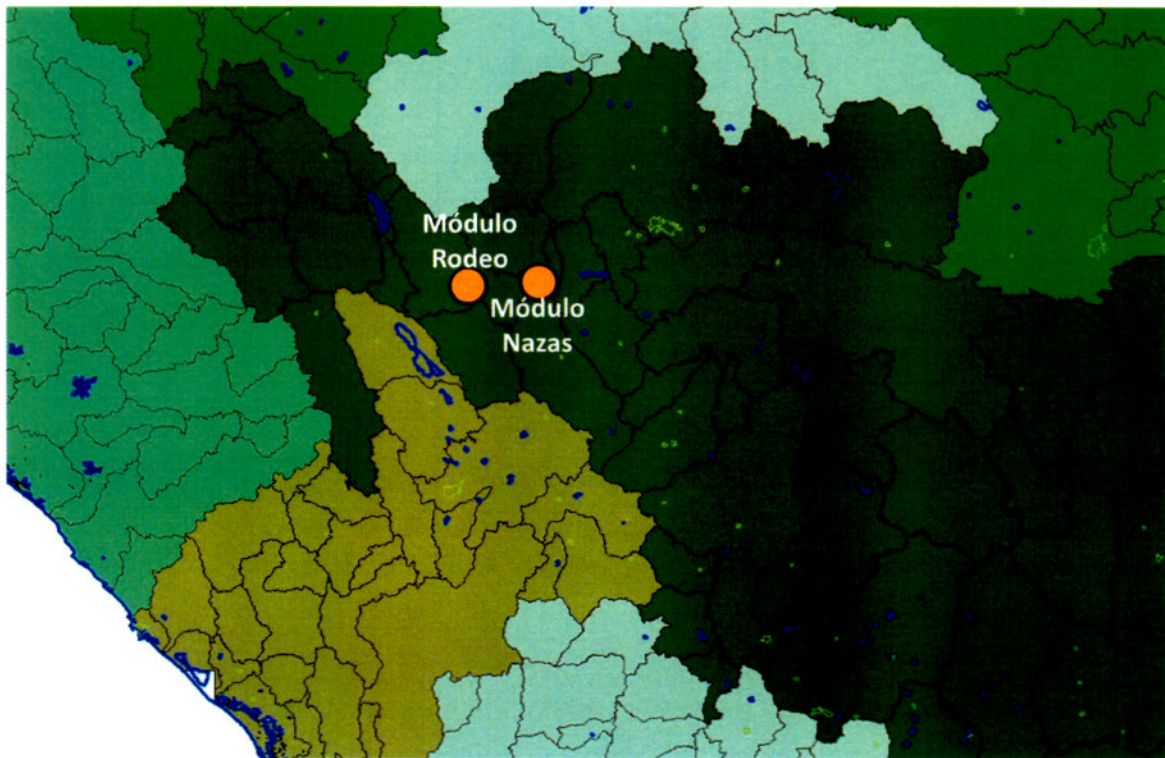
DÍA	METEOROLOGÍA			V A S O			L I N T R A D A S			S A L I D A S			ALMACENAMIENTO		
	TEMP. LUZ	TEMP. AER.	PRECIP. (MM)	AREA	ALMACENAMIENTO	PRECIP. (MM)	RECIBIDA	RECIBIDA	RECIBIDA	RECIBIDA	RECIBIDA	RECIBIDA	RECIBIDA	RECIBIDA	RECIBIDA
1	0.0	0.0	0.0	1568	102.600	0	38	13	0	51	0	0	17	34	51
2	0.0	3.21	1197.24	1568	102.600	-0.460	34	0	0	42.9	0	0	17	38	47.4
3	0.0	1.96	1197.21	1556	102.150	0	35	5	0	40	0	0	17	23	40
4	0.0	2.10	1197.21	1556	102.150	0	32	10	0	42	0	0	17	25	42
5	0.0	2.85	1197.21	1556	102.150	0	30	21	0	51	0	0	17	34	51
6	0.0	3.40	1197.21	1556	102.150	0	34	24	0	58	0	0	17	41	58
7	0.0	4.30	1197.21	1556	102.150	0	33	36	0	64	0	0	17	52	69
8	0.0	3.25	1197.21	1556	102.150	0	34	22	0	56	0	0	17	34	56
9	0.0	3.04	1197.21	1556	102.150	0	34	14	0	53	0	0	17	36	53
10	0.0	3.13	1197.21	1556	102.150	0	31	24	0	55	0	0	17	38	55
11	0.0	2.78	1197.21	1556	102.150	0	33	17	0	50	0	0	17	33	50
12	0.0	3.22	1197.21	1556	102.150	0	32	24	0	56	0	0	17	33	56
13	0.0	4.09	1197.21	1556	102.150	0	34	32	0	66	0	0	17	49	66
14	0.0	7.13	1197.21	1556	102.150	0	31	71	0	102	0	0	17	25	102
15	0.0	1.04	1197.21	1556	102.150	0	31	0	0	31	2	0	17	12	31
16	0.0	3.05	1197.21	1556	102.150	0	32	22	0	54	0	0	17	37	54
17	0.0	2.98	1197.21	1556	102.150	0	32	21	0	53	0	0	17	36	53
18	0.0	2.95	1197.21	1556	102.150	0	32	20	0	52	0	0	17	35	52
19	0.0	2.44	1197.21	1556	102.150	0	30	16	0	46	0	0	17	29	46
20	0.0	1.30	1197.21	1556	102.150	0	29	4	0	33	0	0	17	16	33
21	0.0	4.40	1197.21	1556	102.150	-1500	32	0	0	32	1463	0	17	52	1532
22	0.0	1.51	1197.21	1545	100.650	0	33	2	0	35	0	0	17	18	35
23	0.0	3.43	1197.21	1545	100.650	0	32	32	0	64	0	0	17	47	64
24	0.0	5.27	1197.21	1545	100.650	0	31	49	0	80	0	0	17	63	80
25	0.0	3.22	1197.21	1545	100.650	0	32	31	0	63	0	0	17	46	63
26	0.0	3.21	1197.21	1545	100.650	-0.150	34	0	0	34	129	0	17	38	129
27	0.0	4.27	1197.21	1544	100.500	0	31	37	0	68	0	0	17	51	68
28	0.0	6.00	1197.21	1544	100.500	-0.160	29	0	0	29	91	0	17	71	91
29	0.0	3.18	1197.24	1542	100.350	0	30	27	0	57	0	0	17	40	57

**Figura 14.- Registro de régimen de almacenamiento**

En la última década, como consecuencia de la baja disponibilidad de agua en las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco y a la marcada presión que imponen los usuarios del Distrito de Riego 017 en cuanto al uso del agua almacenada, se ha puesto un especial énfasis en los balances que se realizan en estos reservorios, incluso a nivel diario, detectándose incongruencias entre la cantidad de agua que entra al vaso de cada presa, la que se encuentra almacenada y los volúmenes extraídos, tomando como documento de referencia las hojas de

funcionamiento del vaso, en el cual se reflejan las variables de funcionamiento de cada reservorio.

En la Tabla 2, resalta de manera muy evidente el hecho de como los valores del concepto “*aportación deducida positiva*” se incrementan rápidamente al momento de que en el vaso de la Presa Francisco Zarco inicia a registrarse una entrada, de igual manera, el concepto “*aportación deducida negativa*” se incrementa de manera importante al momento en que se inicia la extracción de volúmenes de agua con la finalidad de utilizarse en la zona de riego del Distrito de Riego 017.



**Figura 15.- Ubicación de los módulos de riego I Rodeo y II Nazas**

Es importante comentar, que los datos anteriores se obtuvieron de la hoja de régimen de almacenamientos (Figura 14), la cual se utiliza para realizar el balance hídrico de cada presa, ya que contiene datos de entrada (gasto en ríos y precipitación), datos de salida (evaporación, filtraciones y extracciones). En la Figura 14 se muestra el balance de la presa Francisco Zarco para el mes de enero de 2008, donde como variable de ajuste se emplea el concepto de

aportación deducida, la cual puede ser positiva o negativa y representa las entradas o salidas no cuantificadas en la red de medición con que cuenta esta presa almacenadora.

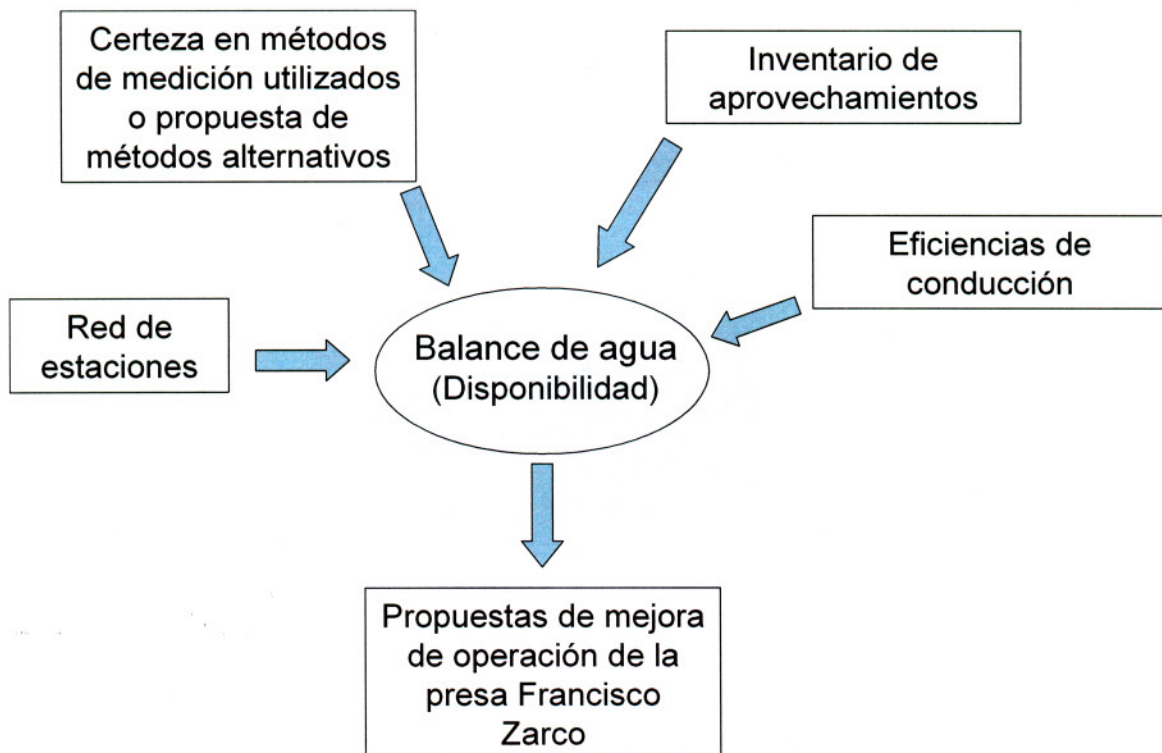
En la cuenca media del río Nazas existen 4 corrientes de importancia, aportadoras y no aforadas, al río Nazas, que son el río San Juan, río El Peñón, arroyo Cuencamé y el Arroyo Naitcha. Estas corrientes, desde el primero de enero de 2008 a fines de junio de 2008, no presentaron escurrimientos en su desembocadura con el cauce del río Nazas, lo que facilita el análisis de las variables relacionadas con el funcionamiento de la presa Francisco Zarco o al menos en la primera fase del trasvaso de agua para el ciclo agrícola Primavera-Verano 2008 (Figura 13 Principales corrientes en la cuenca media del río Nazas).

Del mismo modo, en la cuenca media del río Nazas, existen un número importante de derivaciones de agua a partir del cauce del río Nazas con lo que se beneficia un total de 1,384.7 Has. Esta superficie de riego se encuentra registrada en el padrón de usuarios de los módulos de riego I Rodeo y II Nazas del Distrito de Riego 017 (Figura 15 Ubicación de los módulos de riego I Rodeo y II Nazas).

## **II.- Justificación:**

Existe una gran variabilidad en la precipitación en la cuenca del río Nazas, misma que se ve reflejada en los volúmenes de agua destinados para riego, modificándose año a año la superficie agrícola a beneficiarse y exigiéndose una mejor eficiencia en el aprovechamiento del agua.

Aunado a lo anterior, no se ha hecho una revisión cuidadosa de la distribución y emplazamiento de cada estación climatológica e hidrométrica ubicada en el área de estudio y las cuales proporcionan la información básica en el balance de agua superficial tanto en la cuenca media del río Nazas como en el mismo vaso de la presa Francisco Zarco, manteniéndose además durante años, los mismos métodos de cálculo de las diferentes variables hidroclimatológicas que se obtienen en estos sitios de monitoreo, situación que actualmente genera incertidumbre en cuanto a la operación de la presa Francisco Zarco y su consecuente impacto social en el Distrito de Riego 017.



**Figura 16.-Esquema conceptual**



Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis y las recomendaciones en relación a los métodos de estimación de volúmenes de precipitación, evaporación y escurrimiento; que permitan una mayor claridad en los datos que se manejan en cada hoja de régimen de almacenamiento de las presas, lo que tal vez permita reducir el concepto de las aportaciones deducidas.

Lo anterior, se ilustra en la Figura 16.

En base a lo anterior, es fácil notar, que el problema principal en la operación del sistema de presas Lázaro Cárdenas-Francisco Zarco lo constituye el hecho de que no se tiene una buena infraestructura de medición que de certeza tanto en la determinación de los volúmenes de agua de entrada a la presa, así como en la medición de las variables de salida de la misma, lo que ocasiona incertidumbre en la posibilidad de alcanzar las metas fijadas en los programas de distribución de agua del Distrito de Riego 017 "Región Lagunera" en su operación anual.

Por lo tanto, la aportación del presente estudio, va en sentido de evaluar la infraestructura y métodos de medición utilizados en la cuantificación de las variables que se consideran en la Hoja de Régimen de Almacenamiento de la Presa Francisco Zarco y en la medida de lo posible, hacer recomendaciones en la mejora de esta infraestructura y prácticas de medición.

### **III.- Objetivos:**

1.- Analizar las variables hidrológicas relacionadas al funcionamiento del vaso de la presa Francisco Zarco, considerando su relevancia en la cuantificación de volúmenes almacenados y a su vez proponer alternativas para mejorar su operación. Lo anterior en base a la NORMA Oficial Mexicana 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.

Esta Norma Oficial Mexicana tiene como objetivo establecer el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y subterráneas, para su explotación, uso o aprovechamiento.

Considerando que la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento dispone que para el otorgamiento de asignaciones y concesiones se tomará en cuenta la disponibilidad media anual de agua, por lo que a través de la presente Norma Oficial Mexicana se indican las especificaciones para determinar con una metodología consistente la disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales y subterráneas, como base técnica para regular su uso, de manera racional y equitativa.

Las especificaciones proporcionadas se deben aplicar en los estudios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales en cuencas hidrológicas y en unidades hidrogeológicas. El método se considerará como el requerimiento técnico mínimo obligatorio y no excluye la aplicación adicional de métodos complementarios o alternos más complicados y precisos.

2.- Diferenciar los ingresos al vaso de la presa Francisco Zarco provenientes de transferencias, cuenca propia y lluvia, utilizando métodos directos e indirectos para estimación del escurrimiento.

3.- Analizar el cálculo de la evaporación en el vaso de la presa Francisco Zarco contrastando el método tradicional con métodos indirectos.

4.- Analizar el funcionamiento del vaso de la presa Francisco Zarco.



#### **IV.- Hipótesis:**

Los métodos y estaciones hidrológicas usadas actualmente para la determinación de las variables relacionadas al funcionamiento del vaso Francisco Zarco, y como consecuencia al balance de aguas superficiales, no satisfacen las necesidades actuales de información e instrumentos de decisión.

## **V.- Metodología**

El objetivo de este capítulo es mostrar la forma actual en que se realiza la operación en el vaso de la presa Francisco Zarco, así como los métodos empleados. De esta forma se propondrán algunas mejoras y propuestas a los métodos empleados. Para el logro de los objetivos propuestos, se analizarán y evaluarán los siguientes aspectos en este estudio.

1.- Inventario total de aprovechamientos de agua superficial del río Nazas (autorizados y clandestinos) en el tramo comprendido entre las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco y la superficie de riego en los módulos I Rodeo y II Nazas.

Existen inventarios actualizados por el Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte de la Comisión Nacional del Agua, en los cuales se relacionan principalmente los aprovechamientos autorizados o incluidos en el padrón de usuarios de las aguas superficiales del Distrito de Riego 017.

Así mismo existen aprovechamientos clandestinos para los cuales es necesario realizar visitas de campo para detectarlos y documentarlos. Es deseable tener el inventario de los aprovechamientos clandestinos, sin embargo para los fines de este trabajo se considerarán los que se tengan a la mano.

Para determinar la información requerida en este punto, se utilizarán los inventarios más recientes obtenidos por la Comisión Nacional del Agua a través de estudios o de información generada en los mismos módulos de riego, además de complementarla con datos de otras fuentes.

2.- En la diferenciación de los volúmenes de entrada a la presa Francisco Zarco es posible determinar a través de métodos indirectos los escurrimientos generados en cada una de las subcuencas principales de cuenca media del río Nazas, utilizando herramientas como ArcGis o bien la información disponible en las bases de datos de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (BANDAS), en la del Servicio Meteorológico Nacional, tanto de estaciones convencionales como automáticas y en Inventario de Presas de la Comisión Nacional del Agua.

Considerando que para el presente estudio y con la finalidad de diferenciar de manera sencilla los escurrimientos que se originan en la cuenca media del río Nazas de lo que es trasvaso de la

presa Lázaro Cárdenas a la Presa Francisco Zarco, se propuso considerar solo el período de estiaje de enero a junio de 2008, dentro del cual, a través de la metodología propuesta por la NORMA Oficial Mexicana 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, podemos separar fácilmente lo anterior a partir de losiguiente:

**Disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica. Se determina en el cauce principal en la salida de la cuenca hidrológica, mediante la siguiente expresión:**

$$\begin{array}{l} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL} \\ \text{DE AGUA SUPERFICIAL EN LA} \\ \text{CUENCA HIDROLOGICA} \end{array} = \begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL} \\ \text{DE ESCURRIMIENTO} \\ \text{DE LA CUENCA HACIA} \\ \text{AGUAS ABAJO} \end{array} - \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL ACTUAL} \\ \text{COMPROMETIDO AGUAS ABAJO} \end{array}$$

**El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo del sitio de interés, se determina al aplicar la siguiente expresión:**

$$\begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO} \\ \text{ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO DE LA} \\ \text{CUENCA HACIA AGUAS} \\ \text{ABAJO} \end{array} = \begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO} \\ \text{ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO} \\ \text{DESDE LA CUENCA} \\ \text{AGUAS ARRIBA} \end{array} + \begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO} \\ \text{ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO} \\ \text{NATURAL} \end{array} + \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{RETORNOS} \end{array} + \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{IMPORTACIONES} \end{array} - \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{EXPORTACIONES} \end{array} - \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{EXTRACCION DE} \\ \text{AGUA SUPERFICIAL} \end{array}$$

Para efectos de la presente Norma Oficial Mexicana, las definiciones de los términos que se indican en el balance, se definen en el Glosario de Términos que se incluye en este estudio.

Determinando las variables de la NOM-011-CNA-2000, la diferenciación de volúmenes escurridos o que se presenten en la cuenca media del río Nazas, se limitan a los volúmenes de derivados de la presa Lázaro Cárdenas como acción de trasvaso a la presa Francisco Zarco.

3.- Detectadas las aportaciones a la Presa Francisco Zarco, se realizará un análisis de los caudales medidos en la estación hidrométrica “Agustín Melgar”, utilizando herramientas estadísticas y/o computaciones, con las cuales se pretende evaluar el funcionamiento y emplazamiento del sitio de monitoreo hidrológico. De ser necesario, se utilizará el modelo hidráulicoHEC-RAS, por su fácil acceso, su carácter de software libre y por ser más simple su configuración y aplicación.

Con las herramientas computacionales, se pretende realizar la simulación hidráulica para varios gastos de diseño y obtener elevaciones de espejo de agua para cada uno de ellos y compararlos estadísticamente con las escalas asociadas a los gastos obtenidos por el personal de aforo al realizar su trabajo.

Con esta comparación estadística, se puede determinar si es significativo la diferencia que existe entre los datos obtenidos por el personal y si es conveniente realizar algunos trabajos que permitan reducir el error de cálculo.

4.- Para evaluar los métodos de obtención de las variables relacionadas al funcionamiento del vaso, se obtendrán por métodos indirectos la lámina de evaporación, tomando para ello la información meteorológica registrada en la EMA "Agustín Melgar", ubicada a 15 km del vaso de la presa Francisco Zarco (ver figura 17).



**Figura 17.- Croquis de localización de EMA "Agustín Melgar con respecto al vaso de la presa Francisco Zarco**

Cuando se quiere evaluar la medición de la evaporación obtenida por métodos directos como evaporímetros Tipo A o Lisímetros, se pueden utilizar métodos indirectos para ello, existiendo mucha bibliografía relacionada (Allen, Richard G. 2002. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. y Ocón. A. R. et al. 2000. Cálculo de la evaporación en el lago de Chapala) con el cálculo de la evaporación o bien de la evapotranspiración por métodos indirectos clasificados en “Métodos de Balance de Masa o Aerodinámicos”, “Métodos de Balance de Energía” y “Métodos Combinados”, con período de tiempo para determinación de la lámina de agua evaporada como es de una hora, día, decena o mes.

Muchos autores e investigadores han aplicado el criterio de Penman modificado o Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración en áreas de cultivo o en embalses de agua (Tijerina Chavez, Leonardo. 1999). Requerimientos hídricos de cultivos bajo sistemas de fertirrigación. Terra Latinoamericana. Universidad Autónoma de Chapingo. Donde manifiesta que “...el procedimiento de Penman modificado para cálculo de la EToda resultados razonables para un día.”

Con el propósito de proporcionar el riego en tiempo real al nogal pecanero, se determinó la evapotranspiración a partir del monitoreo atmosférico utilizando estaciones agroclimáticas automatizadas en red, ubicadas en dos subregiones de la Cuenca del Nazas. Para ello, se utilizaron los métodos de Penman - Monteith FAO, Doorembos – Pruitt y Hargreaves – Saman que estiman la evapotranspiración de referencia y se han comparado localmente con la obtenida mediante el método de tanque evaporímetro de tipo A. (Chávez Ramírez, E. 2008). Cabe mencionar, que este autor aplicó los métodos de Penman - Monteith FAO, Doorembos – Pruitt y Hargreaves – Saman en nogal pecanero por que en estas subregiones predomina este cultivo por la disponibilidad de agua y su clima, además de que al ser un cultivo con buena rentabilidad, permite el financiamiento de equipo automático de monitoreo meteorológico.

Los resultados en base a la comparación de métodos, indican que el modelo Penman – Monteith FAO presenta mejor correlación de la evapotranspiración de referencia. (Chávez Ramírez, E. 2008).

Existen varios métodos por medio de los cuales se puede obtener estimados de la evaporación que se presenta en un embalse, entre los que podemos mencionar los siguientes (Guía de

Prácticas Hidrológicas, Adquisición y Proceso de Datos, Análisis, Predicción y Otras Aplicaciones. Organización Meteorológica Mundial):

Balance hídrico

Balances energéticos

Métodos aerodinámicos

Métodos combinados

Utilizando tanques evaporímetros y datos meteorológicos

#### Factores que determinan la evaporación

- a) Radiación solar. Es el factor determinante de la evaporación ya que es la fuente de energía de dicho proceso.
- b) Temperatura del aire. El aumento de temperatura en el aire facilita la evaporación ya que: en primer lugar crea una convección térmica ascendente, que facilita la aireación de la superficie del líquido; y por otra parte la presión de vapor de saturación es más alta.
- c) Humedad atmosférica. Es un factor determinante en la evaporación ya que para ésta se produzca, es necesario que el aire próximo a la superficie de evaporación no esté saturado (situación que es facilitada con humedad atmosférica baja).
- d) El viento. Después de la radiación es el más importante, ya que renueva el aire próximo a la superficie de evaporación que está saturado. La combinación de humedad atmosférica baja y viento resulta ser la que produce mayor evaporación.

El viento también produce un efecto secundario que es el enfriamiento de la superficie del líquido y la consiguiente disminución de la evaporación.

- e) Tamaño de la masa de agua. El volumen de la masa de agua y su profundidad son factores que afectan a la evaporación por el efecto de calentamiento de la masa.



Volúmenes pequeños con poca profundidad sufren un calentamiento mayor que facilita la evaporación.

- f) Salinidad. Disminuye la evaporación, fenómeno que sólo es apreciable en el mar.

#### Protección contra la evaporación

En climas secos y calurosos la evaporación en los embalses es muy importante y ello conlleva importantes pérdidas de agua almacenada. Por ello se ha tratado de evitar o disminuir esta evaporación, utilizándose diversos métodos entre los que destacan:

- a) La cubrición. Sólo es posible en pequeñas superficies.
- b) Disminuir la evaporación protegiendo el embalse del viento por medio de pantallas.
- c) Cubrir la superficie del agua con sólidos o líquidos flotantes que eviten la evaporación.

Entre los primeros se han utilizado placas de aislante blanco que aumentan la reflexión de la radiación solar y entre los segundos productos químicos que deben de ser estables y no miscibles con el agua ni tóxicos.

Estos métodos presentan el problema de que al evitarse la evaporación se produce un calentamiento de la masa de agua con problemas de contaminación. Por todo ello, las medidas deben tender a una mejor gestión del agua, almacenándola en embalses altos (poca evaporación) y aumentando el uso de recursos subterráneos, que sí que funcionan como auténticos embalses cubiertos.

En la actualidad, existe un número muy reducido de embalses para los cuales se pueden obtener estimativos confiables de la evaporación a partir de balances hídricos en forma continua, sin embargo, los valores estimados y disponibles pueden servir para calibrar otros métodos.

En condiciones en las cuales no se pueden obtener estimados de la evaporación por medio del método de balance hídrico, esta se puede determinar por medio de un enfoque empírico

aerodinámico o mediante técnicas de balances energéticos. La instrumentación y el mantenimiento para obtener observaciones continuas son costosos en estos dos métodos y es posible que su uso extensivo no sea económico, sin embargo, el objetivo que se persigue puede justificar su aplicación por un período de tiempo corto para calibrar un método menos costoso.

Los siguientes son métodos para estimar la evapotranspiración potencial y entre los más comúnmente aplicados son los siguientes:

- Método de Lisímetros
- Método de Tanque Evaporímetro
- Métodos Empíricos

### **Método de Lisímetro**

Un lisímetro consiste en un recipiente enterrado y cerrado lateralmente, de modo que el agua drenada por gravedad (la que se hubiere infiltrado hasta el acuífero), es captada por un drenaje. En su construcción debe tenerse cuidado de restituir el suelo que se excavó en unas condiciones lo mas similares posibles a las que se encontraba. Próximo a él debe existir un pluviómetro.

La Evapotranspiración Potencial (Eto) se despeja de la siguientes ecuación del balance hídrico en el lisímetro.

$$\text{Precipitación} = \text{Eto} + \text{Infiltración} + \Delta \text{ Almacenamiento} \quad (5.1)$$

Para calcular el  $\Delta$  Almacenamiento, normalmente se mide la humedad del suelo y a partir de ahí, se calcula una lámina de agua equivalente expresada en mm.

Mediante riego el método es más simple, debido a que se debe mantener el suelo en condiciones de humedad óptima y la ecuación sería la siguiente:

$$\text{Precipitación} + \text{Riego} = \text{Eto} + \text{Infiltración} \quad (5.2)$$

### Método de Tanque Evaporímetro

Este método consiste en encontrar una relación entre la tasa de evapotranspiración producida en un lisímetro y la tasa de evaporación producida en un tanque de evaporación Clase A, en base al cual se determina un coeficiente empírico con el que se puede efectuar luego las lecturas de evaporación y obtener indirectamente la evapotranspiración potencial para las condiciones ambientales específicas.

El tanque de evaporación Clase A permite estimar los efectos integrados del clima (radiación, temperatura, viento y humedad relativa), en función de la evaporación registrada de una superficie de agua libre de dimensiones estándar.

$$E_{to} = K_{tanque} * E \quad (5.3)$$

$E_{to}$  : Evapotranspiración potencial (mm/día)

$K_{tanque}$  : Coeficiente empírico del tanque

$E$  : Evaporación libre del tanque Clase A (mm/día)

Existe una metodología alternativa propuesta por la FAO para determinar la evapotranspiración potencial a partir de registros de evaporación obtenidos en tanques de Clase A.

Las características físicas del tanque Clase A son:

- Diámetro externo: 120.5 cm.
- Altura: 25.4 cm.
- Base a 5.0 cm del suelo.
- Estar rodeado de pasto corto en un radio de 50.0 m.
- Debe ser llenado hasta 5.0 cm por debajo de su borde y evitar que el nivel baje más allá de 7.5 cm por debajo del mismo.

La utilización de tanques evaporímetros es uno de los métodos más baratos y debe producir estimativos razonablemente precisos de la evaporación anual del embalse, pero no en períodos mas cortos de tiempo, donde ya intervienen la advección neta al embalse y los cambios en el almacenamientos de energía. Son estos períodos más cortos en la estimación de la

evaporación los que juegan un papel muy importante en la operación de una presa de almacenamiento.

Las técnicas de balances hídricos y balances energéticos así como el enfoque aerodinámico se pueden usar para estimar la evaporación en embalses. No obstante estos métodos no son directamente aplicables a problemas de diseño, pues requieren información sobre la temperatura del agua. La combinación de estos métodos comienza a ser más utilizada, pero la mayoría de los estimativos de la evaporación en embalses para diseño y operación se han hecho aplicando un coeficiente a la evaporación observada o estimada de tanques evaporímetros. Aunque se han hecho muy pocas determinaciones para evaluar con precisión el enfoque, si se supone un tanque evaporímetro clase A con un coeficiente anual de 0.70, la diferencia máxima resultante en algunos embalses es de un 12%. Los coeficientes para períodos menores a un año son mas variables pues la energía almacenada en un embalse puede ser apreciablemente diferente al comenzar y terminar el período y los cambios en el almacenamiento de calor producen variaciones pronunciadas en los coeficientes mensuales que deben tenerse en cuenta.

### **Métodos Indirectos o Empíricos**

#### **Fórmula de Makkink**

Makkink usando como base sus experiencias en Holanda propone la fórmula siguiente:

$$\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \quad (5.4)$$

en la que:

- ETP = evapotranspiración potencial (mm/día)
- $\Delta$  = pendiente de la curva de saturación para la temperatura media diaria del aire
- $\gamma$  = constante psicrométrica
- $R_i$  = radiación global incidente expresada en mm/día de agua evaporable.

La expresión:  $\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}$  está tabulada, para distintas temperaturas

t	$\Delta/\gamma$	t	$\Delta/\gamma$
0,0	0,401	15,5	0,627
0,5	0,409	16,0	0,633
1,0	0,4158	16,5	0,640
1,5	0,426	17,0	0,646
2,0	0,432	17,5	0,652
2,5	0,440	18,0	0,658
3,0	0,448	18,5	0,664
3,5	0,445	19,0	0,670
4,0	0,462	19,5	0,676
4,5	0,470	20,0	0,682
5,0	0,478	20,5	0,688
5,5	0,485	21,0	0,694
6,0	0,493	21,5	0,699
6,5	0,500	22,0	0,705
7,0	0,508	22,5	0,710
7,5	0,515	23,0	0,715
8,0	0,522	23,5	0,720
8,5	0,530	24,0	0,725
9,0	0,537	24,5	0,730
9,5	0,544	25,0	0,735
10,0	0,552	25,5	0,740
10,5	0,559	26,0	0,745
11,0	0,566	26,5	0,750
11,5	0,573	27,0	0,755
12,0	0,580	27,5	0,760
12,5	0,587	28,0	0,764
13,0	0,593	28,5	0,768
13,5	0,600	29,0	0,772
14,0	0,607	29,5	0,776
14,5	0,614	30,0	0,780
15,0	0,621		

**Tabla 3.- Relación  $\Delta/\Delta+\gamma$  en función de la temperatura del aire (t)**

### Fórmula de Turc

La fórmula de Turc se basa en estudios estadísticos de 254 cuencas alrededor del mundo. Relaciona evapotranspiración, precipitación y temperatura.

$$ETP = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (5.5)$$

donde:

- ETR = evapotranspiración real (en mm/año)
- P = precipitación (en mm/año)
- $L = 300 + 25 t + 0,05 t^2$  (5.6)
- t = temperatura media anual (°C)

Turc, también desarrolló otra fórmula, mucho más complicada, para periodos más pequeños (10 días) en la que trata de tener en cuenta el efecto de la humedad del suelo para diferentes plantas.

### Fórmula de Coutagne

$$ETP = P - \chi P^2 \quad (5.7)$$

donde:

- ETR = evapotranspiración real (m/año)
- P = precipitación (m/año)
- $\chi = 1/0,8 + 0,14t$  (5.8.)
- t = temperatura media anual (en °C)

La fórmula solo es válida para valores de P comprendidos entre  $1/8\chi$  y  $1/2\chi$

### Método de Penman (1948)

Penman fue el primero que combinó factores que se tienen en cuenta en una fuente de energía y un mecanismo que elimine el vapor de agua de una superficie evaporante. Debemos reconocer a estos dos factores como ingredientes esenciales en la evaporación.

En la siguiente ecuación, el término  $E_b$  corresponde al modelo de balance de energía y considera la ecuación de conservación térmica, el término  $E_c$  representa el modelo aerodinámico, el cual toma en cuenta la capacidad de viento de transportar el vapor de agua lejos de la superficie evaporante.

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_b + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (5.9)$$

Penman derivó una ecuación para una cosecha de hierba bien regada.

$$E_{tp} = \frac{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6.43(1.0 + 0.53U_2)(e_s - e_d)}{\lambda} \quad (5.10)$$

donde:

- $E$  = potencial de evapotranspiración (en mm/día)
- $R_n$  = radiación neta (en  $Mj/m \cdot día$ )
- $G$  = densidad de flujo calórico para el suelo (en  $MJ/m \cdot día$ )
- $\lambda$  = calor latente de evaporación obtenido empíricamente.
- $u_2$  = velocidad media del viento a 2 m por encima del suelo (en m/s)
- $\Delta$  = pendiente de la curva temperatura-presión de vapor de saturación (en  $kPa/°C$ )
- $\gamma$  = constante psicrométrica (en  $kPa/°C$ )
- $e_s - e_d$  = déficit de presión de vapor determinada mediante la fórmula siguiente:

$$(e_s - e_d) = \frac{e_{s(Tmax)} + e_{s(Tmin)}}{2} - e_{s(Tds\ am)} \quad (5.11)$$

La pendiente de la curva temperatura-presión de vapor de saturación ( $\Delta$ ) se puede calcular conociendo la temperatura media a partir de la expresión siguiente:

$$\Delta = 0,200 [0,00738T + 0,80172] - 0,000116 \quad (5.12)$$

donde:

$\Delta$  se expresa en kPa/°C y T es la temperatura media en °C. Para calcular la constante psicrométrica es necesario calcular primero la presión atmosférica (P) que Doorenbos y Pruitt (1977) sugieren que se puede calcular a partir de la ecuación:

$$P = 101,3 - 0,01055 H \quad (5.13)$$

donde:

P se expresa en kPa y H es la altura sobre el nivel del mar (en m).

Usando P, el calor latente ( $\lambda$ ) y  $C_p$  el calor específico del agua a presión constante [0,001013kJ/kg/°C], se puede calcular la constante psicrométrica ( $\gamma$ ) (en kPa/°C) a partir de la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{c_p P}{0.622 \lambda} \quad (5.14)$$

El valor restante para calcular es la densidad de flujo calórico para el suelo, G (en MJ/m \* d), que se puede determinar a partir de la expresión que a continuación se describe, conociendo la temperatura media del aire para el periodo de tiempo anterior y posterior al momento de interés.

$$G = 4.2 \frac{(T_{i+1} - T_{i-1})}{\Delta t} \quad (5.15)$$

siendo:

- T = temperatura media del aire (en °C) para un periodo de tiempo i + 1 y i - 1
- $\Delta t$  = es el tiempo en días entre los puntos medios de periodos de tiempo i + 1 y i - 1



## Método de Penman-Monteith

El método de Penman-Monteith (1965) derivado de la ecuación de combinación. Relaciona la ecuación del balance de energía y los gradientes de humedad, temperatura y velocidad del viento. Con ella se elimina la necesidad de medidas en la superficie evaporante y medidas a diversas alturas sobre la superficie como requieren los métodos del "gradiente" y del "perfil del viento" respectivamente, como se venía haciendo hasta la introducción de esta ecuación. Combina información meteorológica y fisiológica y asume que las copas vegetales pueden asimilarse a una superficie uniforme como una única fuente de evaporación (big-leaf), lo que supone una considerable simplificación de la realidad, particularmente cuando se aplica a cubiertas estratificadas (multicapas) o con distintas superficies evaporantes (multifuentes).

La distribución dispersa y agrupada en mosaicos de vegetación típica de regiones semiáridas constituye un ejemplo de dónde no se satisface la fórmula de Penman-Monteith, por lo que trabajos posteriores extendieron el modelo a dos o más fuentes. La interacción entre fuentes se estudia como combinación de resistencias en serie y paralelo hasta una altura de referencia, por encima de la vegetación donde los efectos de la heterogeneidad espacial ya no son perceptibles.

En general, los modelos que toman de partida la ecuación de combinación, se basan en la teoría de la difusión turbulenta (teoría de la K, K-Theroy), para describir los flujos de calor, vapor de agua y momento a través de las copas. El uso de esta teoría para vegetación dispersa ha sido cuestionado tanto desde el punto de vista teórico como observacional., ya que asume que la longitud característica de los remolinos dominantes sea menor que la distancia sobre la cual los gradientes cambian apreciablemente. Esto no siempre ocurre en los rodales de vegetación dispersa.

Otras aproximaciones son los modelos que describen el sistema físico formado por el conjunto suelo-planta-atmósfera (SVAT) en un perfil unidimensional desde una profundidad de suelo determinada hasta la copa vegetal. El sistema considera tanto los flujos de agua como de energía y establece que el suelo y la vegetación actúan como almacén de agua que se llena y vacía por diferentes entradas y salidas. Los flujos están regulados por unos gradientes de concentración y unas resistencias. Se establecen diferentes capas, tanto en suelo como en vegetación, siendo este uno de los aspectos que diferencia distintos modelos SVAT, siendo más complejos cuanto mayor sea el número de capas considerado. Los mayores esfuerzos de estas aproximaciones radican en: el esfuerzo que supone la parametrización sobre todo en

suelo; la no consideración de la variabilidad espacial; y las premisas de condiciones de estado estacionario entre suelo y vegetación.

Diferentes trabajos han demostrado que las predicciones de ET obtenidas con modelos tipo SVAT no son significativamente diferentes de las obtenidas por modelos basados en la ecuación de combinación, por lo que la teoría de la K, sigue siendo ampliamente aceptada.

### **Método racional utilizando la curva de Hansen**

Todas las plantas cultivadas presentan etapas de crecimiento, floración y fructificación. Este método se basa en que las exigencias de humedad a través del ciclo vegetativo se conjugan en una sola curva determinada como promedio de todas las demás. Las etapas de crecimiento están relacionadas con las demandas de agua aún más estrechamente, que la edad misma de los cultivos.

Este método presenta una serie de ventajas:

- Reúne en una sola curva la información sobre las exigencias relativas de humedad de un cultivo a través de un ciclo vegetativo, eliminando así la necesidad de usar diferentes curvas para calcular los usos consuntivos.
- El factor climático "f" puede utilizarse ventajosamente por el dato de evaporación de cada distrito afinando dicho coeficiente con los estudios de control gravimétrico de humedad.
- El coeficiente de requerimiento de humedad puede adaptarse mejor a las condiciones de cada distrito afinando dicho coeficiente con los estudios de control gravimétrico de humedad del suelo, que se hayan realizado en las parcelas de prueba para diferentes cultivos y determinando en cada caso, los porcentos de hora-luz de cada distrito o área por regar.

El procedimiento de cálculo exige usar el siguiente camino:

- ❖ Obtener para cada mes el factor climático de Blaney y Criddle.
- ❖ Definase el punto que limita el desarrollo de longitud de la curva según el cultivo propuesto por Hansen.
- ❖ Precisar, en décimas, el tramo de la curva sobre el eje de las abscisas, el cual se divide en el número de meses que forman el ciclo vegetativo.
- ❖ Determinar el coeficiente de la etapa de desarrollo del cultivo ( $K_c$ ) de la curva única de Hansen

#### Formación de la curva de los consumos acumulados y frecuencias de los riesgos

- Obtenidas las láminas que se consumirán mensualmente se procede a la formación de la curva de consumos acumulados y se determinan las frecuencias con que deben aplicarse los diferentes riesgos, mediante el siguiente proceso:
- Trazar un sistema de ejes de coordenadas y colocar en el eje de las ordenadas una escala en centímetros que represente las láminas de agua acumuladas en cm, by en el eje de las abscisas el tiempo en días que dure el ciclo vegetativo del cultivo.
- Fijar en la gráfica los valores de los consumos mensuales en forma acumulada.

Las láminas de agua de riego requeridas para reponer la humedad consumida entre riegos, en el espesor del suelo considerado para alojar el sistema radicular, debe ser del mismo valor.

- Fijar en la curva los valores de las diferentes láminas de agua de consumos acumulados y en cada uno de los puntos donde intersecta a la curva, se trazan paralelas al eje de las ordenadas hasta cortar el eje de las abscisas para fijar los diferentes intervalos en que deberán aplicarse los riesgos.

5.- El resto de las variables se revisarán a partir de la evaluación que se realizará a la escala limnimétrica ubicada en el embalse del vaso, aplicando para ello la metodología del antitránsito, definiendo la evolución del embalse de la presa, por métodos analíticos.

El tránsito de avenidas en vasos tiene por objetivo principal obtener el hidrograma de salida de una presa a partir de proporcionarle el hidrograma de entrada. Este procedimiento resulta de gran utilidad, ya que algunas de las aplicaciones son:

- a) Definir políticas de operación de la obra de toma y del vertedor de demasías en base a un volumen y elevación conocidos en el vaso de almacenamiento, con la finalidad de no arriesgar las estructuras de la presa.
- b) Diseñar la obra de excedencias para conducir el volumen de agua que sobrepase la capacidad de almacenamiento del vaso.
- c) Calcular el NAME (Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias) y diseñar la obra de desvío y ataguías.

Para determinar el tránsito de avenidas en vasos se hace uso de la ecuación de continuidad que esta expresada por los siguientes términos (Aguilar, Ernesto et al. 1997:

$$O - I = \frac{dV}{dt} \quad (5.16)$$

En donde:

I = Gasto de entrada al vaso

O = Gasto de salida del vaso

$dV/dt$  = Variación del volumen almacenado en el tiempo

O bien expresado en diferencias finitas:

$$\frac{(I_i + I_{i+1})}{2} - \frac{(O_i + O_{i+1})}{2} = \frac{(O_i + O_{i+1})}{\Delta t} \quad (5.17)$$

Donde los subíndices  $i$  e  $i + 1$  expresan valores al comienzo y al final del intervalo de tránsito  $\Delta t$ , respectivamente.

En el tránsito de avenidas el valor  $\Delta t$  es considerablemente más pequeño en comparación al empleado en la simulación del funcionamiento de vasos; en el primero de los casos  $\Delta t$  es del orden de horas, mientras que en el segundo de ellos  $\Delta t$  es en general de un mes. Por esta razón, durante el tránsito de una avenida los términos de la lluvia directa en el vaso, la evaporación y la infiltración tienen valores muy pequeños y son ignorados.

A partir de la ecuación anterior, se define el Tránsito inverso modificado para la estimación de avenidas de ingreso en vasos y cuya expresión es la siguiente:

$$I_{j+1} = O_{j+1} + \frac{S_{j+2} - S_j}{2\Delta t} \quad (5.18)$$

Denominado Método de diferencias centrales.

6.- Con base a los resultados que se obtengan, se propondrán alternativas para eficientar la operación de la presa Francisco Zarco al mejorar el balance hidrológico de la misma. Así mismo se propondrán alternativas para rediseñar la red de estaciones hidrológicas existentes en la cuenca media del río Nazas, principalmente en la ubicación de las estaciones que tengan una influencia directa en el balance del vaso de la presa Francisco Zarco.

Actualmente, la presa Francisco Zarco cuenta con una estación hidrométrica denominada Cañón Fernández II, ubicada aguas abajo de la obra de toma que sirve para medir las extracciones que se hagan al vaso con la finalidad de suministrar los volúmenes de agua demandados en el área de cultivo del Distrito de Riego 017 Región Lagunera. Existe la estación climatológica Cañón Fernández ubicada en las márgenes del vaso, a un costado del vertedor de demasías y de la cual se obtienen datos de precipitación y evaporación requeridos en el balance del vaso. Se cuenta con una escala limnimétrica localizada entre la cortina de la presa y el vertedor de demasías y con la cual se obtienen las elevaciones del espejo del agua, referenciada al nivel medio del mar y a partir de este valor se obtiene el volumen de almacenamiento y las áreas del embalse.

15 km aguas arriba de la curva de Aguas Máximas Ordinarias de la presa Francisco Zarco, se localiza la estación hidrométrica “Agustín Melgar”, en la cual se miden los volúmenes de aportación al vaso de esta obra de almacenamiento. Casi la totalidad de los escurrimientos provenientes de la presa Lázaro Cárdenas (trasvaso) y los generados por cuenca propia, se miden en este sitio de aforo, excepto los que aporta el arroyo Cuencamé, corriente que entra directamente al vaso, sin ser aforada.

Normalmente, las extracciones de agua a la presa Francisco Zarco, para suministro de agua al ciclo de riego, inicia a principios del mes de marzo, interrumpiéndose temporalmente en el mes de abril y continuando hasta agosto o septiembre. Los meses de enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre permanece cerrada, excepto en años donde a causa de aportaciones extraordinarias, se tenga que realizar desfogues de volúmenes de agua que se ubiquen en los niveles desuperalmacenamiento.

Las presas del sistema Río Nazas, tienen su estructura vertedora controlada mediante compuertas radiales y en el caso de la presa Francisco Zarco, el vertedor es utilizado para derivar tanto volúmenes de operación para el ciclo de riego, como para desfogar volúmenes excedentes.

La información climatológica, hidrométrica y limnimétrica generada en estos sitios de monitoreo hidrológico, en condiciones hidrometeorológicas normales, se reporta diariamente a través de sistemas de radiocomunicación a la Dirección General del Organismo de Cuenca y en situaciones de alerta o emergencia hidrometeorológica, se reducen los intervalos de reporte según la situación prevaleciente en la cuenca hidrológica. Esta información, es utilizada en la generación de diversos reportes y principalmente en la actualización diaria del balance de la presa Francisco Zarco.

La totalidad de la información que se utiliza en el balance hidrológico de la presa Francisco Zarco, proviene de estaciones convencionales, con equipo de observación directa y donde se tiene al menos una persona que diariamente mide, registra, procesa y reporta la información a la base del Organismo de Cuenca.

## VI.- Revisión de los datos y de la metodología propuesta:

### 1.- Inventario total de aprovechamientos de agua superficial del río Nazas (autorizados y clandestinos) en el tramo comprendido entre las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco y la superficie de riego en los módulos I Rodeo y II Nazas.

Existen inventarios actualizados por el Organismo de Cuenca Cuencas Centrales del Norte de la Comisión Nacional del Agua, en los cuales se relacionan principalmente los aprovechamientos autorizados o incluidos en el padrón de usuarios de las aguas superficiales del Distrito de Riego 017, por citar el más reciente, Estudio de Factibilidad de 3 presas derivadoras en los módulos de riego I Rodeo y II Nazas del Distrito de Riego 017 Región Lagunera. Municipios de Rodeo y Nazas, estado de Durango, realizado en 2006, en este documento se registran principalmente la superficie beneficiada y el volumen utilizado para riego y derivado del cauce del río Nazas, hasta este nivel, este dato es de utilidad para los objetivos del presente estudio (ver Tabla 4)

MODULO I RODEO											
CANAL	LONGITUD KM	SUPERFICIE EDJIDO HAS	SUPERFICIE P.P. HAS	SUPERFICIE TOTAL HAS	GASTO M3/SEG	NUMERO USUARIOS EJIDO	NUMERO USUARIOS P.P.	NUMERO USUARIOS TOTAL	TIPO DE REPRESA DERIVADORA	PRESA DERIVADORA	TIPO DE REPRESA
TRINIDAD	10.025	314.12	114.12	428.24	0.6	80	11	91	RUSTICA	TRINIDAD	RUSTICA
GUADALUPE	12.767	343.96	0	343.96	1.8	97	0	97	RUSTICA	GUADALUPE	RUSTICA
SAN SALVADOR	3.985	261.25	0	261.25	0.4	65	0	65	CONCRETO	SAN SALVADOR	CONCRETO
STA. BARBARA	8.15	336.62	0	336.62	0.5	104	0	104	RUSTICA	STA. BARBARA	RUSTICA
RODEO	7.342	267.18	91.5	358.68	0.5	74	12	86	RUSTICA	RODEO	RUSTICA
PARIAN	12.117	157.95	0	157.95	0.3	57	0	57	RUSTICA	PARIAN	RUSTICA
ANGOSTURA	10.06	164	0	164	0.3	40	0	40	RUSTICA	ANGOSTURA	RUSTICA
ANIMAS	7.009	97.5	0	97.5	0.2	32	0	32	RUSTICA	ANIMAS	RUSTICA
AMOLE	7.189	99.5	0	99.5	0.2	56	0	56	RUSTICA	AMOLE	RUSTICA
<b>TOTAL</b>	<b>78.644</b>	<b>2042.08</b>	<b>205.62</b>	<b>2247.7</b>	<b>4.8</b>	<b>606</b>	<b>23</b>	<b>628</b>			

MODULO II VILLA DEL NAZAS											
CANAL	LONGITUD KM	SUPERFICIE EDJIDO HAS	SUPERFICIE P.P. HAS	SUPERFICIE TOTAL HAS	GASTO M3/SEG	NUMERO USUARIOS EJIDO	NUMERO USUARIOS P.P.	NUMERO USUARIOS TOTAL	TIPO DE REPRESA DERIVADORA	PRESA DERIVADORA	TIPO DE REPRESA
LAS LIEBRES	8.64	100	0	100	0.35	50	0	50	RUSTICA	LAS LIEBRES	RUSTICA
STA. BARBARA II	6.145	61.5	33	94.5	0.5	41	1	42	RUSTICA	STA. BARBARA II	RUSTICA
SAN ISIDRO	7.423	0	132.04	132.04	0.5	0	9	9	RUSTICA	SAN ISIDRO	RUSTICA
STA. BARBARA II	11.74	94	141.71	235.71	0.5	26	7	33	RUSTICA	STA. BARBARA II	RUSTICA
EL PUEBLO	8	151	127	278	0.6	51	22	73	RUSTICA	EL PUEBLO	RUSTICA
LA FLOR	7.85	284.6	50.59	335.19	0.6	82	6	88	RUSTICA	LA FLOR	RUSTICA
EL RANCHITO	8.94	212	55.03	267.03	0.6	82	12	94	RUSTICA	EL RANCHITO	RUSTICA
SAN ANTONIO	11.6	465.5	0	465.5	0.6	129	0	129	RUSTICA	SAN ANTONIO	RUSTICA
STA. CLARA	13.6	384.95	44	428.95	0.6	136	2	138	RUSTICA	STA. CLARA	RUSTICA
CONEJO	9.35	0	174	174	0.6	0	20	20	RUSTICA	CONEJO	RUSTICA
S.P. TONGO	6.75	153	143	296	0.6	46	10	56	RUSTICA	S.P. TONGO	RUSTICA
E. CARRANZA	13.926	948	48	996	1.5	281	2	283	RUSTICA	E. CARRANZA	RUSTICA
<b>TOTAL</b>	<b>116.964</b>	<b>2854.66</b>	<b>948.37</b>	<b>3802.92</b>	<b>7.66</b>	<b>924</b>	<b>91</b>	<b>1015</b>			

**Tabla 4.- Inventario de aprovechamientos en los módulos I Rodeo y II Villa del Nazas**

Existen aprovechamientos clandestinos y ubicados en particular agua abajo de la estación hidrométrica "Agustín Melgar", mismos que se han determinado a través de recorridos de

campo, pero no derivan gastos importantes que puedan representar los volúmenes de agua que actualmente se pierden entre este punto de medición hidrométrica y el vaso de la presa Francisco Zarco. Es deseable tener el inventario de los aprovechamientos clandestinos, sin embargo para los fines de este trabajo se considerarán los que se tengan a la mano.

En la Tabla 4 se muestra información importante relacionada con la superficie regada y el gasto utilizado en los Módulos I Rodeo y II Nazas, cabe hacer el comentario que esta la superficie se mantiene prácticamente constante en cada ciclo de riego, debido a que en estos módulos se tiene un área aprovechable con fines agrícolas limitada y principalmente destinada a cultivos perenes, como son nogal y alfalfa. Considerando lo anterior, se puede asumir que cada año, en estos módulos se utiliza un promedio de 12.46 m<sup>3</sup>/s, dato que nos permitirá obtener la eficiencia de conducción, además de que este dato se podrá considerar para evaluar el cálculo de las aportaciones deducidas en el vaso de la presa Francisco Zarco.

En esta tabla también se menciona el número de usuarios beneficiados en los Módulos de Riego y la infraestructura que utilizan para derivar agua desde el río hacia los canales de distribución en las parcelas, resaltando que son obras hidráulicas muy rústicas y sin un diseño apropiado o al menos eficiente para los fines que fueron construidos.

## **2.- Diferenciación de los volúmenes de entrada a la presa Francisco Zarco.**

Se propuso analizar el período enero-junio 2008, meses que fueron muy secos en la cuenca media del río Nazas, lo cual nos permitió prescindir de utilizar métodos (herramienta ArcGis) indirectos para la cuantificación de escurrimientos en su lugar, enfocarse a aprovechar la información disponible en las bases de datos de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (BANDAS), en la del Servicio Meteorológico Nacional, tanto de estaciones convencionales como automáticas y en el Inventario de Presas de la Comisión Nacional del Agua.

Considerando que para el presente estudio y con la finalidad de diferenciar de manera sencilla los escurrimientos que se originan en la cuenca media del río Nazas de lo que es trasvase de la presa Lázaro Cárdenas a la Presa Francisco Zarco, se propuso considerar, como ya se mencionó, solo el período de estiaje de enero a junio de 2008, dentro del cual, a través de la metodología propuesta por la NORMA Oficial Mexicana 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, podemos separar fácilmente lo anterior a partir de lo siguiente:

**Disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica. Se determina en el cauce principal en la salida de la cuenca hidrológica, mediante la siguiente expresión:**

$$\begin{array}{l} \text{DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL} \\ \text{DE AGUA SUPERFICIAL EN LA} \\ \text{CUENCA HIDROLOGICA} \end{array} = \begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL} \\ \text{DE ESCURRIMIENTO} \\ \text{DE LA CUENCA HACIA} \\ \text{AGUAS ABAJO} \end{array} - \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL ACTUAL} \\ \text{COMPROMETIDO AGUAS ABAJO} \end{array}$$

**El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo del sitio de interés, se determina al aplicar la siguiente expresión:**

$$\begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO} \\ \text{ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO DE LA} \\ \text{CUENCA HACIA AGUAS} \\ \text{ABAJO} \end{array} = \begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO} \\ \text{ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO} \\ \text{DESDE LA CUENCA} \\ \text{AGUAS ARRIBA} \end{array} + \begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO} \\ \text{ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO} \\ \text{NATURAL} \end{array} + \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{RETORNOS} \end{array} \\ + \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{IMPORTACIONES} \end{array} - \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{EXPORTACIONES} \end{array} - \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL DE} \\ \text{EXTRACCION DE} \\ \text{AGUA SUPERFICIAL} \end{array}$$

Para efectos de la presente Norma Oficial Mexicana, las definiciones de los términos que se indican en el balance, se definen en el Glosario de Términos que se incluye en este estudio.

Ahora bien, considerando la terminología anterior, para el presente estudios, los valores de balance en base al criterio de la NORMA Oficial Mexicana 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, podemos determinar cada variable.

Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo = 0 m<sup>3</sup>

Volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba = Extracciones a la presa Lázaro Cárdenas



Volumen medio anual de escurrimiento natural =  $0 \text{ m}^3$

Volumen anual de retornos =  $0 \text{ m}^3$

Volumen anual de importaciones =  $0 \text{ m}^3$

Volumen anual de exportaciones =  $0 \text{ m}^3$

Volumen anual de extracción de agua superficial = Programa de extracciones a la presa Francisco Zarco

De esta manera y para el período de interés del presente estudios que comprende de enero a junio de 2008, el análisis de la información se limita a los escurrimientos producto de los trasvasos de la presa Lázaro Cárdenas a la presa Francisco Zarco.

Para el inicio del ciclo de riego primavera-verano de 2008, no se habían registrado precipitaciones en la cuenca media del río Nazas y las principales corrientes aportadoras no mostraban escurrimiento, facilitando la diferenciación de los volúmenes de entrada a la presa Francisco Zarco y además esto permite calcular una eficiencia de conducción de caudales entre la presa Lázaro Cárdenas y la estación hidrométrica Agustín Melgar, considerando para este cálculo las derivaciones que se hacen para satisfacer las demandas de agua para riego en los módulos I Rodeo y II Villa de Nazas.

El Distrito de Riego 017 Región Lagunera, maneja una eficiencia de conducción para este tramo del 95% y es lo que se determina en la tabla No. 5, pero se pueden notar valores muy altos al inicio del ciclo de extracciones, esto se debió a que los usuarios de los módulos de riego, aún no estaban preparados en su totalidad para aprovechar el agua del riego en sus cultivos, derivándose muy poco volumen desde el río Nazas a los canales de riego.

Así mismo los valores arriba del 100%, son consecuencia de los ajustes al gasto de extracción en la presa Lázaro Cárdenas, y se debe tomar en cuenta que el valor del aforo utilizado es el medido a las 6:00 horas en ambas estaciones hidrométricas; El Palmito II (salida presa Lázaro Cárdenas) y Agustín Melgar (entrada a la presa Francisco Zarco).

En forma general, se define como eficiencia en el uso del agua, a la relación entre el volumen de agua utilizado con un fin determinado y el volumen extraído o derivado de una fuente de abastecimiento con ese mismo fin.

Expresado en forma funcional se tiene:

$$E_f = \frac{V_u}{V_e} \quad (6.1)$$

Donde:

$E_f$  - Eficiencia, adimensional;

$V_u$  - Volumen utilizado , m<sup>3</sup>;

$V_e$  - Volumen extraído de la fuente de abastecimiento, m<sup>3</sup>.

Para el caso, se hará referencia a la eficiencia en el uso del agua para riego, por lo que la eficiencia general se puede dividir en varios componentes (ver anexo), siguiendo la propuesta de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje, (citado por Burman et al., 1981). La eficiencia del uso del agua para riego, se puede dividir en tres componentes que son: la eficiencia de almacenamiento, la de conducción y la de riego, propiamente dicha.

Ahora bien, aplicando la metodología antes descrita para evaluar las eficiencias de conducción en los trasvaso de volúmenes de agua de la presa Lázaro Cárdenas a la presa Francisco Zarco y utilizando caudales en vez de volúmenes de la Tabla 5, se determinarían simplemente por medio de la razón del valor medido en las estaciones hidrométricas "Agustín Melgar" y "El Palmito", expresado en porcentaje. Por ejemplo, para el día 11 de marzo de 2008, tenemos un valor de gasto en "El Palmito" de 90.012 m<sup>3</sup>/s y 84.153 m<sup>3</sup>/s en "Agustín Melgar", entonces:

$$84.153/90.012 = 0.93$$

$$0.93 \times 100 = 93\%$$



**Figura 18.- Croquis de localización de presas, estaciones hidrométricas y módulos de riego del Distrito 017 Región Lagunera.**

Lo que indica que para el día 11 de marzo de 2008, el 93% del agua extraída de la presa Lázaro Cárdenas estaba llegando a la estación hidrométrica “Agustín Melgar” y siendo aforada en este sitio, es decir, en el trayecto del trasvaso, del caudal extraído, se están consumiendo, ya sea utilizándose o perdiéndose por evaporación o por infiltración,  $6.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Si se comparan estos valores con los obtenidos en los módulos de riego I Rodeo y II Villa del Nazas, notamos que se tiene una eficiencia promedio del 95% y una mínima eficiencia del 92% durante el mes de marzo y principios del abril, lo que indicaría que actualmente se están consumiendo en el tramo del río Nazas comprendido entre la presa Lázaro Cárdenas y la presa Francisco Zarco (ver Figura 18) un gasto promedio de  $4.6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

De la Tabla 6, podemos ver que la extracción promedio para utilizarse en los programas de riego de los módulos I y II del Distrito 017, es de  $7.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo cual nos indica que la eficiencia de

conducción obtenida es de aproximadamente 92%, no siendo un valor que pudiese resultar de importancia en la realización del balance hidrológico en el vaso de la presa Francisco Zarco.

Existe mucha incertidumbre en estos valores de eficiencia de conducción obtenidos por el Distrito de Riego 017 Región Lagunera, pero al comparar con los volúmenes entregados a los módulos de riego, resulta que son valores muy cercanos a lo que debe estar ocurriendo en este tramo del río Nazas.



**Figura 19.- Ubicación de estaciones hidrológicas con respecto a la presa Francisco Zarco.**

**Eficiencia de conducción en el tramo Lázaro Cárdenas-Agustín Melgar del río Nazas**

Fecha	Gasto Palmito (m3/s)	Gasto Agustín Melgar (m3/s)	Eficiencia (%)
27/02/2008	0.625	0.375	-----
28/02/2008	120.386	0.375	-----
29/02/2008	120.362	0.375	-----
01/03/2008	120.361	112.984	0.94
02/03/2008	120.337	120.015	1.00
03/03/2008	100.214	117.919	0.98
04/03/2008	90.121	115.357	0.96
05/03/2008	90.144	102.838	1.03
06/03/2008	90.002	82.691	0.92
07/03/2008	90.066	83.745	0.93
08/03/2008	90.008	84.487	0.94
09/03/2008	90.13	83.569	0.93
10/03/2008	90.055	83.639	0.93
11/03/2008	90.012	84.153	0.93
12/03/2008	90.02	84.884	0.94
13/03/2008	90.116	85.826	0.95
14/03/2008	90.171	85.698	0.95
15/03/2008	90.123	85.078	0.94
16/03/2008	90.123	85.13	0.94
17/03/2008	89.95	84.671	0.94
18/03/2008	90.18	84.467	0.94
19/03/2008	90.152	84.393	0.94
20/03/2008	90.132	85.047	0.94
21/03/2008	90.144	85.584	0.95
22/03/2008	89.976	86.752	0.96
23/03/2008	90.018	86.294	0.96
24/03/2008	90.103	85.601	0.95
25/03/2008	89.989	85.527	0.95
26/03/2008	89.998	86.445	0.96
27/03/2008	90.102	85.212	0.95
28/03/2008	69.562	85.783	0.95
29/03/2008	69.634	85.619	0.95
30/03/2008	0.6	63.983	0.92
31/03/2008	0.634	64.998	0.93
01/04/2008	0.6	22.076	-----
<b>Eficiencia de conducción promedio</b>			<b>0.95</b>
<b>Eficiencia de conducción máxima</b>			<b>1.03</b>
<b>Eficiencia de conducción mínima</b>			<b>0.92</b>

**Tabla 5.-Aforos practicados durante el trasvase para el riego de presiembra y Eficiencias de conducción en el tramo Lázaro Cárdenas-Agustín Melgar**

**Aforos realizados durante el año 2008  
en los módulos I Rodeo y II Villa del Nazas**

MARZO	MODULO	
	I	II
9	2.912	1.600
10	2.912	1.600
11	2.910	4.365
12	2.900	4.365
13	2.930	4.680
14	2.930	4.680
15	2.950	4.400
16	2.955	4.700
17	2.800	4.800
18	2.800	4.830
19	2.780	4.800
20	2.700	4.920
21	2.750	4.930
22	2.700	4.940
23	2.750	4.780
24	2.750	4.940
25	2.800	4.870
26	2.800	4.900
27	2.800	4.900
28	2.800	4.880
29	2.800	4.900
30	2.800	4.700
31	2.800	3.750
<b>ABRIL</b>	-----	-----
9	-----	3.200
10	-----	3.150
11	-----	2.000
<b>Promedio/módulo</b>	<b>2.827</b>	<b>4.253</b>
<b>Promedio general</b>		<b>7.080</b>

**Tabla 6.- Aforo total obtenido de la entrega de volúmenes de agua a los módulos I Rodeo y II Villa del Nazas.**

**Diferencias entre las pérdidas por conducción y el volumen aprovechado durante 2008 en los módulos I Rodeo y II Villa del Nazas**

Fecha	Eficiencia de conducción	Pérdidas por conducción (m <sup>3</sup> /s)	Gasto utilizado en los módulos de riego (m <sup>3</sup> /s)	Diferencia (m <sup>3</sup> /s)
09-mar	0.93	6.31	4.51	1.80
10-mar	0.93	6.30	4.51	1.79
11-mar	0.93	6.30	7.28	-0.97
12-mar	0.94	5.40	7.27	-1.86
13-mar	0.95	4.51	7.61	-3.10
14-mar	0.95	4.51	7.61	-3.10
15-mar	0.94	5.41	7.35	-1.94
16-mar	0.94	5.41	7.66	-2.25
17-mar	0.94	5.40	7.60	-2.20
18-mar	0.94	5.41	7.63	-2.22
19-mar	0.94	5.41	7.58	-2.17
20-mar	0.94	5.41	7.62	-2.21
21-mar	0.95	4.51	7.68	-3.17
22-mar	0.96	3.60	7.64	-4.04
23-mar	0.96	3.60	7.53	-3.93
24-mar	0.95	4.51	7.69	-3.18
25-mar	0.95	4.50	7.67	-3.17
26-mar	0.96	3.60	7.70	-4.10
27-mar	0.95	4.51	7.70	-3.19
28-mar	0.95	3.48	7.68	-4.20
29-mar	0.95	3.48	7.70	-4.22
<b>Promedio</b>	<b>0.95</b>	<b>4.84</b>	<b>7.30</b>	<b>-2.46</b>

**Tabla 7.- Diferencias diarias entre las pérdidas por conducción y los volúmenes de agua extraídos para riego en los módulos I Rodeo y II Villa del**

De la Tabla 7, es interesante resaltar, que a través de los cálculos de la eficiencia de conducción, obtenemos las pérdidas por conducción y en la mayoría de los casos, la magnitud de las pérdidas es menor que la magnitud de los caudales utilizados para riego en los módulos I y II, lo que nos indica que estas pérdidas deberían ser mayores, ya que falta agregarle a este concepto las pérdidas por infiltración y por evaporación.

De lo anterior se concluye que las eficiencias de conducción obtenidas por el Distrito de Riego 017 no reflejan realmente las pérdidas por conducción en el tramo de interés del río Nazas ya



sea porque se están aforando con error las extracciones a la presa Lázaro Cárdenas (en la estación hidrométrica El Palmito II) o bien las aportaciones a la presa Francisco Zarco (en la estación hidrométrica Agustín Melgar).

### MODULO I RODEO

Aforo: Se realizaron aforos en los puntos de inicio de los canales principales los cuales se les hizo entrega al personal del módulo y Jefe de unidad respectivo.

**Tabla 8.- Cuadro de aforos (LPS)**

CANAL PRINCIPAL	PUNTO	PUNTO	DISTANCIA
	INICIAL	FINAL	M
GUADALUPE	476	398	3950
TRINIDAD	514	589	3440
SALVADOR	471	336	1300
SANTA BARBARA	577	477	700
RODEO	561	500	1650
PARIAN	384	548	4455
ANGOSTURA	250	142	750
ANIMAS	250	127	4450
AMOLES	208	178	950

Eficiencias: se determinó la eficiencia de conducción y las pérdidas de conducción (PA), utilizando el método de entradas y salidas

**Tabla 9.- Cuadro de eficiencias. MODULO I RODEO**

CANAL PRINCIPAL	PA	EC
	lps/100 m	%
GUADALIPE	1.97	84
TRINIDAD	-2.18	115
SALVADOR	10.38	71
SANTA BARBARA	14.29	83
RODEO	3.70	89
PARIAN	-3.68	143
ANGOSTURA	14.40	57
ANIMAS	2.76	51
AMOLES	3.16	86

Nota: Pa: Pérdidas de Agua, Ec: Eficiencia de Conducción

**MODULO II NAZAS**

**Tabla 10.- Cuadro de Aforos (LPS) en el Modulo II, Nazas en el mes de marzo**

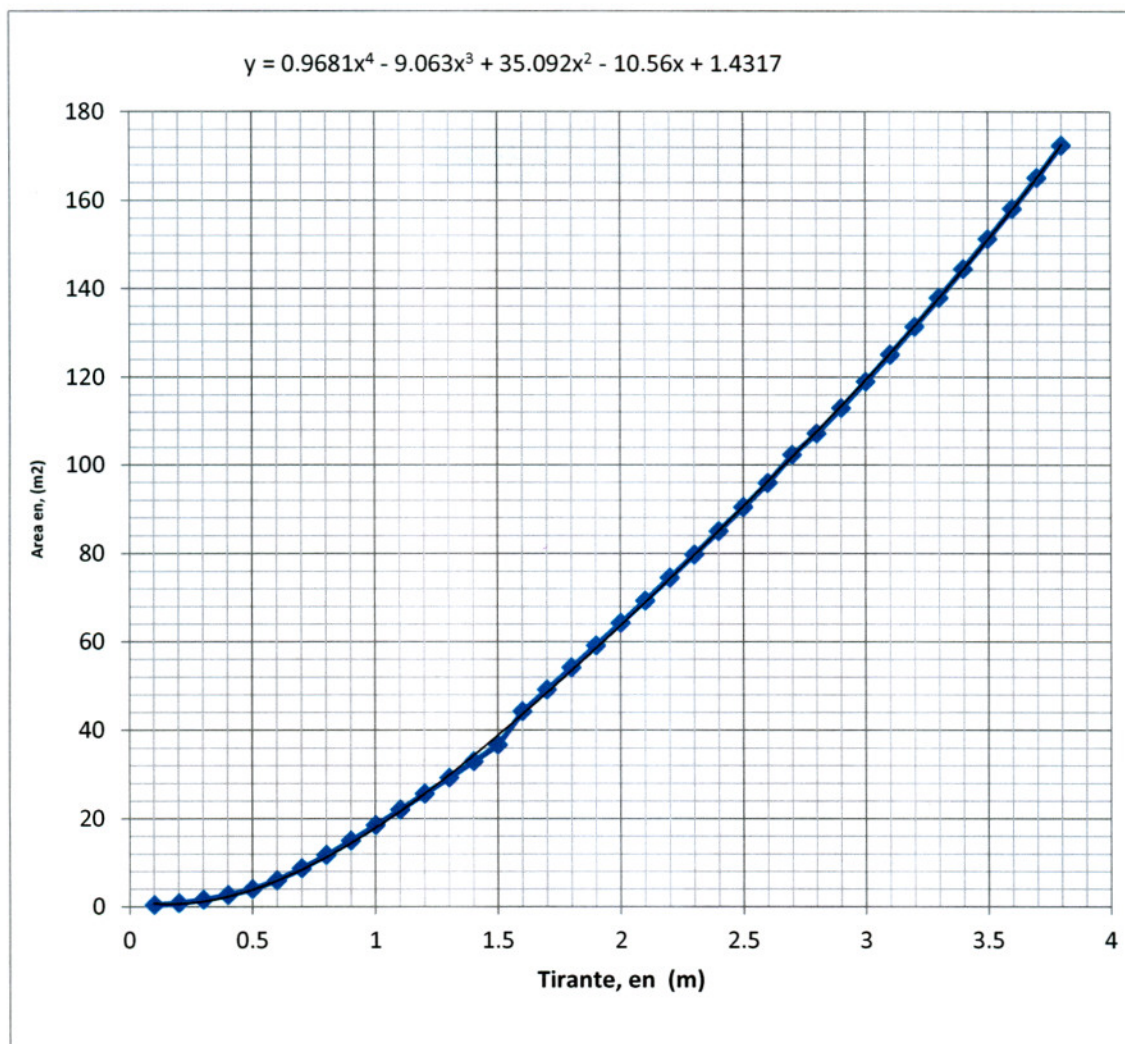
Canal	Marzo 2008												
	13	14	15	17	18	20	21	22	23	24	25	27	28
Emilio Carranza	1131	1100	989	903	1060	1149	1229		1198		1260	1165	
El Ranchito	545			341						610		682	
Santa Clara	521			648							762	586	
El Tongo	634			442	422						667	713	
El Sovaco	571				674						482	462	
El Conejo	500				708						229	323	
San Antonio	790				624						466	454	
La Flor	459				660					578		687	
El Pueblo	570				918					859			712
Santa Bárbara I		312			616					371		465	
Santa Bárbara II		363			322					396			290
Las Liebres		360			265					449			407
San Isidro		436			599					370			154
Las Auras		408			281								

**3.- Evaluación de la eficacia de la estación hidrométrica Agustín Melgar.**

La estación hidrométrica Agustín Melgar, es la más importante en el balance de agua superficial tanto en la cuenca media del río Nazas como de la misma presa Francisco Zarco. En los últimos años, el emplazamiento, el método de medición y la precisión del propio método han sido muy cuestionados en cuanto a su eficacia para la determinación de los volúmenes de entrada a la presa Francisco Zarco.

Para evaluar lo anterior y evidenciar la existencia de algún error en la operación de esta estación, se evaluaron los aforos por medio de análisis estadístico, particularmente revisando aforo por aforo y se determinaron las posibles causas de error.

En una primera aproximación, se trató de correlacionar la escala con el área de la sección, esto con la finalidad de bajar un nivel en el proceso de cálculo del gasto que realiza el aforador, esto es, se eliminó un paso como posible factor de error en la determinación del caudal total que transita por la sección de aforo.



**Figura20.- Curva de ajuste para los valores de tirante y área obtenidos a partir de levantamiento topográfico de la sección de aforos de la estación hidrométrica “Agustín Melgar”.**

Utilizando un ajuste de regresión lineal múltiple para los tirantes y áreas obtenidas a partir de la topografía practicada en el tramo del río Nazas donde se ubica la sección de aforos, se obtuvo la siguiente curva con su ecuación, a partir de la cual se generarán los valores que se comparan con los datos de área, velocidad y gasto observado.

En la Tabla 11 se puede notar claramente que existe un desfase entre los tirantes reales de la sección y los observados con relación a su área hidráulica asociada, resultando menor el área que se obtiene por medio de la topografía que la que determina el aforador por medio de los sondeos que practica en cada aforo. En este punto es relevante mencionar si las profundidades

a las que se está introduciendo el molinete para la medición de la velocidad, considerando el método de los 6/10, es la correcta o se está subestimando la velocidad del flujo.

En este punto, también resulta interesante determinar si toda el área hidráulica de la sección se considera efectiva tomando en cuenta que el perfil del río se profundiza particularmente a la altura de la sección de aforos.

Los datos contenidos en la Tabla 11, nos dan información referente a la posibilidad de que la práctica de aforos no se esté realizando correctamente o al menos la técnica de sondeo con escandallo, la cual puede estar generando errores al estarse utilizando equipo no apropiado para las condiciones de esta sección de aforo, en la cual no se cuenta con retenida ni transportador para minimizar el efecto de arrastre del equipo por la corriente de agua.

Datos de la topografía		Datos medidos		(h) - (h')	velocidad	Gasto
(h)	(A)	(h')	(A')		Observada	Topografía
0.0	0					0
0.3	1.18512061	1.13	1.59	0.83	0.02	0.02370241
0.4	2.26717136	1.14	2.22	0.74	0.02	0.04534343
0.5	3.85233125	1.21	3.88	0.71	0.031	0.11942227
0.6	5.89667776	1.35	5.87	0.75	0.062	0.36559402
1.0	17.8688	1.45	17.8	0.45	0.3214	5.74303232
1.1	21.63156221	1.52	21.78	0.42	0.395	8.54446707
1.9	58.50307901	2.2	58.9	0.3	0.936	54.758882
2.0	63.6653	2.28	63.25	0.28	1.011	64.3656183
2.1	68.90668261	2.34	68.38	0.24	1.095	75.4528175
2.2	74.22047936	2.51	74.2	0.31	1.151	85.4277717
2.3	79.60226621	2.6	79.7	0.3	1.281	101.970503
2.5	90.56373125	2.8	90.56	0.3	1.351	122.351601
3.2	131.5180386	3.37	131.82	0.17	1.443	189.78053
3.3	137.847561	3.38	136.92	0.08	1.455	200.568201
3.4	144.3497562	3.47	143.4	-0.07	1.554	224.319521
3.5	151.0480813	3.63	151.14	0.13	1.633	246.661517
3.6	157.968317	3.82	157.62	0.22	1.877	296.506531
3.7	165.1385674	3.82	163.5	0.12	1.828	301.873301
3.8	172.5892602					

**Tabla 11.- Comparación de los valores obtenidos por medio de la curva elevación-área del levantamiento topográfico y los datos observados en la sección de aforos de la estación hidrométrica "Agustín Melgar".**

La topografía de la sección de aforo utilizada en este estudio, se realizó a principios de 2008, siendo congruente con los datos de aforo. Cabe señalar que el estudio topográfico comprendió solo 500 m aguas arriba y 500 m aguas abajo de la sección de aforo y se realizó con equipo automático, en particular una estación topográfica total marca Leica.

**4.- Obtención por métodos indirectos de la lámina de evaporación, tomando para ello la información meteorológica registrada en la Estación Meteorológica Automática(EMA) “Agustín Melgar”, ubicada a 15 km del vaso de la presa Francisco Zarco.**

En el presente trabajo, se utilizaron dos procedimientos para determinar la evapotranspiración por métodos indirectos y compararla con la evaporación potencial obtenida a través del tanque evaporímetro tipo A instalado en las proximidades del vado de la presa Francisco Zarco. Los procedimientos utilizados son uno que se basa en la fórmula semiempírica de H. L. Penman (1948), la cual combina la fórmula de Dalton previamente multiplicada por una función de la velocidad del viento, con el método de balance de energía, para obtener una expresión que permite estimar la evaporación desde una superficie de agua sin tener que evaluar el término  $e_s$ , que es la presión de vapor de saturación para la temperatura del agua superficial” (D. F. Campos Aranda. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. p. 7-20).

El segundo procedimiento utilizado es el propuesto por The Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration of the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, (ASCE) cuyo propósito es estandarizar una ecuación para evapotranspiración de referencia y sus procedimientos de cálculo, llevando a cálculos comunes para una evapotranspiración (ET) de referencia y proveer bases estandarizadas para determinar o transferir coeficientes de cultivo para uso agrícola o de paisaje. Las bases de la ecuación de evapotranspiración de referencia estandarizada es el Método ASCE Penman-Monteith del Manual No. 70

El propósito de la ecuación de evapotranspiración de referencia y el procedimiento de cálculo es llevar de manera común al cálculo de la evapotranspiración de referencia y proveer una base estandarizada para determinar o transferir coeficientes de cultivo para uso agrícola o de suelo desnudo. Las bases de la ecuación de evapotranspiración de referencia es el Método Penman-Monteith (ASCE –PM) del manual 70 ASCE. Para la estandarización, el método ASCE-PM es aplicado para dos tipos de superficies de referencia representando zacate corto (cultivo corto y

de superficie suave) y alfalfa (un cultivo agrícola más rugoso y más alto) y la ecuación es simplificada a una forma reducida del ASCE-PM. Los cálculos estandarizados para la presión de vapor, radiación neta y velocidad del viento ajustada son recomendadas para aplicaciones de cálculos de paso de tiempo horario y diario. Las directrices en la evaluación de la integridad de los datos meteorológicos y valores estimados para datos faltantes son proporcionadas.

### **Método de Penman**

En primera instancia, utilizaremos la ecuación de la fórmula de Penman propuesta en su trabajo por A. R. Ocón en estudio del 2000 y aplicado para el Cálculo de la evaporación en el lago de Chapala, donde la ecuación combina el modelo de balance de energía y el de transferencia de masa o aerodinámico y a continuación se describen.

### **Modelo de balance de energía**

Este modelo se basa en la ecuación de conservación de energía térmica y aunque es el que da mejores resultados (Campos, 1984; Winter 1981), su aplicación no es muy frecuente por su complejidad y la gran cantidad de variables medidas en campo que son necesarias para su solución. La ecuación para el cálculo de la evaporación en este caso (Chow et al., 1994):

$$E_b = \frac{R_n}{l_v \rho_w} \quad (6.2)$$

Donde  $E_b$  es la evaporación debida a la radiación solar (m/s),  $R_n$  la radiación solar neta en ( $W/m^2$ ),  $l_v$  el calor latente de vaporización en (J/kg) y  $\rho_w$  la densidad del agua en ( $kg/m^3$ ).

Para el caso de la  $R_n$ , se utilizaron los valores obtenidos en la EMA Agustín Melgar y los cuales se muestran en la Tabla 12.

Para estimar el valor de la presión de vapor del aire se utiliza la fórmula de la humedad relativa y la de presión de vapor de saturación.

$$HR = \frac{e}{e_s} \quad (6.3)$$

HR es la humedad relativa (Tabla 12), la cual fue medida en la EMA Agustín Melgar.

Por otro lado, se tiene que (Chow et al., 1994):

$$e_s = 611 \exp\left(\frac{17.27T}{237.3 + T}\right) \quad (6.4)$$

Donde T es la temperatura en ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $e_s$  es la presión de vapor de saturación en ( $\text{P}_a$ ).

Para el cálculo del calor latente de vaporización en ( $\text{J/kg}$ ), se usa la expresión (Chow et al., 1994):

$$l_v = 2.501 \times 10^6 - 2370T \quad (6.5)$$

Donde T es la temperatura en ( $^{\circ}\text{C}$ ).

La densidad del agua, para el caso que nos ocupa, se consideró como constante con un valor de  $998 \text{ kg/m}^3$ , que corresponde a una temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ , esto debido a que la variación que presenta entre los  $5^{\circ}\text{C}$  y  $30^{\circ}\text{C}$  ( $1000$  y  $966 \text{ kg/m}^3$  respectivamente) que es de  $4 \text{ kg/m}^3$ , refleja un cambio alrededor del  $0.01\%$  en el resultado final del cálculo de la evaporación, lo cual puede ser despreciado.

### Modelo aerodinámico

Esta formulación toma en cuenta la capacidad del viento de transportar el vapor del agua lejos de la superficie evaporante. La fórmula para su cálculo es (Chow et al., 1994):

$$E_a = B(e_s - e) \quad (6.6)$$

Donde  $E_a$  es la evaporación debida al viento en ( $\text{m/s}$ ), B el coeficiente de transferencia de vapor en ( $\text{m P}_a/\text{s}$ ).

Date	Time	Dir	WSMDir	WSK	WSMK	AvgTemp	AvgRh	AvgBP	Rain	AvgSR	Batt	SPanel
		Deg	Deg	kph	kph	C	%	mbar	mm	W/m <sup>2</sup>	V	V
2008 mar 01	00:00	232	48	0	0	29.7	4	878	0	148	13	13.6
2008 mar 01	00:10	234	48	0	0	29.5	4	878	0	139		
2008 mar 01	00:20	242	48	0	0	29.4	5	878.1	0	110		
2008 mar 01	00:30	240	48	0	0	29.1	5	878.2	0	51		
2008 mar 01	00:40	13	48	0	0	28	6	878.3	0	23		
2008 mar 01	00:50	65	48	0	0	26.4	8	878.4	0	6		
2008 mar 01	01:00	62	48	0	0	25.1	7	878.5	0	-3	13	13.1
2008 mar 01	01:10	47	48	0	0	24.3	10	878.6	0	-6		
2008 mar 01	01:20	59	48	0	0	23.6	9	878.7	0	-7		
2008 mar 01	01:30	57	48	0	0	22.9	10	878.8	0	-6		
2008 mar 01	01:40	50	48	0	0	22.6	11	878.9	0	-5		
2008 mar 01	01:50	56	48	0	0	22.3	11	879	0	-4		
2008 mar 01	02:00	80	48	0	0	21.8	11	879.2	0	-5	13	0
2008 mar 01	02:10	108	48	0	0	21.2	12	879.3	0	-6		
2008 mar 01	02:20	108	48	0	0	20.3	13	879.5	0	-1		
2008 mar 01	02:30	123	48	0	0	19.7	14	879.7	0			
2008 mar 01	02:40	117	48	0	0	19.8	13	879.8	0	-3		
2008 mar 01	02:50	113	48	0	0	20.4	13	879.9	0	9		
2008 mar 01	03:00	99	48	0	0	20.4	13	880	0	25	13	0
2008 mar 01	03:10	118	48	0	0	20	15	880.2	0			
2008 mar 01	03:20	174	48	0	0	19.1	16	880.3	0	1		
2008 mar 01	03:30	240	48	0	0	17.7	21	880.4	0	-6		
2008 mar 01	03:40	235	48	0	0	17	19	880.5	0	-5		
2008 mar 01	03:50	229	48	0	0	16.6	19	880.5	0	-5		
2008 mar 01	04:00	231	48	0	0	16.1	21	880.6	0	-5	13	0
2008 mar 01	04:10	126	48	0	0	15.4	26	880.6	0	-5		
2008 mar 01	04:20	262	48	0	0	14.5	31	880.7	0	-5		
2008 mar 01	04:30	245	48	0	0	13.9	28	880.7	0	-4		
2008 mar 01	04:40	248	48	0	0	13.7	27	880.8	0	-4		
2008 mar 01	04:50	207	48	0	0	13.3	25	880.9	0	-5		
2008 mar 01	05:00	151	48	0	0	13.2	32	881	0	-4	13	0
2008 mar 01	05:10	288	48	0	0	12.7	35	881.1	0	-5		
2008 mar 01	05:20	106	48	0	0	12.3	35	881.2	0	-4		
2008 mar 01	05:30	143	48	0	0	12.1	31	881.3	0	-4		
2008 mar 01	05:40	159	48	0	0	12.2	28	881.3	0	-4		
2008 mar 01	05:50	158	48	0	0	12	43	881.4	0	-4		
2008 mar 01	06:00	207	48	0	0	11.5	36	881.4	0	-4	13	0
2008 mar 01	06:10	241	48	0	0	11.2	33	881.5	0	-4		
2008 mar 01	06:20	244	48	0	0	10.9	32	881.5	0	-4		
2008 mar 01	06:30	244	48	0	0	10.6	34	881.5	0	-5		
2008 mar 01	06:40	279	48	0	0	10.2	35	881.6	0	-4		
2008 mar 01	06:50	61	48	0	0	9.8	47	881.7	0	-4		
2008 mar 01	07:00	91	48	0	0	9.6	44	881.9	0	-3	13	0
2008 mar 01	07:10	105	48	0	0	9.6	32	881.9	0	-3		
2008 mar 01	07:20	125	48	0	0	9.9	27	881.9	0	-2		
2008 mar 01	07:30	31	48	0	0	10.1	35	882	0	-3		

**Tabla 12.- Datos climatológicos obtenidos de la Estación Meteorológica Automática (EMA) "Agustín Melgar", ubicada en el municipio de Nazas, Durango.**



VARIABLES QUE SE PUEDEN OBTENER DE LA ESTACIÓN EMA:

**Dir** – El valor dado es el promedio de 10 minutos de la dirección del viento. Dirección indica de donde viene el viento, y esta dado en Grados, donde 0° = Norte Ver. [0,359]

**WSMDir** – Dirección del viento mas alto medido en el intervalo de 10 minutos, que haya tenido una duración mayor a 5 segundos, unidades Grados.

**WSK** – Velocidad de Viento del promedio de 10 min., esta dada en Km/h [0.0,234].

**WSMK** – Velocidad del viento máximo durante el intervalo de 10 min. con duración mayor a 5 segundos, esta dada en Km/h.

**AvgTemp** – Temperatura promedio del aire durante el intervalo de 10 minutos, unidad °C [-60.0,60.0].

**AvgRh** – Humedad Relativa promedio durante el intervalo de 10 minutos, esta dada en % [0,100].

**AvgBP** – Presión Barométrica promedio durante el intervalo de 10 minutos, unidad milibar (mbar) [550.0,1100.0].

**Rain** – Precipitación de Lluvia acumulada de los últimos 10 min, unidad mm [0.00,50.00].

**AvgSR** – Densidad de flujo de energía de radiación solar, llamada también IRRADIANCIA, se reportan promedios de 10 minutos, está dada en W/m<sup>2</sup>, se usa un piranómetro marca Kipp&Zonen, modelo CM11. [0,1200] según el proveedor [-20,1400]

**Batt** – Batería, esta dada en V (Volts) .

**Panel** – Panel solar, esta dada en V (Volts).

Recordando que en la precipitación es el registro de cada 10 min. y si se quieren obtener el acumulado para un periodo mayor se deberá efectuar la suma correspondiente al periodo deseado.

**Figura 20.- Clave de las variables que se registran en la EMA “Agustín Melgar”**

La Tabla 12, muestra los datos meteorológicos tal y como se obtuvieron originalmente del datalogger de la estación meteorológica automática Agustín Melgar, para lo cual se hizo

necesario hacer conversiones de unidades para adecuarlos a las variables de entrada de la ecuación de Penman y el significado de cada clave de las variables se detalla en la Figura 20.

Cabe mencionar, que la EMA “Agustín Melgar”, la cual se localiza a 15 km del vaso de la presa Francisco Zarco forma, parte de la red de estaciones automáticas del Servicio Meteorológico Nacional, es de la marca FTS y se instaló en el año 2002 y el año 2009 se encontraba funcionando correctamente, pero actualmente se encuentra fuera de servicio, pero la información que se obtiene en este sitio de monitoreo meteorológico, se utiliza para la elaboración del pronóstico meteorológico y son datos de entrada para la simulación hidrológica a través del Sistema de Pronóstico en Ríos que tiene en operación la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, en convenio con el National Weather Service de los Estados Unidos.

Los comentarios anteriores, son de respaldo para la validación de que la información que se obtiene por medio de los sensores de la EMA “Agustín Melgar”, son confiables y pueden ser utilizados en el presente estudio para fines de estimación de la evaporación en el vaso de la presa Francisco Zarco, considerando además que prácticamente, este sitio de monitoreo meteorológico, se encuentra emplazado muy cerca a este embalse.

Ahora bien, para el cálculo del coeficiente de transferencia de vapor se usa:

$$B = \frac{0.622\kappa^2 \rho_a U_2}{P \rho_w \left[ \ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) \right]^2} \quad (6.7)$$

Donde  $\kappa = 0.40$  es la constante de Von Kármán,  $P$  es la presión atmosférica en ( $P_a$ , Tabla 14),  $\rho_a$  es la densidad del aire en ( $\text{kg/m}^3$ ), que se calcula con la expresión (6.8),  $U_2$  es la velocidad del viento medida a dos metros de la superficie evaporante en (m/s),  $z_2=2.0$  es la altura a la que se mide la velocidad del viento en (m) y  $z_0$  es la rugosidad superficial del agua en (m).

$$\rho_a = \frac{P}{R_a T} \quad (6.8)$$

Donde T es la temperatura en (K).

$$R_a = 287(1 + 0.608q_v) \quad (6.9)$$

$R_a$  es la relación entre las constantes de gas para aire húmedo y aire seco en (J/kg K).

$$q_v = 0.622 \frac{e}{P} \quad (6.10)$$

Siendo  $q_v$  la humedad específica.

Como en realidad la velocidad del viento  $U_m$  no se mide precisamente a dos metros sobre la superficie del agua, se debe aplicar la corrección de la magnitud haciendo uso de la fórmula de perfil logarítmico:

$$\frac{U_m}{U_*} = \frac{1}{K} \ln \left[ \frac{z_m}{z_0} \right] \quad (6.11)$$

Entonces si se conoce la altura ( $z_m$ ) a la que se midió la velocidad del viento, se puede despejar la velocidad al cortante

$U_*$ , así

$$U_* = \frac{U_m K}{\ln \left[ \frac{z_m}{z_0} \right]} \quad (6.12)$$

Con este valor se procede a obtener la velocidad para la altura deseada, en este caso de dos metros,

$$U_2 = \frac{U_*}{K} \ln \left[ \frac{2.0}{z_0} \right] \quad (6.13)$$

La altura de la rugosidad del agua varía según Chow et al (1994) de 0.0001 m – 0.0006 m, tomándose para este caso el valor máximo, en virtud de que los valores aquí referidos son para agua quieta, por tanto, es de suponerse que el movimiento del agua en un cuerpo de las dimensiones de la presa Francisco Zarco, provocará que este valor tienda a crecer.

Con base en este método se han propuesto muchas formas empíricas del coeficiente de transferencia de vapor, todas ellas ajustadas de manera local, es por ello que existen diversas formulaciones de tipo:

$$E_a = C(e_s - e)f(u) \quad (6.14)$$

Donde C es el coeficiente empírico, f(u) es una función de la velocidad del viento, entre las que se pueden anotar están la de Meyer (1915), Horton (1917), Lugeon (1928), Rohwer (1931), Servicios Hidrológicos de la URSS, todas ellas mencionadas en Campos (1984) o la nombrada ecuación generalizada para estimar la evaporación (Jones, 1992) entre otras.

### Modelo combinado de Penman

En el caso del vaso de la Presa Francisco Zarco, el efecto de la radiación solar es tan importante como el del viento. Por ello, es conveniente usar el método propuesto por Penman en 1948, que combina ambos enfoques, el termodinámico y el aerodinámico. Por otro lado, cuando se usa este método con valores climáticos medios diarios provee resultados muy confiables (ASCE, 1990). La expresión resultante por el método combinado es (Chow et al., 1994):

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_b + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (6.15)$$

Donde E es la tasa de evaporación,  $\Delta$  es el gradiente de la curva de presión de vapor de saturación en ( $P_a/^\circ\text{C}$ ) y  $\gamma$  es la constante psicométrica en ( $P_a/^\circ\text{C}$ ), que se calculan con las fórmulas:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(237.3 + T)^2} \quad (6.16)$$

$$\gamma = \frac{C_p P}{0.622 l_v} \quad (6.17)$$

$C_p=1005$  es el calor específico del aire en (J/kg K), el cual se refiere al coeficiente de proporcionalidad entre el cambio de temperatura y la energía interna o calor sensible.

En el anexo B, en la Tabla 25 se muestran los resultados obtenidos con el Método Combinado de Penman, donde como ya se indicó anteriormente que la radiación neta ( $R_n$ ) se obtuvo a partir de las mediciones realizadas con el sensor de la EMA Agustín Melgar y los valores obtenidos se reportan en la Tabla 12.

### **Ecuación estandarizada de evapotranspiración de Referencia ASCE**

El Comité de Tareas para la Estandarización de la Evapotranspiración de Referencia del Instituto de Investigación de Medioambiente y Agua de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés).

En mayo de 1999, la Asociación de Irrigación (IA), solicitó al Comité de Evapotranspiración en Irrigación e Hidrología del Instituto de Investigación de Medioambiente y Agua de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), establecer y definir el patrón para la ecuación de evapotranspiración de referencia. El propósito de las ecuaciones patrón es estandarizar los cálculos de la evapotranspiración de referencia y mejorar la transferencia de coeficientes de cultivo.

La IA previó una ecuación que pudiera ser aceptada por la comunidad científica de los Estados Unidos, ingenieros, tribunales, formuladores de políticas y usuarios. Que la ecuación pudiera ser aplicable para irrigación agrícola y de ornato y que pudiera facilitar el uso y transferencia de coeficientes de cultivo y jardines. Además, la IA solicitó una guía para usar la ecuación en

regiones donde los datos climáticos son limitados y recomendaciones para incorporar coeficientes de cultivo existentes y cálculos existentes de evapotranspiración de referencia.

La ecuación que propone la ASCE es la siguiente:

$$ET_{sz} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left( \frac{C_n}{T} + 273 \right) U_2 (e_s + e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)} \quad (6.18)$$

Donde:

$ET_{sz}$  = Es la evapotranspiración de referencia estandarizada para superficies con cultivos cortos ( $ET_{os}$ ) o altos ( $ET_{rs}$ ) en intervalos de tiempo de un día o de una hora (mm/día o mm/h).

$R_n$  = Radiación neta calculada en la superficie del cultivo en ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ) para intervalos diarios y ( $MJ m^{-2} h^{-1}$ ) para intervalos horarios.

$G$  = Densidad de flujo de calor de la superficie del suelo en ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ) para intervalos diarios y ( $MJ m^{-2} h^{-1}$ ) para intervalos horarios.

$T$  = Temperatura del aire media diaria u horaria de 1.5 a 2.5 m de altura ( $^{\circ}C$ ).

$U_2$  = Velocidad media del viento diaria u horaria a 2 metros de altura ( $m s^{-1}$ ).

$e_s$  = Presión de vapor a saturación de 1.5 a 2.5 metros de altura (kPa), calculada para intervalos diarios como el promedio de presión de vapor de saturación para temperatura del aire máxima y mínima.

$e_a$  = Presión medial de vapor media actual a 1.5 y 2.5 metros de altura (kPa).

$\Delta$  = Pendiente de la curva de saturación presión-Temperatura ( $kPa ^{\circ}C^{-1}$ ).

$\gamma$  = Constante psicrométrica ( $kPa ^{\circ}C^{-1}$ ).

$C_n$  = Numerador constante que cambia con el tipo de referencia e intervalo de cálculo ( $K mm s^3 Mg^{-1} d^{-1}$  y  $K mm s^3 Mg^{-1} h^{-1}$ ).

$C_d$  = Denominador constante que cambia con el tipo de referencia e intervalo de cálculo ( $s m^{-1}$ ).

Las unidades del coeficiente 0.408 son  $m^2 mm MJ^{-1}$ .

En la Tabla 13 se provee valores de  $C_n$  y  $C_d$ . El valor de  $C_n$  toma en cuenta el intervalo de tiempo y la rugosidad aerodinámica de la superficie y la constante en el denominador  $C_d$ , toma en cuenta el intervalo de tiempo, la resistencia de la superficie dominante y la rugosidad aerodinámica de la superficie.

Intervalo de tiempo	Cultivos cortos, ETos de referencia		Cultivos altos, ETrs de referencia		Unidades para ET <sub>os</sub> y ET <sub>rs</sub>	Unidades para R <sub>n</sub> y G
	C <sub>n</sub>	C <sub>d</sub>	C <sub>n</sub>	C <sub>d</sub>		
Diario	900	0.34	1600	0.38	mm d <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
Horario durante el día	37	0.24	66	0.25	mm h <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>
Horario durante la noche	37	0.96	66	1.7	mm h <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>

**Tabla 13.- Valores para C<sub>n</sub> y C<sub>d</sub> de la ecuación 6.18**

Término	ET <sub>os</sub>	ET <sub>rs</sub>
Altura de la vegetación de referencia, h	0.12 m	0.50 m
Altura de las medidas de temperatura del aire y humedad, zh	1.5 – 2.5 m	1.5 – 2.5 m
Altura correspondiente a la velocidad del aire, zw	2.0 m	2.0 m
Plano cero de la altura de desplazamiento	0.08 m	0.08 m <sup>a</sup>
Calor latente de vaporización	2.45 MJ kg <sup>-1</sup>	2.45 MJ kg <sup>-1</sup>
Resistencia de la superficie, r <sub>s</sub> , diaria	70 s m <sup>-1</sup>	45 s m <sup>-1</sup>
Resistencia de la superficie, r <sub>s</sub> , diurna	50 s m <sup>-1</sup>	30 s m <sup>-1</sup>
Resistencia de la superficie, r <sub>s</sub> , nocturna	200 s m <sup>-1</sup>	200 s m <sup>-1</sup>
Valor de R <sub>n</sub> para predicciones diurnas	> 0	> 0
Valor de R <sub>n</sub> para predicciones nocturnas	≤ 0	≤ 0

**Tabla 14.- Términos estandarizados de ASCE Penman-Monteith para aplicaciones de la Ecuación de Evapotranspiración de Referencia Estandarizada.**

<sup>a</sup> El plano cero de la altura de desplazamiento para  $ET_{rs}$  considera que las mediciones de la velocidad del viento es sobre zacate corto, a pesar de que el tipo de referencia es alto. Esto se hizo para ajustarse a la mayoría de las estaciones meteorológicas que están instaladas sobre zacate.

Para la aplicación de este método, se utilizaron datos diarios, obtenidos a partir de la información registrada cada 10 minutos por la estación meteorológica. Cabe señalar, que para ambos métodos, se utilizaron los mismos valores medios.

En el anexo B, en la Tabla 26 se muestran cada una de las variables utilizadas en el cálculo de la evapotranspiración por medio del Método ASCE.

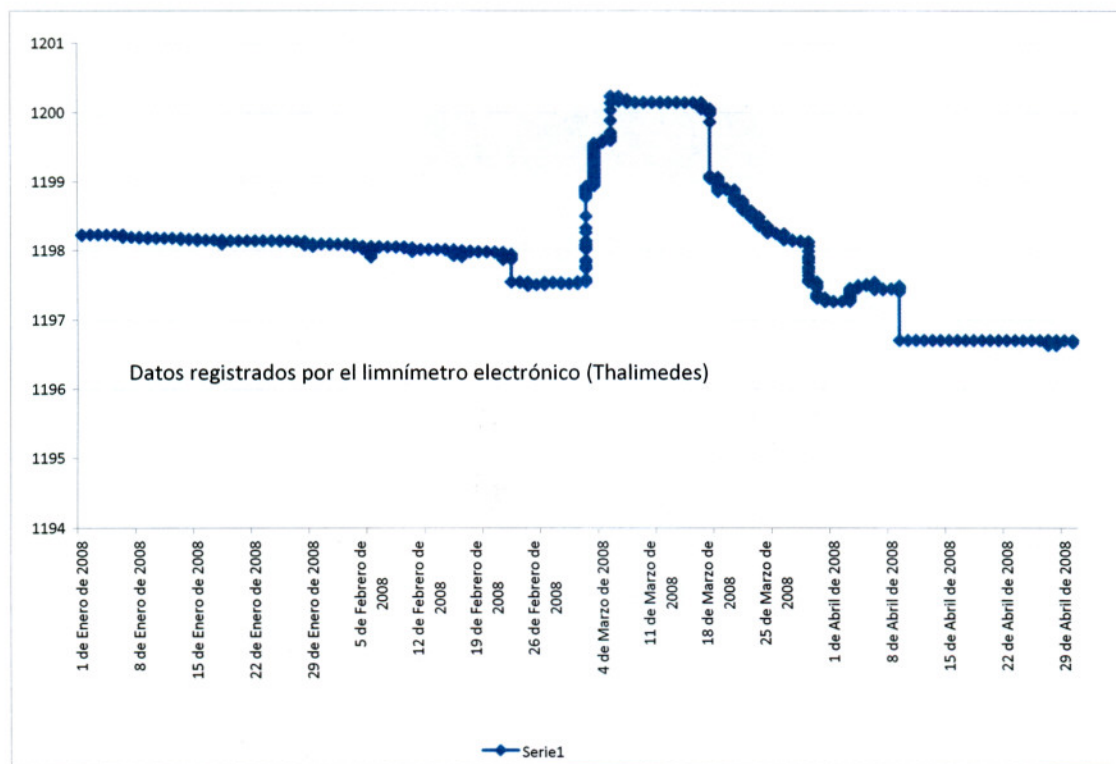
## 5.- Método antitránsito

Existen análisis estadísticos por medio de los cuales se determina la avenida de diseño de una presa, para ello es necesario medir los eventos ocurridos en una sección de interés en el cauce del río a través de una estación hidrométrica previamente instalada en el lugar donde se construiría posteriormente la cortina de la presa o en un lugar cercano al sitio. Después de la construcción de la cortina, el registro de los eventos ocurridos se realiza mediante la técnica del tránsito inverso o antitránsito de avenidas, donde es posible utilizar al vaso de la presa como un dispositivo de aforo.

Para el caso que se analizó en el presente estudio, que es el de la presa Francisco Zarco, se pretende calcular las aportaciones al vaso, con la finalidad de analizar si se estuvieron cuantificando correctamente los caudales de entrada, para ello, como en toda obra de almacenamiento ya construida, la estimación de los caudales de entrada al vaso de la presa utilizan la técnica tradicional para el cálculo del tránsito inverso, también conocido como antitránsito de avenidas en vasos (Aldama y Aguilar, 1996).

En el vaso de la presa Francisco Zarco, se tiene instalada una escala limnimétrica y un limnómetro electrónico, de los cuales se utilizaron los datos para aplicarlos en el presente estudio.

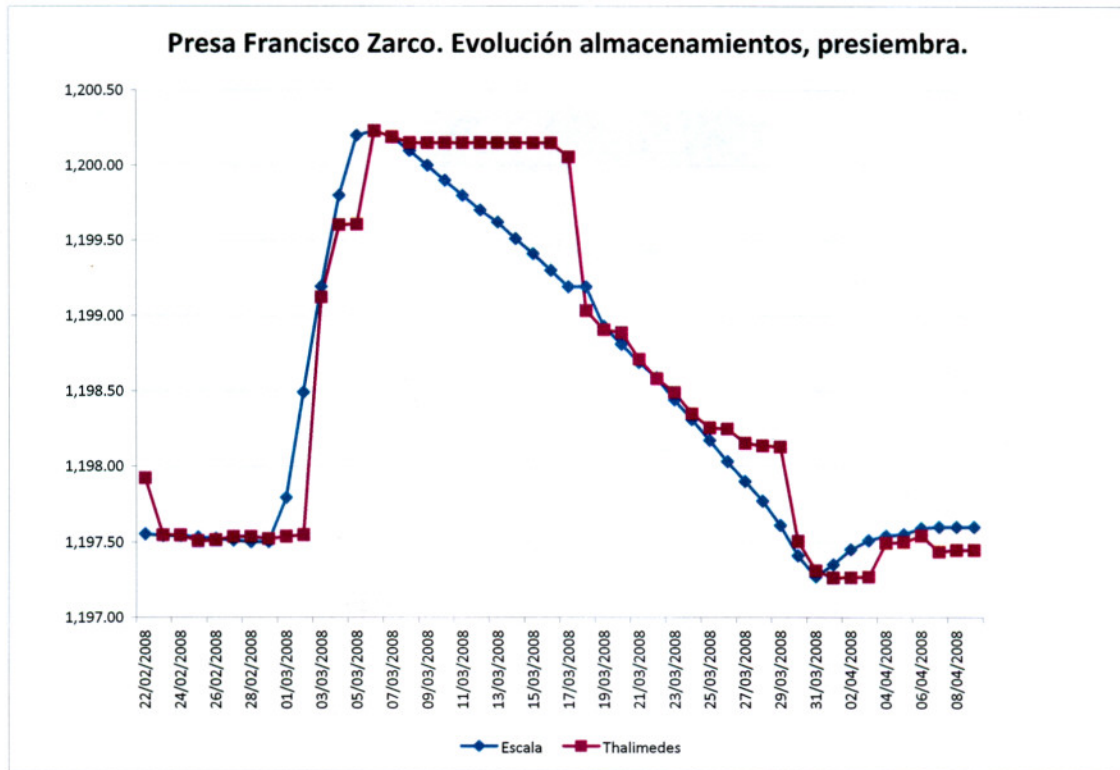




**Figura 21.- Nivel del almacenamiento en la presa Francisco Zarco (período del 1 de enero al 30 de abril de 2008), obtenidos por medio de limnómetro electrónico (Thalimedes).**

En la Figura 21 se muestran los valores de la elevación del embalse de la presa Francisco Zarco, por medio del cual se trató de detectar alguna inconsistencia en la serie de tiempo, podemos notar que el descenso que se muestra el día 22 de febrero corresponde a un ajuste en la numeración de la escala posterior a la realización de trabajos de mantenimiento aplicados a la estructura.

A partir del día 2 de marzo se refleja un fuerte incremento en el embalse debido a los volúmenes extraídos de la presa Lázaro Cárdenas a partir del día 29 de febrero y reflejados en la estación hidrométrica Agustín Melgar el 1 de marzo, mientras que en la presa Francisco Zarco las extracciones iniciaron el día 4 de marzo a las 21 horas.



**Figura 22.- Limnigrama observado vs limnigrama registrado por de limnómetro electrónico (Thalimedes) en el período del 1 de enero al 30 de abril de 2008 en el vaso de la presa Francisco Zarco.**

Con la aplicación del antitránsito o tránsito inverso, los hidrogramas de ingreso al vaso de las presas se calculan con los registros de operación de la presa correspondientes a la elevación de la superficie libre del agua en el vaso, del empleo de las relaciones elevaciones-capacidades y elevaciones-descargas y el registro de operación de las obras de toma y de excedencias.

Los antitránsitos se llevan a cabo resolviendo numéricamente la ecuación de continuidad en forma inversa, calculando el gasto de ingreso al vaso a partir del gasto de egreso y de la tasa de cambio del almacenamiento (Aldama y Aguilar, 1996).

Los hidrogramas de ingreso que se obtienen al aplicar el esquema de la regla trapezoidal, exhiben oscilaciones considerables que hacen dudar de la confiabilidad del método tradicional.

### Tránsito inverso

Como se describe en (Aldama y Aguilar, 1996 y 1997) La ecuación de continuidad para cálculo del tránsito de avenidas en un vaso se expresa como:

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (6.19)$$

en donde  $S$  representa el almacenamiento en el vaso;  $I$ , el gasto de ingreso;  $O$ , el gasto de egreso; y  $t$ , el tiempo.

Generalmente la ecuación (6.19) se resuelve en forma directa, sujeta a una condición inicial, acoplada con la relación elevaciones-capacidades y la relación elevaciones-descargas:

La determinación de un hidrograma de ingreso a una presa,  $I = I(t)$ , contrasta con la situación descrita en el párrafo anterior. En este caso se conoce la evolución de la superficie libre del agua en el tiempo y los gastos de salida del vaso, así como la relación elevaciones-capacidades que permite determinar la evolución en el tiempo de los almacenamientos. Entonces, (6.19) puede resolverse para el gasto de ingreso, resultando en:

$$I(t) = S'(t) + O(t) \quad (6.20)$$

dónde  $S'(t) = dS/dt$ . La expresión (6.20) es conocida como tránsito inverso o *antitránsito*. Pudiera parecer trivial resolver numéricamente (6.20) y así calcular una sucesión de valores discretos de los gastos de ingreso al vaso.

### Esquemas numéricos

En esta sección se presentan el método tradicional para llevar a cabo tránsitos inversos en vasos para la estimación de hidrogramas de ingreso, así como un método alternativo.

La ecuación (6.20) se discretiza tradicionalmente empleando el esquema de Crack-Nicolson o regla trapezoidal (Gear, 1971):

$$\frac{I_{j+1} + I_j}{2} = \frac{S_{j+1} - S_j}{\Delta t} + \frac{O_{j+1} + O_j}{2} \quad (6.21)$$

donde  $I_j$  representa una aproximación discreta a  $I(j\Delta t)$ ;  $O_j$ , una aproximación discreta a  $O(j\Delta t)$ ;  $S_j$  una aproximación discreta a  $S(j\Delta t)$ ;  $j = 0, 1, 2, \dots$ ; y  $\Delta t$  un intervalo de tiempo. Es sencillo demostrar que el esquema representado por (6.20) tiene un error de truncado de  $O(\Delta t^2)$  en la aproximación de (6.20). Resolviendo (6.21) para  $I_{j+1}$ , se obtiene:

$$I_{j+1} = -I_j + O_{j+1} + O_j + 2 \frac{S_{j+1} - S_j}{\Delta t} \quad (6.22)$$

La ecuación (6.22) es la expresión discreta que se utiliza para llevar a cabo el tránsito inverso mediante el método tradicional.

También la expresión (6.20) se puede discretizar mediante el método de diferencias centrales, que posee un error de truncado de  $O(\Delta t^2)$ :

$$I_{j+1} = O_{j+1} + \frac{S_{j+2} - S_j}{2\Delta t} \quad (6.23)$$

La Ecuación (6.23) representa la alternativa (diferencias centrales) al método tradicional para llevar a cabo tránsitos inversos.

### Estabilidad

En esta sección se analiza la estabilidad de los esquemas presentados anteriormente. Es interesante notar que es posible demostrar que cuando las ecuaciones discretas que aproximan la ecuación de continuidad (IV) se resuelve en forma *directa*:

- El esquema de Crack-Nicolson o regla trapezoidal es incondicionalmente estable.
- El esquema de diferencias centrales es incondicionalmente inestable (Gear, 1971 y Fantula, 1988).

No obstante, las propiedades de estabilidad de dichos esquemas varían al considerarse la solución *inversa* de las ecuaciones discretas que aproximan la ecuación de continuidad.

Por *estabilidad* se entiende, en este caso, la propiedad de no crecer que tiene un error inicial de redondeo en la variable dependiente que se está calculando, *suponiendo la ausencia de otras fuentes de error*. De acuerdo con esto, se supone que el gasto de ingreso se expresa como:

$$I_j = \hat{I}_j + \varepsilon_j \tag{6.24}$$

para todo valor de  $j$ . La ecuación (6.24)  $\hat{I}_j$  representa la solución exacta de la ecuación discreta, esto es, la que se calcularía con aritmética de precisión infinita. En la misma ecuación,  $\varepsilon_j$  representa el error de redondeo correspondiente al instante  $j$ .

Con el objeto de analizar la estabilidad del método tradicional de tránsito inverso, sustituyamos (6.24) en (6.22), con lo que se obtiene:

$$\hat{I}_{j+1} + \varepsilon_{j+1} = -\hat{I}_j - \varepsilon_j + O_{j+1} + O_j + 2 \frac{S_{j+1} - S_j}{\Delta t} \tag{6.25}$$

Dado que se ha supuesto que, aparte del error de redondeo en cada instante (que ha resultado de la propagación del error inicial de redondeo), no existen otras fuentes de error  $\hat{I}_{j+1}$  e  $\hat{I}_j$  satisfacen la ecuación discreta de continuidad (6.22) en forma *exacta*, esto es:

$$\hat{I}_{j+1} = -\hat{I}_j + O_{j+1} + O_j + 2 \frac{S_{j+1} - S_j}{\Delta t} \quad (6.26)$$

Sustituyendo (6.24) en (6.25) se obtiene la ecuación discreta que satisface el error de redondeo:

$$\varepsilon_{j+1} = -\varepsilon_j \quad (6.27)$$

(6.27) es una ecuación de diferenciación de primer orden. Su solución se obtiene suponiendo que (Mickens, 1987):

$$\varepsilon_j = \xi_j \quad (6.28)$$

Donde  $\xi$  es el factor de amplificación del error de redondeo (que en general puede ser complejo). La condición de estabilidad es (Fantula, 1988):

$$|\xi| \leq 1 \quad (6.29)$$

Sustituyendo (6.25) en (6.26) se llega a:

$$|\xi| = -1 \quad (6.30)$$

lo que implica que el esquema de Crank-Nicolson o regla trapezoidal es neutralmente estable. No obstante, dado que  $\xi$  es negativo, se espera un comportamiento oscilatorio del error (Mickens, 1987). Esto se debe a que, de acuerdo con (6.28), el error se mantiene en módulo de un instante a otro, pero cambia de signo. Esto explica el comportamiento oscilatorio de los hidrogramas estimados a través de tránsitos inversos basados en la regla trapezoidal.

### Propagación de errores

En la práctica, los valores de los almacenamientos discretos,  $S_j$ , y de los gastos de egreso discretos,  $O_j$ , están contaminados por errores de medición y de redondeo. Un análisis completo de propagación de errores debe tomar en cuenta lo anterior. De acuerdo con esto, suponemos que los gastos de ingreso y de egreso, y los almacenamientos puedan expresarse como:

$$I_j = \hat{I}_j + E_j^I \quad (6.31)$$

$$O_j = \hat{O}_j + E_j^O \quad (6.32)$$

$$S_j = \hat{S}_j + E_j^S \quad (6.33)$$

Donde las variables con acento circunflejo representan los valores exactos correspondientes:  $E_j^I$  representa el error total en los gastos de ingreso;  $E_j^O$  el error total en los gastos de egreso, y  $E_j^S$  el error total en los almacenamientos.

Con el objeto de analizar la propagación de errores en el esquema tradicional de tránsito inverso (regla trapezoidal o Crank-Nicolson), sustituyamos (6.31), (6.32) y (6.33) en (6.22). Tomando en cuenta que  $\hat{I}_j$ ,  $\hat{O}_j$  y  $\hat{S}_j$  satisfacen a (6.22) en forma exacta, se obtiene la siguiente ecuación para el error total en los gastos de ingreso:

$$E_{j+1}^I = -E_j^I + E_{j+1}^O + E_j^O + 2 \frac{E_{j+1}^S - E_j^S}{\Delta t} \quad (6.34)$$

(6.34) es válida para todo tipo de valor de  $j \geq 0$ . Por tanto, puede escribirse que:

$$E_j^I = -E_{j-1}^I + E_j^O + E_{j-1}^O + 2 \frac{E_j^S - E_{j-1}^S}{\Delta t} \quad (6.35)$$

Sustituyendo (6.34) en (6.35), se obtiene:

$$E_j^I = -E_{j-1}^I + E_j^O + E_{j-1}^O + 2 \frac{E_{j+1}^S - 2E_j^S + E_{j-1}^S}{\Delta t} \quad (6.36)$$

Continuando con este proceso en forma inductiva, se llega finalmente a la siguiente ecuación, que expresa el error total en el cálculo del gasto de ingreso, para el instante  $j + 1$ , correspondiente al método tradicional de tránsito inverso:

$$E_{j+1}^I = (-1)^{j+1} E_0^I + [E_{j+1}^O + (-1)^j E_0^O] + \frac{2}{\Delta t} \left[ E_{j+1}^S - 2 \sum_{i=1}^j (-1)^{j-i+1} E_{j-i+1}^S + (-1)^{j+1} E_0^S \right] \quad (6.37)$$

(6.37) pone de manifiesto que los errores se propagan de un instante a otro cuando se aplica la regla trapezoidal. El primer término en dicha ecuación representa la contribución del error inicial en el gasto de ingreso, que alterna su signo en instantes sucesivos. El segundo y tercer términos (entre corchetes) representan la contribución de los errores en los gastos de egreso y en los almacenamientos, respectivamente.

Según puede observarse, estos términos también contienen componentes que alteran su signo en instantes sucesivos. Esto explica, ahora en forma completa, el carácter oscilatorio de los hidrogramas estimados a través del método tradicional de tránsito inverso, y evidencia la naturaleza espúrea de las oscilaciones.

Es interesante notar en (6.37) que, en relación con los errores en el gasto de ingreso, sólo existe contribución del error inicial. En lo referente a los gastos de egreso, contribuyen en el error inicial y el error introducido en el instante corriente ( $j + 1$ ).

En contraste, existe contribución de *todos* los errores en los almacenamientos, desde el instante inicial hasta el corriente. Asimismo, dado que los módulos de los coeficientes que multiplican a los errores iniciales en los gastos de ingreso en (6.37) son iguales a uno, no existe un amortiguamiento monótonico de dichos errores según avanza el tiempo.



Por último, los errores en los almacenamientos, que se acumulan en el tiempo, se encuentran divididos por  $\Delta t$  en (6.37), por lo que se espera que el comportamiento del método tradicional de antitránsito se deteriore para valores pequeños del intervalo de tiempo.

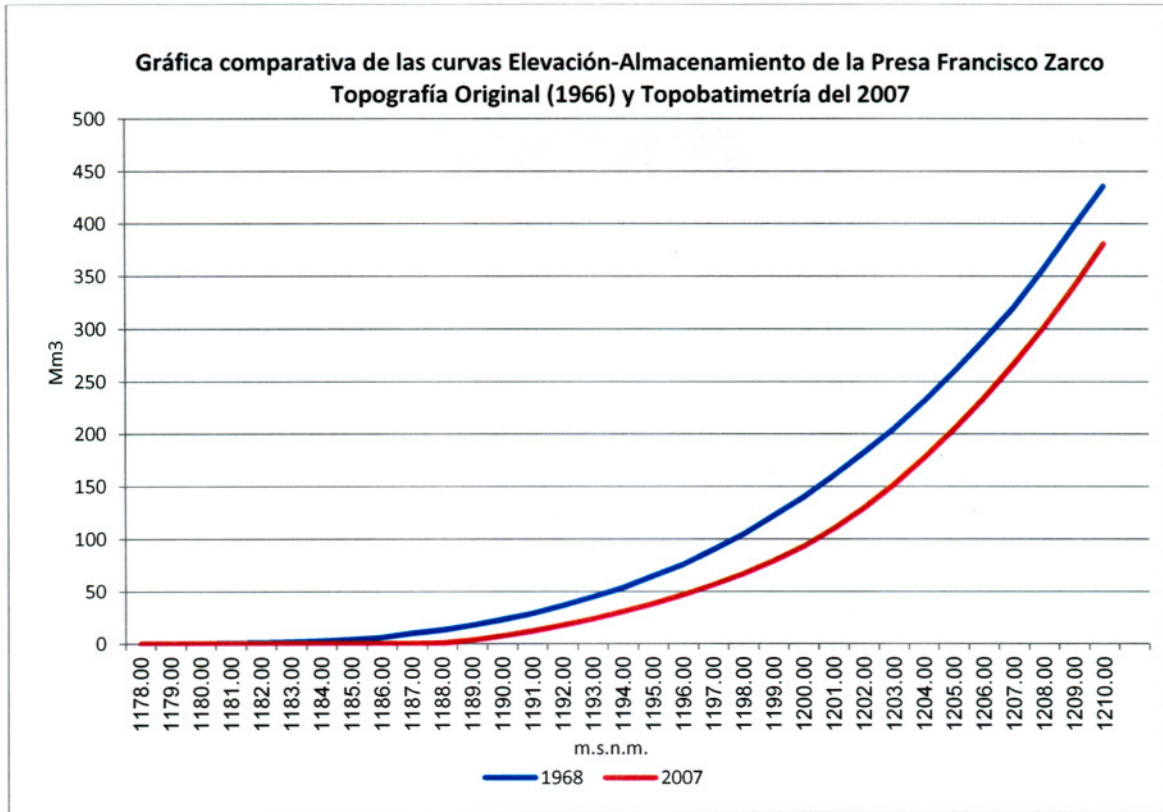
Por último, los errores en los almacenamientos, que se acumulan en el tiempo, se encuentran divididos por  $\Delta t$  en (6.37), por lo que se espera que el comportamiento del método tradicional de antitránsito se deteriore para valores pequeños del intervalo de tiempo.

Finalmente un procedimiento similar a los anteriores resulta en la siguiente expresión para el error total en el gasto de ingreso correspondiente al esquema de diferencias centrales para tránsito inverso.

$$E_{j+1}^I = E_{j+1}^O + \frac{E_{j+2}^S - E_j^S}{2\Delta t} \quad (6.38)$$

En este caso *no existe acumulación de errores en el tiempo!* En efecto, (XXIII) muestra que el error total en el gasto de ingreso sólo está determinado por el error corriente en el gasto de egreso, y los errores en los almacenamientos en los instantes anterior y siguiente. Por este motivo, se espera que el esquema de diferencias centrales para tránsito inverso tenga mejor comportamiento y sea más confiable que el método tradicional.

Como ya se mencionó, en el presente estudio se aplicó esquema Crank-Nicholson o tradicional y el de Diferencias Centrales que al igual que el de Adams-Bashforth, presenta error de truncado y se utilizaron dos batimetrías del vaso, la que corresponde al estudio original de construcción de la presa Francisco Zarco (1966), ya que el estudio realizado en el año 1991 se desechó por presentar inconsistencias en sus resultados, la otra batimetría utilizada es la del año 2007. Se hace la comparación entre los métodos de Crank-Nicholson o tradicional, y el de Diferencias Centrales, utilizando para ello todo el año 2008.



**Figura 23.- Gráfica comparativa entre la topografía de 1966 y la topobatimetría de 2007.**

ELEVACION (m.s.n.m.)	ALMACENAMIENTOS (Mm <sup>3</sup> )		
	1966	1991	2007
1178.00	0.04	0.040	---
1179.00	0.12	0.115	---
1180.00	0.19	0.190	---
1181.00	0.47	0.465	---
1182.00	0.74	0.740	---
1183.00	1.44	1.440	---
1184.00	2.14	2.140	---
1185.00	4.00	4.000	---
1186.00	5.74	5.740	---
1187.00	9.80	9.800	0.001
1188.00	12.80	12.800	0.762
1189.00	17.50	17.500	3.638
1190.00	23.10	23.100	7.614
1191.00	29.00	29.000	12.338
1192.00	36.60	36.600	17.883
1193.00	45.00	45.000	24.156
1194.00	53.60	53.600	31.067
1195.00	65.00	65.000	38.662
1196.00	76.00	76.000	47.185
1197.00	90.00	90.000	56.770
1198.00	105.00	105.000	67.459
1199.00	122.00	122.000	79.633
1200.00	140.00	140.000	93.542
1201.00	160.00	160.000	110.089
1202.00	182.00	182.000	129.736
1203.00	205.00	205.000	152.137
1204.00	231.00	231.000	177.098
1205.00	259.00	259.000	204.401
1206.00	289.00	289.000	234.275
1207.00	320.00	320.000	266.805
1208.00		357.000	301.884
1208.20		365.280	309.236
1209.00	397.00	397.000	339.948
1210.00	436.00	436.000	381.016
1210.05		438.250	383.155
1211.00		---	425.309
1212.00		---	472.645
1213.00		---	523.281

**Tabla 15.- Comparación de la capacidad de almacenamiento a cada metro de elevación en el embalse de la presa Francisco Zarco.**

Aplicación del método antitránsito para determinar el hidrograma de entrada  
al vaso de la presa Francisco Zarco  
Enero 2008

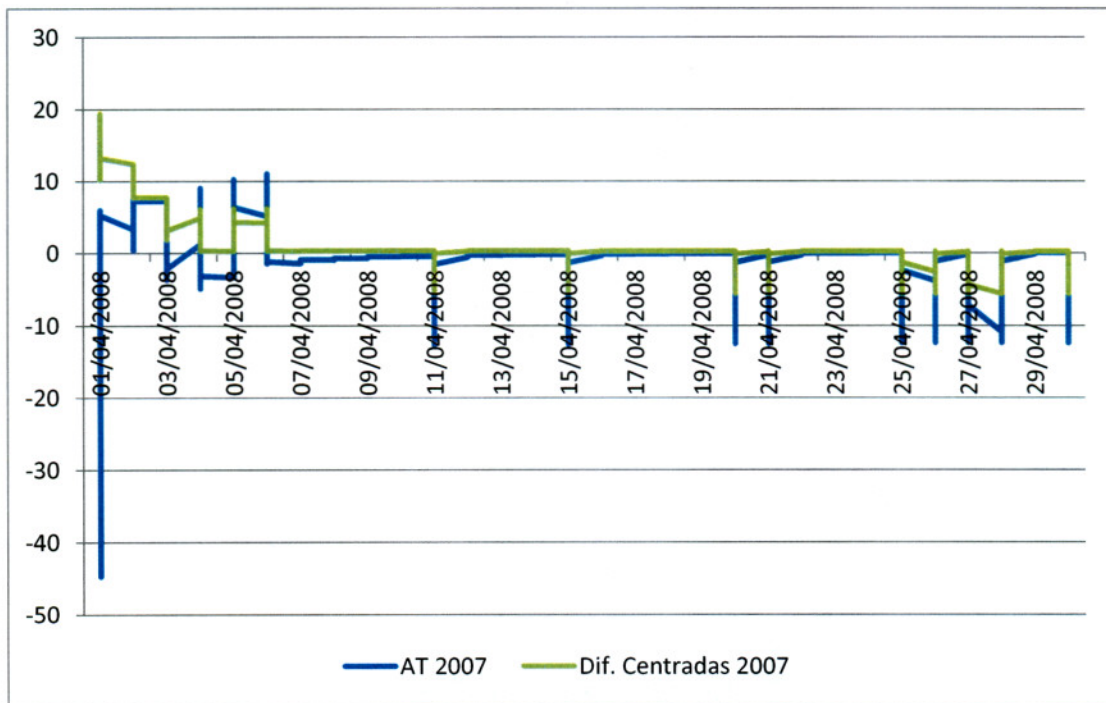
Fecha	Elevación en el Vaso (m.s.n.m.)	Almace- namiento (Mm <sup>3</sup> )	Gasto		Batimetría 1966		Batimetría 2007		Variación Dif. Centradas (m <sup>3</sup> /s)
			Entrada (m <sup>3</sup> /s)	Salida (m <sup>3</sup> /s)	Antitrán. Met.	Antitrán. Dif.	Antitrán. Met.	Antitrán. Dif.	
					tradicional (m <sup>3</sup> /s)	Centradas (m <sup>3</sup> /s)	tradicional (m <sup>3</sup> /s)	Centradas (m <sup>3</sup> /s)	
01/01/2008	1197.900	103.3590	<b>0.40</b>	0.20					
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
01/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
02/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
02/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.20	0.00	0.20	0.00
02/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	0.00	0.12	0.00	0.14	-0.02
02/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	-0.33	-0.29	-0.24	-0.17	-0.12
02/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	-1.64	-1.44	-1.22	-1.02	-0.41
02/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	-4.91	-3.56	-3.67	-2.61	-0.95
02/01/2008	1197.900	103.3590	<b>0.39</b>	0.20	-10.13	-6.42	-7.56	-4.75	-1.68
02/01/2008	1197.900	103.3590		0.20	-16.35	-9.37	-12.21	-6.95	-2.42
02/01/2008	1197.890	103.2159		0.20	-21.91	-11.82	-16.36	-8.78	-3.04

**Tabla16.- Resultados del antitránsito, utilizando el método de tradicional o Crank-Nicholson o regla trapezoidal y el de Diferencias Centrales, con datos de las batimetrías de los años 1966 y 2007.**

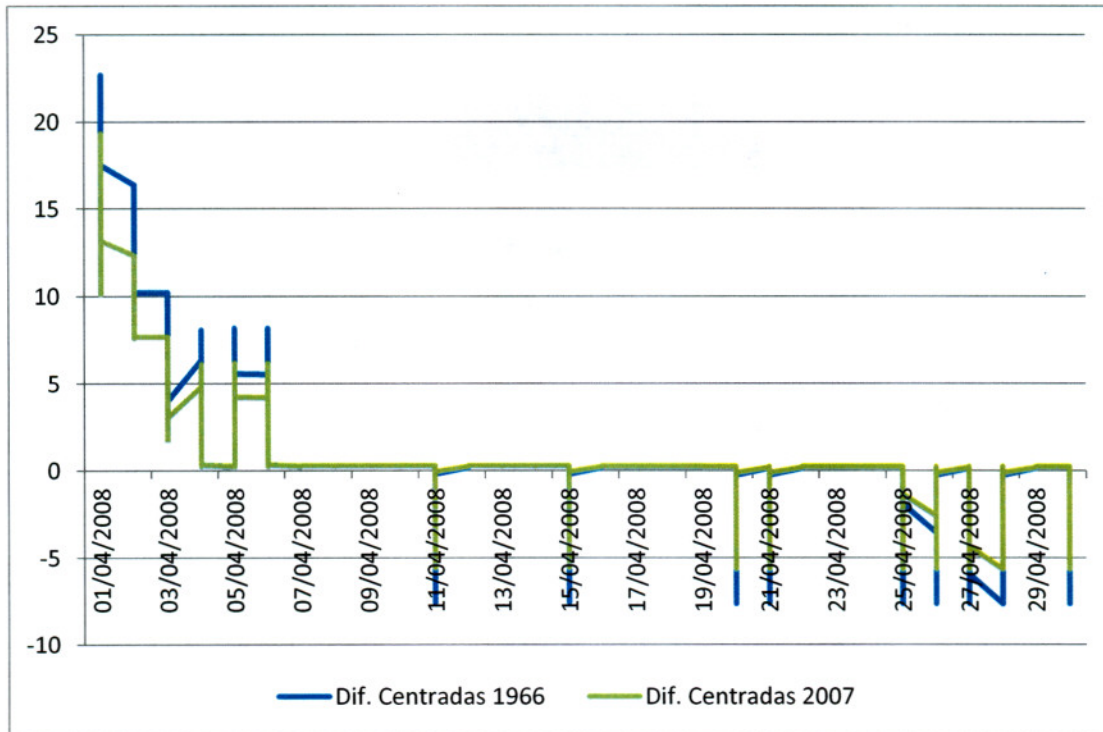
En la Tabla 16 se muestran los resultados de este cálculo. Se observa que entre el método tradicional y el de diferencias centradas se tienen diferencias considerables, pero entre los resultados de las tablas de elevación-áreas-capacidades de 1966 y 2007 no se refleja alguna diferencia importante. Cabe señalar que si analizamos los resultados de los métodos, podremos notar que en los extremos de los hidrogramas de entrada, al inicio de los escurrimientos y cuando se presenta el gasto pico, cambia la tendencia de las variaciones entre métodos, ya que normalmente cuando se miden los gastos de entrada, los valores obtenidos por el método de diferencias centradas son mayores que los obtenidos por el método tradicional, pero al momento de que en la estación hidrométrica Agustín Melgar, se estiman los aforos, los valores

calculados por el método tradicional son mayores a los obtenidos por el de diferencias centrales.

De la Figura 24 es importante resaltar como con el método tradicional de antitránsito, se disparan más las diferencias de los gastos estimados de entrada en comparación con el método de diferencias centradas y aunque las diferencias aparentemente no son importantes utilizando el mismo método con diferentes batimetrías, si son mayores los gastos de entrada (Figura 25).



**Figura 24.- Gráfica comparativa utilizando diferente método antitránsito, pero la misma batimetrías.**



**Figura 25.- Gráfica comparativa utilizando el mismo método antitránsito, pero diferentes batimetrías.**

## **VII.- Resultados**

### **1.- Inventario total de aprovechamientos de agua superficial del río Nazas (autorizados y clandestinos) en el tramo comprendido entre las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco y la superficie de riego en los módulos I Rodeo y II Nazas.**

Como ya se ha comentado anteriormente, el inventario de usuarios de agua superficial en los módulos I Rodeo y II Nazas, están bien controlados a través del padrón de usuarios del Distrito de Riego 017 de la Región Lagunera y según ese padrón, en promedio se utilizan  $12.46 \text{ m}^3/\text{s}$  en esta zona de riego y durante el mes de marzo y principios de abril (trasvaso de pre-siembra), se derivó de río un gasto promedio de  $7.080 \text{ m}^3/\text{s}$ , gasto muy inferior y acorde a lo estadísticamente utilizado para riego agrícola en estos módulos de riego.

### **2.- Diferenciación de los volúmenes de entrada a la presa Francisco Zarco.**

Fue importante proponer la realización de este estudio en meses donde no se tenía nada de escurrimiento superficial sobre el cauce del río Nazas y sus principales afluentes, permitiendo analizar la eficiencia de conducción que se tiene sobre esta corriente durante los trasvasos, donde la única variación en los caudales, corresponde a la originada por las derivaciones de agua que se hacen para riego agrícola en los módulos I Rodeo y II Nazas.

Ahora bien, la eficiencia de conducción que reporta el Distrito de Riego 017, la cual se puede verificar con los datos de la Tabla 5, es del 95%, lo que representa en promedio para los gastos de operación una pérdida de  $4.84 \text{ m}^3/\text{s}$ , mucho menor que los caudales utilizados en los módulos de riego I y II, lo cual indica que esta eficiencia está mal determinada, ya que la literatura menciona que la eficiencia de conducción media de los distritos de riego de la República Mexicana es del 60%, mucho menor que la reportada para el Distrito de Riego 017, cabe hacer la aclaración, que en este caso se trata de un solo canal de 200 km de longitud y no de una red compleja de distribución de agua, pero aun así, se manejan eficiencias de conducción muy altas.

Durante el trasvaso de agua para riego para el ciclo agrícola 2010, se realizó una comparación de la eficiencia de conducción para el tramo Lázaro Cárdenas-Francisco Zarco (ver Tablas 17 y

18), a través de las mediciones realizadas con equipo convencional y con los medidores electrónicos instalados en las estaciones hidrométricas “El Palmito II”, “Paso Nacional” y “Agustín Melgar”, resultando variaciones importantes mes a mes del período considerado, pero lo que llama más la atención, es el hecho de que por medio de ambos métodos, se obtuvieron eficiencias de conducción por el arriba del 100%, aun considerando que esto se presenta en meses secos, donde no existe aportación al cauce del río Nazas, además de que se realizan las derivaciones para uso agrícola en los módulos de Rodeo y Nazas.

MES	VOLUMEN MM3.			EFICIENCIA % PAL-ZARCO	
	PALMITO	A. MELGAR	NAZ/ROD	MES	ACUM
Marzo 12	172,050.2	150,874.5	10,076.1	87.4	87.4
Abril 13	114,859.8	138,502.8	5,042.7	125.0	93.5
Mayo	117,133.2	92,608.0	6,434.4	84.6	106.1
Junio	318,630.6	294,081.1	17,264.1	97.7	99.9
Julio 27	268,297.0	280,536.6	11,063.9	108.7	98.9
<b>Total</b>	<b>990,970.7</b>	<b>956,603.0</b>	<b>49,881.2</b>	<b>101.6</b>	<b>101.6</b>

**Tabla 17.- Eficiencias de conducción Lázaro Cárdenas-Francisco Zarco, forma tradicional, con extracciones de los Módulos I y II, período 13 marzo – 27 julio de 2010. Datos en miles de m<sup>3</sup>**

MES	VOLUMEN MM3.			EFICIENCIA % PAL-P Nal	
	PALMITO	Paso Nal	NAZ/ROD	MES	ACUM
Marzo*	156,590.2	146,365.9		93.5	93.5
Abril	104,538.8	105,930.1		101.3	96.6
Mayo	110,051.0	89,484.1		81.3	92.1
Junio	303,299.0	297,338.3		98.0	94.8
Julio**	247,234.0	313,176.0		126.7	103.3
<b>Total</b>	<b>921,713.0</b>	<b>952,294.4</b>	<b>0.0</b>	<b>103.3</b>	<b>103.3</b>

**Tabla 18.- Eficiencias de conducción Lázaro Cárdenas-Francisco Zarco, información ATT 13 de marzo-27 de julio 2010. Datos en miles de m<sup>3</sup>.**



### **3.- Evaluación de la eficacia de la estación hidrométrica Agustín Melgar, en la medición de caudales por medio del tránsito de avenidas con apoyo en el modelo hidráulico HEC-RAS.**

Considerando los valores obtenidos en la Tabla 11 y las eficiencias de conducción obtenidas en el punto anterior, es evidente que es necesario mejorar el emplazamiento de la estación hidrométrica "Agustín Melgar", ya que actualmente los caudales obtenidos no son del todo confiables para reducir al máximo la aportaciones deducidas del balance hidrológico de la presa Francisco Zarco, además de que para caudales arriba de los 300 m<sup>3</sup>/s, la sección hidráulica del río, es rebasada y se presentan desbordamiento, situación que dificulta aún más la medición de los volúmenes de aguas que transitan por este punto.

La inestabilidad del cauce natural del río, en particular en el tramo de la sección de aforo de la estación hidrométrica "Agustín Melgar", queda de manifiesto en los valores que se reportan en la Tabla 11, ya que la relación escala-área, varía de los datos medidos a los estimados por medio de la topografía realizada, además de que queda de manifiesto, que las velocidades que se presentan en el tramo son muy fuertes dificultando el uso de molinete aún con retenida y transportador y para el caso de este sitio de monitoreo hidrológico, no se dispone de estos accesorios en el emplazamiento.

Actualmente, se tiene instalado en la estación hidrométrica "Agustín Melgar" un medidor de caudal electrónico de tipo dopler, pero se mantiene la deficiencia de no poder medir caudales por arriba de los 300 m<sup>3</sup>/s, situación que condiciona la calidad del balance hidrológico de la presa "Francisco Zarco".

### **4.- Obtención por métodos indirectos de la lámina de evaporación, tomando para ello la información meteorológica registrada en la Estación Meteorológica Automática (EMA) "Agustín Melgar", ubicada a 15 km del vaso de la presa Francisco Zarco.**

Actualmente en el vaso de la presa Francisco Zarco, la evaporación se calcula mediante mediciones en evaporímetros aplicando el coeficiente correspondiente. Sin embargo, se usa un coeficiente constante para todos los meses del año (0.77), mientras que como se mostrará posteriormente, este coeficiente varía de mes a mes.

Día	Evaporación (mm)											
	enero			Febrero			Marzo			Abril		
	Calc.	Med.	Coef.	Calc.	Med.	Coef.	Calc.	Med.	Coef.	Calc.	Med.	Coef.
1	3.63	2.81	1.29	5.01	6.21	0.81	5.77	6.84	0.84			
2	3.71	3.21	1.16	3.16	3.41	0.93	6.72	9.60	0.70	14.65	10.55	1.39
3	3.55	4.02	0.88	4.09	3.40	1.20	6.90	7.49	0.92	7.47	11.31	0.66
4	3.31	2.10	1.58	4.26	6.86	0.62	5.58	5.93	0.94	7.66	12.32	0.62
5	3.88	2.85	1.36	6.65	6.01	1.11	6.08	7.24	0.84	7.18	11.16	0.64
6	4.07	3.40	1.20	5.20	8.29	0.63	6.85	7.00	0.98	7.41	8.36	0.89
7	4.21	4.38	0.96	4.44	4.22	1.05	6.73	6.00	1.12	7.26	10.44	0.70
8	4.75	3.25	1.46	4.76	7.42	0.64	5.69	6.01	0.95	7.31	9.26	0.79
9	2.74	3.04	0.90	4.82	7.15	0.67	6.34	7.99	0.79	6.08	9.30	0.65
10	4.99	3.13	1.59	2.18	2.59	0.84	6.18	6.15	1.00	7.54	10.66	0.71
11	4.14	2.78	1.49	5.25	5.43	0.97	6.30	8.15	0.77	7.08	9.72	0.73
12	3.92	3.22	1.22	5.60	5.42	1.03	5.69	7.23	0.79	6.99	11.14	0.63
13	3.98	4.09	0.97	5.09	6.85	0.74	7.33	7.45	0.98	6.88	9.08	0.76
14	2.22	7.13	0.31	2.95	3.71	0.80	6.69	7.13	0.94	6.57	8.33	0.79
15	3.50	1.04	3.36	5.99	7.37	0.81	6.96	7.83	0.89	7.70	8.98	0.86
16	3.77	3.05	1.24	6.44	6.99	0.92	6.56	10.44	0.63	8.23	9.91	0.83
17	3.90	2.98	1.31	5.64	9.04	0.62	7.38	9.57	0.77	8.59	11.43	0.75
18	4.51	2.96	1.52	5.34	8.30	0.64	5.72	8.15	0.70	8.79	10.90	0.81
19	3.81	1.30	2.93	5.41	2.18	2.48	6.01	3.05	1.97	8.05	7.13	1.13
20	3.84	1.30	2.95	4.87	5.50	0.89	6.30	8.70	0.72	8.68	10.62	0.82
21	4.13	4.40	0.94	6.40	9.50	0.67	6.87	8.58	0.80	8.83	11.36	0.78
22	2.03	4.40	0.46	5.82	7.01	0.83	4.69	8.17	0.57	7.84	10.07	0.78
23	3.73	3.99	0.93	5.83	6.04	0.96	8.14	9.71	0.84	8.28	10.11	0.82
24	3.61	5.27	0.68	6.23	7.52	0.83	6.80	7.05	0.96	8.11	10.53	0.77
25	4.25	3.88	1.10	5.98	8.35	0.72	7.34	7.75	0.95	8.42	3.86	2.18
26	2.41	3.21	0.75	5.98	7.64	0.78	6.83	8.57	0.80	5.57	10.19	0.55
27	3.98	4.27	0.93	5.75	6.28	0.92	5.58	9.01	0.62	8.41	11.71	0.72
28	4.23	6.00	0.70	4.70	5.21	0.90	6.31	7.45	0.85	7.73	6.70	1.15
29	3.62	3.38	1.07	5.84	7.47	0.78	7.56	10.56	0.72			
30	4.82	8.65	0.56				8.11	8.82	0.92			
31	4.95	6.11	0.81				6.20	8.68	0.71			
<b>Prom</b>	<b>3.81</b>	<b>3.73</b>	<b>1.25</b>	<b>5.16</b>	<b>6.25</b>	<b>0.89</b>	<b>6.52</b>	<b>7.82</b>	<b>0.87</b>	<b>7.90</b>	<b>9.82</b>	<b>0.85</b>

**Tabla 19.- Evaporación diaria calculada por el Método de Penman y a través de tanque evaporímetro Tipo A y su correspondiente coeficiente, para el período enero-abril 2008.**

Para tener una mayor precisión en el cálculo de la evaporación, se estableció un procedimiento para usar la ecuación (6.15) con datos de campo provenientes de la EMA Agustín Melgar.

Con esto se obtiene una evaporación calculada que se divide entre la medida en el evaporímetro de la estación climatológica convencional Cañón Fernández, misma que se ubica en el vaso de la presa Francisco Zarco y como ya se indicó, a 15 km de la EMA Agustín Melgar, para obtener los coeficientes de los evaporímetros en la forma:

$$C_e = \frac{\text{Evaporación calculada}}{\text{Evaporación medida}} = \frac{E_c}{E_m} \quad (7.1)$$

Los coeficientes obtenidos para los meses de enero a abril de 2008 (Tabla 19), son diferentes al que tradicionalmente se viene utilizando en el vaso de la presa Francisco Zarco, para el cálculo de volumen de agua evaporado del vaso y mismo que es utilizado en el balance hidrológico de la presa.

Estos valores son congruentes a los obtenidos por A. R. Ocón en su estudio del 2000 y aplicado para el Cálculo de la evaporación en el lago de Chapala y en cual obtiene valores del coeficiente de evaporación más altos para los meses donde se tiene mayores velocidades de viento y para el caso de la región donde se ubica la presa Francisco Zarco, los meses donde se tiene vientos más fuertes, es durante el invierno, los cuales se asocian con el tránsito de los sistemas frontales por la región.

## 5.- Método antitránsito

Tomando en cuenta las conclusiones de A. Aldama y Aguilar, E. (1997) en el sentido de que "... el método de diferencias centrales es el más confiable, dado que no exhibe oscilaciones espúreas y es más preciso que los otros dos métodos estudiados...", para el presente estudio, se tomarán como referencia los resultados que se obtengan por medio del método de Diferencias Centrales.

En el siguiente cuadro, se muestran las diferencias obtenidas de los hidrogramas de entrada a la presa Francisco Zarco, utilizando las batimetrías de los años 1991 y 2007, no exhibiéndose diferencias importantes y resultando una diferencia de 23.391 millones de metros cúbicos.

Cabe resaltar que la diferencia entre el volumen de aportaciones anual calculado a partir de las hojas de Registro de Régimen de Almacenamiento (Formato 212-15) utilizadas en las oficinas

de hidrometría de la Comisión Nacional del Agua y los hidrogramas obtenidos por medio del antitránsito, las diferencias en las aportaciones son las siguientes:

Hoja de Registro de Régimen de Almacenamiento = 2,436.465 millones de metros cúbicos

Hidrograma antitránsito batimetría 1991 = 2,190.357 millones de metros cúbicos

Hidrograma antitránsito batimetría 2007 = 2,166.966 millones de metros cúbicos

Aforado vs Batimetría 1991 = 246.108 millones de metros cúbicos

Aforado vs Batimetría 2007 = 269.499 millones de metros cúbicos

**Cuadro comparativo hidrograma de entrada durante el año 2008  
 Presa Francisco Zarco**

Mes	Diferencias centradas		Variación (Mm <sup>3</sup> )
	Batimetría 1966 (Mm <sup>3</sup> )	Batimetría 2007 (Mm <sup>3</sup> )	
Enero	-2.642	-1.838	-0.804
Febrero	0.961	0.844	0.117
Marzo	199.699	201.089	-1.39
Abril	2.765	2.216	0.549
Mayo	280.31	270.399	9.911
Junio	224.07	229.827	-5.757
Julio	175.24	172.897	2.343
Agosto	124.818	107.493	17.325
Septiembre	681.126	678.369	2.757
Octubre	506.87	506.548	0.322
Noviembre	0.661	2.766	-2.105
Diciembre	-3.521	-3.644	0.123
Suma anual			23.391

**Tabla 20.- Comparativo de los resultados obtenidos del antitránsito utilizando el método de Diferencias Centrales y con datos de las batimetrías de los años 1966 y 2007.**

De la Tabla 20, es interesante hacer notar los valores negativos de los meses de enero y diciembre, los cuales pudieran estar relacionados con mayores tasas de evaporación, mismas que sobrepasan la aportación al vaso por escurrimientos en el cauce del río Nazas.

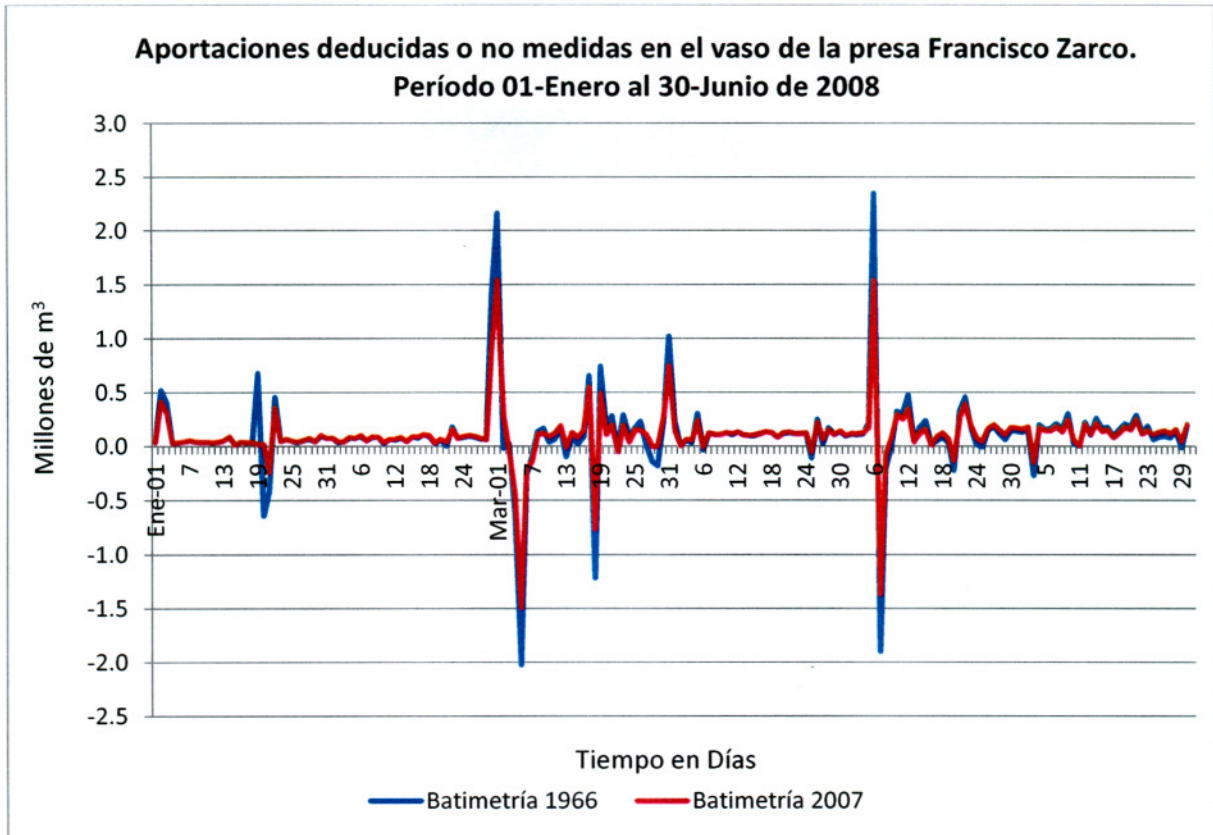
**Cuadro comparativo hidrograma de entrada durante el año 2008**  
**Presa Francisco Zarco**

Mes	Aportaciones (Mm <sup>3</sup> )		Variación (Mm <sup>3</sup> )
	Hoja de régimen de almacenamiento	Dif. Centradas Batimetría 2007	
Enero	1.019	-1.838	2.857
Febrero	16.246	0.844	15.402
Marzo	234.698	201.089	33.609
Abril	5.068	2.216	2.852
Mayo	220.459	270.399	-49.940
Junio	273.981	229.827	44.154
Julio	198.111	172.897	25.214
Agosto	118.538	107.493	11.045
Septiembre	1,696.933	678.369	1,018.564
Octubre	600.558	506.548	94.010
Noviembre	21.380	2.766	18.614
Diciembre	9.147	-3.644	12.791
<b>Suma anual</b>	<b>3,396.138</b>	<b>2166.966</b>	<b>1,229.172</b>

*Tabla 21.- Comparativo entre las aportaciones obtenidas a través de la Hoja de Régimen de Almacenamiento y el antitránsito utilizando el método de Diferencias Centrales, con datos de las batimetrías de los años 1966 y 2007.*

Mes	Forma 212-10	Balance batimetría 1966	Balance batimetría 2007
Enero	-1.53	2.13	2.02
Febrero	-5.11	3.33	2.97
Marzo	-39.46	2.12	2.62
Abril	3.18	3.25	3.24
Mayo	-36.14	4.18	4.13
Junio	-40.62	4.06	4.08
<b>Total en el período</b>	<b>-119.68</b>	<b>19.07</b>	<b>19.07</b>
<b>Total anual</b>	<b>-163.38</b>		

*Tabla 22.- Aportaciones deducidas o no medidas al vaso de la presa Francisco Zarco, período Enero-Junio 2008.*

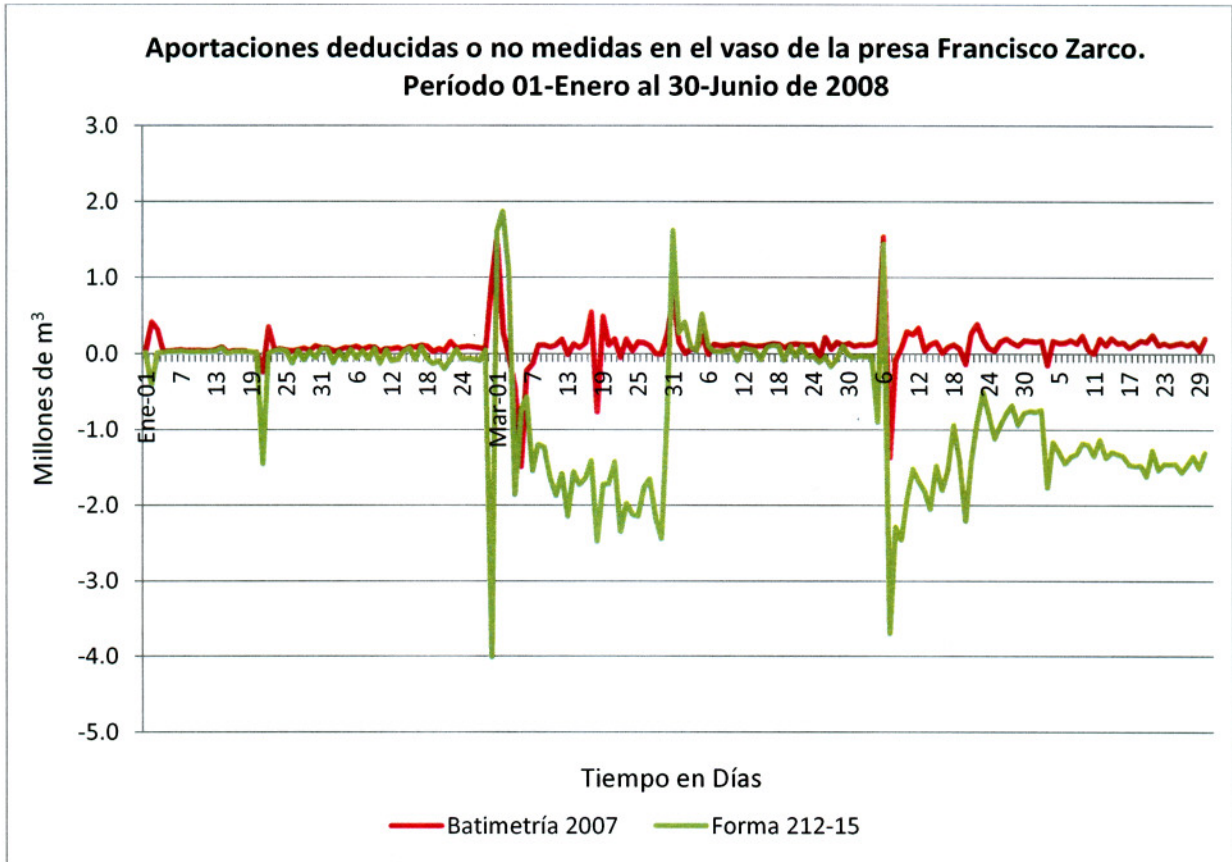


**Figura 26.- Gráfica comparativa de los resultados obtenidos del cálculo de las aportaciones deducidas utilizando la curva de elevación-áreas-capacidades de las batimetrías de 1966 y 2007 del vaso de la presa Francisco Zarco.**

La Tabla 22 y la Figura 26, muestran los resultados obtenidos con el cálculo de las aportaciones deducidas o no medidas a través del balance del hidrológico del vaso de la presa Francisco Zarco, notando que estas solo se magnifican, resultando mayores si analizamos las aportaciones obtenidas con la curva elevación-áreas-capacidades de 1966, pero el total de las aportaciones no medidas en el período es muy similar. Cabe mencionar, que en el balance, solo cambió el valor de almacenamiento obtenidos de cada curva de elevación-áreas-capacidades y las aportaciones, determinadas a partir del método de diferencias centrales del antitránsito. Los datos de Extracciones, área y evaporación fueron constantes en ambos balances.

Mientras que la Figura 27 se aprecia la gran diferencia entre las aportaciones deducidas determinadas a través del balance utilizando la batimetría del 2007 y las evaporaciones calculadas por medio del método de Penman vs las aportaciones deducidas determinadas con

el formato 212-15, que forma parte de la metodología tradicional utilizada en casi todas las áreas de hidrometría de la CONAGUA.



**Figura 27.- Gráfica comparativa de los resultados obtenidos del cálculo de las aportaciones deducidas utilizando la curva de elevación-áreas-capacidades de las batimetrías de 2007 del vaso de la presa Francisco Zarco y la Forma 212-15.**

## **VIII.- Conclusiones**

- I. Para tener una mayor certeza de los volúmenes de agua que se aprovechan en los módulos I Rodeo y II Nazas, se recomienda realizar una campaña a través de la cual se actualice el inventario de las derivaciones de agua y a su vez instrumentar con equipo electrónico las corrientes que confluyen con el cauce del río Nazas, en el tramo comprendido entre las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco y con estas acciones, conocer con mayor certeza la eficiencia de conducción que se tiene en estos 200 km del río Nazas.
- II. Aunque a la fecha ya se tienen medidores electrónicos tanto de nivel de cómo de cudal en varios puntos del río Nazas comprendidos entre las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco (“El Palmito II”, “Paso Nacional”, “Agustín Melgar” y “Cañón Fernández II”), es necesario verificar a través de otros métodos de aforo, la confiabilidad de estos emplazamientos, ya que actualmente persiste la certidumbre en su eficacia a mantenerse valores de eficiencia de conducción variables e incluso por arriba del 100%, además de que en el caso del emplazamiento de la estación hidrométrica “Agustín Melgar”, su sección hidráulica es rebasada con gastos mayores a 300 m<sup>3</sup>/s, situación que introduce incertidumbre al balance hidrológico de la presa Francisco Zarco.
- III. Aun mejorando las estaciones de aforo a través del uso de equipo electrónico automatizado, la presencia del concepto de aportaciones deducidas sigue presentándose y aunque la variable evaporación no representa valores importantes, si queda manifiesto el hecho de que el cálculo de la evaporación se está realizando actualmente de manera errónea al estar aplicando un coeficiente de evaporación constante a lo largo de los 12 meses del año y no variable como se demostró en este estudio, por lo tanto, se propone que se instalen al menos dos estaciones meteorológicas automáticas, distribuidas al inicio y en un punto medio del vaso de la presa Francisco Zarco y conjunto con la EMA “Agustín Melgar”, determinar con mayor precisión la evaporación que ocurre en el vaso de esta obra hidráulica.
- IV. Considerando la gran variabilidad que se tiene en las lecturas de la escala limnimétrica, se sugiere la instalación de un limnómetro electrónico en el vaso de la presa, por medio





del cual se tendrá un mayor precisión en el balance hidrológico, cerrar el intervalo de tiempo y espacio entre lecturas.

## **IX.- Glosario de Términos**

**Acuífero:** cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.

**Aforo:** mediciones realizadas en un cauce con el objetivo de obtener datos básicos para calcular el caudal que pasa por una sección transversal del mismo.

**Cambio de almacenamiento:** incremento o decremento del volumen de agua almacenada en la unidad hidrogeológica en un intervalo de tiempo cualquiera.

**Cauce de una corriente:** el canal natural o artificial que tiene la capacidad necesaria para que las aguas de la creciente máxima ordinaria escurran sin derramarse. Cuando las corrientes estén sujetas a desbordamiento, se considera como cauce el canal natural, mientras no se construyan obras de encauzamiento.

**Cauce principal:** el canal principal que capta y conduce el agua hasta la descarga de una cuenca.

**Caudal base:** gasto o caudal que proviene del agua subterránea.

**Comisión:** Comisión Nacional del Agua, órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**Creciente máxima ordinaria:** es la que ocurre dentro de un cauce sin que en éste se produzca desbordamiento, en un periodo de retorno de cinco años.

**Cuenca hidrológica:** el territorio donde las aguas fluyen al mar a través de una red de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboken en el mar. La cuenca, conjuntamente con los acuíferos constituyen la unidad de gestión del recurso hidráulico.

**Cuencas homogéneas:** son las cuencas hidrológicas en que, por tener características geomorfológicas, climatológicas, geológicas e hidrológicas similares, es válido transferir información hidrológica de una a otra.

**Derrame de un embalse:** es aquél que descarga a través de una obra de excedencias.

**Descarga natural:** volumen de agua que descarga una unidad hidrogeológica a través de manantiales, vegetación, ríos y humedales, o subterráneamente a cuerpos de agua (mares, lagos y lagunas).

**Descarga natural comprometida:** fracción de la descarga natural de una unidad hidrogeológica, que está comprometida como agua superficial para diversos usos o que debe conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad a una unidad hidrogeológica.

**Diversos usos:** se refiere a todos los usos definidos en la Ley de Aguas Nacionales, como doméstico, agrícola, acuícola, servicios, industrial, conservación ecológica, pecuario, público urbano, recreativo y otros.

**Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica:** volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas.

**Disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica:** valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca hacia aguas abajo y el volumen anual actual comprometido aguas abajo.

**Escorrimento desde aguas arriba:** es el volumen medio anual de agua que en forma natural proviene de una cuenca hidrológica ubicada aguas arriba de la cuenca o subcuenca en análisis.

**Escorrimento natural:** es el volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica.

**Evaporación:** es el proceso por el cual el agua, en la superficie de un cuerpo de agua natural o artificial o en la tierra húmeda, adquiere la suficiente energía cinética de la radiación solar, y pasa del estado líquido al gaseoso.

**Evapotranspiración:** es la cantidad total de agua que retorna a la atmósfera en una determinada zona por evaporación del agua superficial y del suelo, y por transpiración de la vegetación.

**Extracción de agua subterránea:** volumen de agua que se extrae artificialmente de una unidad hidrogeológica para los diversos usos.

**Extracción de agua superficial:** volumen de agua que se extrae artificialmente de los cauces y embalses superficiales para los diversos usos.

**Exportación:** es el volumen de agua superficial o subterránea que se transfiere de una cuenca hidrológica o unidad hidrogeológica a otra u otras, hacia las que no drena en forma natural.

**Hidrograma:** representación gráfica de la variación del gasto o caudal con respecto al tiempo.

**Importación:** es el volumen de agua que se recibe en una cuenca hidrológica o unidad hidrogeológica desde otra u otras, hacia las que no drena en forma natural.

**Parteaguas:** límite físico de una cuenca o subcuenca hidrológica, representado por la línea imaginaria formada por los puntos de mayor elevación topográfica, que las separa de las vecinas.

**Programación hidráulica:** conjunto de programas y estrategias, mediante los cuales se precisan los objetivos nacionales, regionales, estatales y locales de la política en la materia; las prioridades para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales; la conservación de su cantidad y calidad; los instrumentos para la implantación de acciones programadas; los responsables de su ejecución, y el origen y destino de los recursos requeridos.

**Recarga total:** volumen de agua que recibe una unidad hidrogeológica, en un intervalo de tiempo específico.

**Retornos:** son los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de la cuenca hidrológica, como remanentes de los volúmenes aprovechados en los diferentes usos del agua.

**Subcuenca:** fracción de una cuenca hidrológica, que corresponde a la superficie tributaria de un afluente o de un sitio seleccionado.

**Transpiración:** es el proceso por el cual la vegetación extrae humedad del suelo y la libera al aire circundante como vapor.

**Unidad de gestión:** territorio de la cuenca o subcuenca hidrológica superficial, o del acuífero o las unidades hidrogeológicas contenidas en ella, que se definen como una unidad para la evaluación, manejo y administración de los recursos hídricos.

**Unidad hidrogeológica:** conjunto de estratos geológicos hidráulicamente conectados entre sí, cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales subterráneas.

**Volumen anual de extracción de agua superficial:** cantidad de agua que se debe preservar para satisfacer los derechos de explotación, uso o aprovechamiento de agua asignada o concesionada, y para satisfacer las reservas establecidas conforme a la Programación Hidráulica.

## **X.- Bibliografía:**

2001. Norma Oficial Mexicana 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. Diario Oficial de la Federación.

Ingeniería y Estudios S.C. 2006. Estudio de Factibilidad de 3 presas derivadoras en los módulos de riego I Rodeo y II Nazas del Distrito de Riego 017 Región Lagunera. Municipios de Rodeo y Nazas, estado de Durango.

Ray K. Linsley, Max A. Kohler y Joseph L. H. Paulhus. 1977. Hidrología para ingenieros. Segunda Edición. McGraw-Hill. México, D.F. 386 pp.

Daniel Francisco Campos Aranda. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Tercera Reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. San Luis Potosí, México.

Grupo Mexicano de Ingeniería, Servicio y Publicidad, S.A. de C.V. Plan Director del Distrito de Riego 017.

Alvaro A. Aldama y Ernesto Aguilar. 1997. Tránsito inverso para la estimación de avenidas de ingreso a vasos. Ingeniería Hidráulica en México. Volumen XII, Num. 1, páginas 15-26.

Tijerina Chavez, Leonardo. 1999. Requerimientos hídricos de cultivos bajo sistemas de fertirrigación. Terra Latinoamericana julio-septiembre, año/vol. 17 número 003. Universidad Autónoma de Chapingo. Pp 237-245.

Burman, R. D.; Nixon, P. R.; Wrigth, J. L. y Pruitt, W. O., "Water requirements" en Design and Operation Farm Irrigation Systems, Editor M. E. Jensen ASAE. St. Joseph, Michigan, 1981.

Israelsen, O. W., Principios y Prácticas de Riego, Editorial Reverté, S.A. Barcelona, 1963.

Palacios, V. E., "Técnicas para la evaluación y mejoramiento de la operación de los distritos de riego", Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México, 1972.



Palacios, V. E., "Strategies to improve water management in Mexican Irrigation Districts: A case study in Sonora". Tesis Doctoral, The University of Arizona, Tucson, Arizona, 1976.

Palacios, V. E. y Exebio, G. A., Introducción a la Teoría de la Operación de Distritos y Sistemas de Riego. Edit. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 1989.

Organización Meteorológica Mundial. Guía de Prácticas Hidrológicas. OMM-168. Adquisición y Proceso de Datos, Análisis, Predicción y Otras Aplicaciones. Quinta edición 1994.

Valdés, H. 2002. Implementación de un modelo de evapotranspiración basado en la ecuación de Penman-Monteith para tomate cultivado en invernadero. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Talca, Chile.

Allen, R., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 300 p. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy.

Antonioletti, R., Ortega, S., Oliosio, A., 1999. Modélisation du rayonnement net pour des applications climatiques et agro-climatiques en milieu méditerranéen et tropical maritime. Institut de Géographie, France. Publications de l'Association Internationale de Climatologie (AIC). Vol.12. p. 335-341

Brutsaert, W. 1982. Evaporation in the atmosphere: Theory, history, and applications. 229 p. D. Reidel, Higham, Massachusetts, USA.

Farahani, H.J., and W.C. Bausch. 1995. Performance of evapotranspiration models for maize-bare soil to closed canopy. American Society of Agricultural Engineers. Trans. ASAE 38: 1049-1059.

Jensen M.E., R.D. Burman, and R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. 332 p. Manual and reports on engineers practices No. 70. American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, USA.

Kjelgaard J., C. Stockle, J. Villar Mir, R. Evans and G. Campbell. 1994. Evaluating methods to estimate corn evapotranspiration from short-time interval weather data. American Society of Agricultural Engineers. Trans. ASAE. 37:1825-1833.

Monteith, J.L., and M.H. Unsworth. 1990. Principles of environmental physics. 291 p. Edward Arnold, London, England.

Ortega-Farías, S., R. Antonioletti, and A. Olioso. 2000a. Net radiation model evaluation at an hourly time step for mediterranean conditions. *Agronomie (Paris)* 20:157-164.

Ortega-Farias S., R. Calderón, C. Acevedo, y S. Fuentes. 2000b. Estimación de la evapotranspiración real diaria de un cultivo de tomates usando la ecuación de Penman-Monteith. *Ciencia e Investigación Agraria* 27:91-96.

Ortega-Farias, S., R. Cuenca, and M. Ek. 1996. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. *Agric. For. Meteorol.* 81:131-143.

Ortega-Farias, S., W. Mediavilla, S. Fuentes, y R. Cuenca. 1998. Validación de un modelo para estimar la radiación neta de una cubierta vegetal en condiciones de referencia. *Ciencia e Investigación Agraria* 25:103-107.

Rana, G., N. Katerji, M. Mastrorilli, M. El Moujabber, and N. Brisson. 1997. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. *Agric. For. Meteorol.* 86: 215-224

Valdés, H. 2002. Implementación de un modelo de evapotranspiración basado en la ecuación de Penman-Monteith para tomate cultivado en invernadero. 45 p. Tesis de Magíster en Horticultura. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Agrarias, Talca, Chile.

Allen, Richard G. Walter, Ivan A. Elliott, Ronald. Howell, Terry. Itenfisu, Daniel and Marvin Jensen. 2002. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. ASCE-EWRI. Kimberly, Idaho.

Ocón, A. R. Ramírez, A.I. Aldama, A. A. Aparicio, F.J. y R. Mejía. 2000. Cálculo de la evaporación en el lago de Chapala. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, Mex.

Aldama, A., Aguilar, E. , Antitránsito de avenidas en vasos, XVII Congreso Latinoamericano de hidráulica. Guayaquil – Ecuador, 1996





Aldama, A, Aguilar, E., Tránsito inverso para la estimación de avenidas de ingreso a vasos, Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XII Núm. 1, II Época, enero-abril de 1997

Gear, C.W. , Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations, Prentice-Hall.

Fantula,S.O. , Numerical Methods for Inicial Value Problems in Ordinary Differential Equations, Academic Press.

Mickens, R.E. , Difference Equations, Van Nostrand Reinhold.

Ponce, V.M. , Engineering Hydrology-Principles and Practices, Prentice-Hall.

## XI.- Anexos

### **A.- Determinación de eficiencias**

La eficiencia de almacenamiento, es la relación entre el volumen que se deriva para riego ( $V_d$ ), entre el volumen que entra a un vaso de almacenamiento ( $V_e$ ) para el mismo fin;

$$E_s = \frac{V_d}{V_e} \quad (11.1)$$

La eficiencia de conducción, es la relación entre el volumen de agua que se entrega a las parcelas para riego ( $V_p$ ) y el volumen que se deriva de la fuente de abastecimiento ( $V_d$ );

$$E_c = \frac{V_p}{V_d} \quad (11.2)$$

Finalmente, la eficiencia de uso para riego es la relación entre el volumen utilizado por las plantas en el proceso evapotranspirativo ( $V_u$ ) y el volumen que llega a las parcelas para riego ( $V_p$ );

$$E_u = \frac{V_u}{V_p} \quad (11.3)$$

Es importante señalar que el volumen usado en el proceso de evapotranspiración ( $V_u$ ), es igual al volumen evapotranspirado por la planta menos el volumen de precipitación efectiva.

El producto de las tres eficiencias es la eficiencia total de uso de agua para la irrigación; ( $E_i$ ). Expresado en forma funcional se tiene:

$$E_i = E_s E_c E_u \quad (11.4)$$

Adicionalmente, se maneja el término eficiencia de aplicación del riego, que difiere del de eficiencia del uso del agua para riego; según Israelsen (1963) dicha eficiencia se expresa como:

$$Ea = \frac{Vr}{Vp} \quad (11.5)$$

Donde Vr es el volumen de agua útil almacenado en la zona de exploración de las raíces de las plantas, Vp es el volumen recibido en la parcela y Ea es la eficiencia de aplicación. También, si se considera que el volumen de pérdidas de agua por escurrimiento vale E y el de percolación D, entonces también se puede expresar esta eficiencia como:

$$Ea = \frac{(Vp - E - D)}{Vp} \quad (11.6)$$

Para hacer más claros los conceptos anteriormente descritos, a continuación se presentan algunos ejemplos del cálculo de los diferentes tipos de eficiencias.

### **Eficiencia de almacenamiento**

Como ejemplo de la estimación de la eficiencia de almacenamiento, pueden usarse datos del Distrito de Riego del Río Mayo, en Sonora; en este Distrito se tiene información de 34 años de operación de la Presa "Adolfo Ruiz Cortinez", con entradas promedio de 980 Hm<sup>3</sup> y salidas de 830 Hm<sup>3</sup>, por lo que la eficiencia de almacenamiento es de 85%. De los 150 Hm<sup>3</sup> que en promedio anual se han perdido, 100 Hm<sup>3</sup> lo fueron por derrames por el vertedor y otros 50 Hm<sup>3</sup> por evaporación en el vaso, las pérdidas por filtración no son significativas.

Esta eficiencia puede aumentarse en algunos casos, mediante un mejor manejo del vaso de almacenamiento; sin embargo, la mayoría de las veces la baja eficiencia se debe a una falta de capacidad de dichos vasos, para poder regular las variaciones de los caudales que le entran; así en el caso de la Presa anterior, la eficiencia de almacenamiento aumentó cuando su capacidad también aumentó.

### **Eficiencia de conducción**

Se estima que en promedio en los Distritos de Riego del país se pierde un 40% del agua en la conducción; es decir la eficiencia media de conducción es del orden del 60%. No obstante, debe

recordarse que no toda el agua se desperdicia, ya que parte va a los acuíferos y posteriormente puede ser nuevamente aprovechada; sin embargo, en los Distritos costeros, la mayor parte del agua perdida se va hasta el mar, sin que sea posible su utilización.

Las pérdidas en conducción pueden subdividirse de acuerdo a su origen en: a) por infiltración; b) por evaporación; c) por manejo del agua en la red de distribución.

- a) Las pérdidas por infiltración se producen principalmente en los cauces naturales de las corrientes y en los canales no revestidos; sin embargo, en algunos casos de revestimientos agrietados o con mampostería en mal estado, también pueden ser de mucha importancia. El monto de estas pérdidas es variable, destacando el caso de los canales no revestidos, construidos en suelos permeables, donde pueden ser de mucha consideración.
- b) Las debidas a la evaporación son relativamente menores que las de infiltración; sin embargo, en muchos distritos de riego el área expuesta a la evaporación en los cauces naturales o canales con diques, puede ser grande y en consecuencia las respectivas pérdidas por evaporación de importancia.
- c) Las fugas por las estructuras, en la actualidad son muy importantes en la mayoría de los Distritos de Riego debido al mal estado en que se encuentran. En efecto, en muchas compuertas radiales sobre desfuegos de canales principales y de laterales cerrados que no se utilizan en un momento dado, el agua que se fuga por el mal estado de los sellos o por las perforaciones que se han producido debido a la corrosión del fierro por falta de conservación, puede representar un porcentaje considerable del agua conducida.
- d) Las pérdidas por manejo se producen durante la distribución del agua, por causas atribuibles a errores del manejo del sistema. Como en la mayoría de los Distritos de Riego el agua se distribuye de acuerdo a la demanda, es necesario hacer un programa para solicitar el agua de las fuentes de abastecimiento; en estos programas se consideran factores de pérdida que varían de acuerdo al estado de la red de distribución, sin embargo, lo más común es que se consideren constantes y mayores que los reales, lo que propicia desperdicios, ya que se solicitan volúmenes mayores que los necesarios. Otros factores que inciden en estas pérdidas, son el

aprovechamiento deficiente de los volúmenes almacenados en los vasos de los canales de riego y las variaciones en carga sobre las compuertas que también propician desperdicios de agua en la red.

Para hacer más objetiva la explicación sobre las pérdidas descritas, puede continuarse con el ejemplo del Distrito de Riego del Río Mayo en Sonora. En este Distrito se llevó al cabo un minucioso estudio sobre la eficiencia en el uso del agua (Palacios, 1976), en base al cual pueden explicarse las metodologías utilizadas para la estimación de los diferentes componentes de dichas pérdidas.

Para evaluar los componentes de las pérdidas de conducción, se efectuaron muestreos con infiltrómetros y evaporímetros sobre varios tipos de canales, se utilizaron los datos de los informes de distribución de aguas, en los que se presentan las pérdidas mensuales por tramos de canales; también se muestrearon las pérdidas por fugas en estructuras y se realizaron aforos en diferentes tramos de canales para afinar la información obtenidas en la muestra con los infiltrómetros, la que se expandió con el apoyo del estudio agrológico.

Para evaluar las pérdidas por manejo, se utilizó la metodología desarrollada por Palacios (1972), mediante el análisis de los caudales extraídos de la presa y los servidos durante 311 días de operación, utilizando la técnica de regresión. La metodología referida, permite evaluar los componentes de las pérdidas, mediante el uso de un modelo lineal que explica la relación entre los caudales extraídos de la presa ( $Q_e$ ) y los servidos a nivel de parcela, ( $Q_s$ , suma de todas las entregas), de manera que:

$$Q_e = B Q_s + A \quad (11.7)$$

donde A y B son los parámetros de la ecuación con un significado específico. Se demuestra que B es mayor que la unidad (demostración por métodos estadísticos) y fácilmente se entiende que A es un caudal de pérdida. Si no existieran pérdidas por manejo, B sería igual a la unidad, pero conforme estas crecen, el valor de B también lo hace; por lo tanto, si B es mayor que la unidad, puede representarse como:  $B = 1 + k$ ; donde k es una fracción positiva, luego la ecuación (11.7) también se puede expresar como:

$$B = Q_s + (k Q_s + A) \quad (11.8)$$

donde los valores en los paréntesis representan las pérdidas de conducción en dos componentes. El primer componente,  $k Q_s$ , son pérdidas relacionadas con el manejo, en cambio A representa las pérdidas más o menos constantes en la red o las intrínsecas.

En general, las pérdidas por manejo se relacionan con las variaciones de los caudales. Efectivamente, B es la pendiente en la ecuación de la línea recta y se demuestra que también se puede representar como:

$$B = \frac{\sigma_e}{\sigma_s} R \quad (11.9)$$

donde:

- B - coeficiente de regresión del modelo;
- $\sigma_e$  - desviación estándar de las extracciones;
- $\sigma_s$  - desviación estándar de los caudales servidos;
- R - coeficiente de correlación entre  $Q_e$  y  $Q_s$ .

Bajo el supuesto de que R es un valor muy cercano a la unidad si los errores en los aforos son normalmente distribuidos y con media cero, entonces si  $B > 1$  se tiene que  $\sigma_e > \sigma_s$ ; es decir la variación en los caudales extraídos es mayor que la de los caudales servidos; esta diferencia se debe principalmente a los errores en el manejo a los cuales ya se ha hecho mención.

Para el caso analizado, la ecuación encontrada fue:

$$Q_e = 1.245Q_s + 6.7 \quad (11.10)$$

Con un coeficiente de correlación de 0.97; luego el componente de las pérdidas de manejo vale  $0.245 Q_s$ . Durante el ciclo analizado los valores medios de los caudales fueron:

$$Q_e = 32 \text{ M}^3/\text{seg} \text{ y } Q_s = 20.3 \text{ M}^3/\text{seg}$$

La eficiencia de conducción es:  $E_c = 20.3 * 100 / 32 = 63.5\%$  y las pérdidas por manejo valen aproximadamente 5 M3/seg. Expresadas en porcentajes, las pérdidas intrínsecas representan el 57% y las de manejo el 43% de las totales, que para el caso son de 11.7 M3/seg.

Para el año analizado, el volumen total extraído de la presa fue de 860 Hm3, el servido 545 Hm3, las pérdidas totales de conducción de 315 Hm3, divididas en 180 Hm3 de intrínsecas y 135 Hm3 por manejo.

Por otra parte, los muestreos permitieron estimar los componentes de las pérdidas intrínsecas según la Tabla 23

**Tabla 23.- Distribución de las pérdidas de conducción en el D. R. Río Mayo, Sonora**

Tipo de pérdidas	Pérdidas	
	Hm3	%
Evaporación	42.7	13.6
Infiltración	102.4	32.5
Fugas	33.4	10.6
Manejo	136.5	43.3
TOTAL	315.0	100.0

### **Eficiencia del uso del agua para riego**

Para evaluar la eficiencia en el uso del agua para riego, es necesario conocer el volumen de agua que consumen las plantas en el proceso evapotranspirativo y la cantidad de precipitación que puede ser aprovechada en dicho proceso. Estimar estos componentes es muy difícil, debido a la cantidad de factores del clima, del suelo y de las plantas que influyen.

Una función que permite evaluar dicha eficiencia, bajo el supuesto de que no hay aportación de agua del manto freático es:

$$Eu = \frac{Et + Rl - Pe}{Lr} \quad (11.11)$$

donde:

Et - Lámina de evapotranspiración real, mm;

Rl - lámina de requerimiento de lavado, mm;

Pe - precipitación efectiva, mm;

Lr - lámina de riego aplicada, mm.

Desafortunadamente no hay medios satisfactorios para estimar los requerimientos de lavado agregados, cuando se consideran muchas parcelas con diferentes condiciones de afectación; tampoco es fácil estimar la evapotranspiración real de los cultivos, ni la precipitación efectiva.

No obstante, Palacios (1989) describe un método que permite hacer una estimación aproximada si se dispone de suficiente información de estadísticas de siembras, datos meteorológicos, de suelos y de los cultivos establecidos.

Uno de los principales problemas a resolver, es como calcular la evapotranspiración real de los cultivos establecidos en un Distrito de Riego, ya que los procedimientos disponibles solamente permiten estimar la evapotranspiración máxima, es decir cuando el cultivo no sufre por falta de agua en el suelo. Este método supone que puede estimarse la reducción de la evapotranspiración máxima, considerando que dicha reducción es proporcional a la relación número de riegos aplicados a número de riegos necesarios; por lo tanto, si para un tipo determinado de cultivo que se desarrolle en el suelo de características conocidas, se conoce el número de riegos que se aplicó y el necesario para que logre la máxima evapotranspiración, es posible estimar la evapotranspiración real; esto es:

$$Et = Et_x \frac{Nr_a}{Nr_x} \quad (11.12)$$



donde:

$E_t$  - evapotranspiración real, mm;

$E_{t_x}$  - evapotranspiración máxima, mm;

$Nr_a$  - número de riegos aplicados;

$Nr_x$  - número de riegos requeridos;

En todo caso  $E_{t_x}$  deberá ser mayor o cuando menos igual a  $E_t$ . Por otra parte, al calcular el requerimiento de riego agregado para todo el Distrito, es necesario considerar que las fechas en las que se van estableciendo los cultivos varían, en un intervalo de tiempo que puede ser de varias semanas e incluso meses.

Este método, cuya aplicación se facilita utilizando un programa de cálculo para una computadora personal, requiere de bastante información, la cual no siempre está disponible; sin embargo, en el Distrito de Riego del Río Mayo fue posible obtenerla para varios años, con lo cual se estimó dicha eficiencia en un valor aproximado del 75%.

Al llevar al cabo este análisis se detectó que algunos cultivos se lograban con una lámina mínima de riego y consecuentemente muy pocos riegos. Comparando sus rendimientos con los esperados de funciones de respuesta específicas de dichos cultivos, no había una correspondencia, por lo que se sospechó que estaban tomando agua de los mantos freáticos. Con base en los resultados esperados según las mencionadas funciones, se dedujo el probable volumen de agua utilizado del subsuelo, estimándose que de las pérdidas totales, por lo menos un 6.4% se reusaba.

En la Tabla 24, se resumen las pérdidas totales calculadas en el Distrito de Riego del Río Mayo, sobre la base de un volumen total derivado de 860 Hm<sup>3</sup>, como las pérdidas aparentes son de 451 Hm<sup>3</sup>, representan el 52% y por lo tanto la eficiencia total, sin considerar la de almacenamiento es de 48% y considerando la corrección por el reuso, dicha eficiencia sube a 51%.

**Tabla 24.- Resumen de pérdidas (Hm3) - Distrito de riego Río Mayo, Sonora**

Tipo de pérdidas	Volumen	% del total
Conducción	315	69.84
Uso en riego	136	30.16
Total	451	100.00
Reuso	-29	-6.43
TOTAL CORREGIDO	422	93.56

### **Eficiencia de aplicación**

Finalmente, para el cálculo de esta eficiencia, es necesario hacer mediciones directas en la parcela, en relación con las entradas y salidas de agua para poder estimar los diferentes componentes de la función (11.6). A continuación se muestra un ejemplo de cálculo de este tipo de eficiencia.

En una parcela de 2.26 ha de superficie, se han instalado medidores tipo Parshall, a la salida de la toma de riego, a la entrada de la parcela y en el desagüe. Los resultados de las mediciones después de 6 horas y 45 minutos de riego son:

Volumen bruto de entrada a la parcela 2430 m<sup>3</sup>

Pérdidas en 200 m de regadera 97 m<sup>3</sup>

Volumen neto de entrada 2333 m<sup>3</sup>

Volumen medido en el desagüe 673 m<sup>3</sup>

Volumen infiltrado en la parcela 1660 m<sup>3</sup>

Lámina bruta entregada en toma 0.107 m<sup>3</sup>

Lámina neta infiltrada 0.073 m<sup>3</sup>

Como se estima que la lámina neta necesaria para humedecer el suelo hasta la profundidad de exploración radical es de 0.65 M, entonces la lámina percolada será de 0.08 M, por lo tanto la eficiencia de aplicación será de: 71%

En la evaluación de eficiencias sobre el uso del agua en grandes sistemas de riego, es relativamente fácil cometer errores al considerar que toda el agua estimada como pérdida se desperdicia; sin embargo, en muchos casos una parte de ésta puede ser nuevamente aprovechada, ya sea dentro del mismo sistema o en uno vecino aguas abajo. En el caso analizado del Distrito del Río Mayo en Sonora, se ha visto que en algunos cultivos reusan el agua percolada la manto freático, en otros casos el agua escurrida también se puede aprovechar en parte. En general en los sistemas costeros es más difícil reutilizar el agua, debido al cercano desfogue al mar; sin embargo, en los sistemas interiores los desperdicios se reducen significativamente.

Por otra parte, al considerar acciones con el fin de mejorar la eficiencia en la utilización del agua, debe tenerse el cuidado de observar si dichas acciones no tienen efectos nocivos en otras partes del sistema. Por ejemplo, en la Región Lagunera durante la rehabilitación del Distrito de Riego, a fines de la década de los años sesentas, se consideró la necesidad de revestir la mayoría de los canales de riego para reducir las pérdidas por infiltración que eran considerables, esto tuvo como efecto la reducción de la recarga al acuífero.

Los abatimientos de los niveles de bombeo observados antes de 1970, eran del orden de los 80 cm anuales; después de la rehabilitación dichos abatimientos de incrementaron a 180 cm por año, con el consecuente incremento de los costos, así como una aceleración del agotamiento del acuífero. De esto se concluye la conveniencia de analizar cuidadosamente las implicaciones económicas, ecológicas y sociales de las acciones que se lleguen a tomar cuando se pretenda mejorar la eficiencia en el uso del agua.

**B.- Resultados de la aplicación del Método de Penman.**

Tiempo	Calor latente de vaporización	Viento medio a 10 m de altura	U- Velocidad al cortante	Temperatura media diaria	Presión barométrica de la estación	Presión barométrica reducida al nivel medio del mar
Días	J/kg	m/s	m/s	°C	kPa	Pa
01/03/08	2460828.50	0.0	0.0000000	17.0	88.1	101785.2
02/03/08	2454548.00	0.1	0.0048287	19.6	87.4	100884.3
03/03/08	2456325.50	0.3	0.0107551	18.9	87.4	100851.9
04/03/08	2472915.50	0.2	0.0085485	11.9	88.1	102077.1
05/03/08	2466161.00	0.0	0.0016430	14.7	87.5	101243.2
06/03/08	2462843.00	0.7	0.0283682	16.1	87.4	100994.0
07/03/08	2469597.50	0.8	0.0321384	13.3	87.9	101728.1
08/03/08	2479077.50	0.1	0.0048784	9.3	88.2	102285.8
09/03/08	2466161.00	0.0	0.0015795	14.7	87.6	101372.4
10/03/08	2462843.00	0.0	0.0019431	16.1	88.1	101866.7
02/04/08	2449215.50	0.0	0.0000000	21.9	87.7	101121.1
03/04/08	2444594.00	0.0	0.0018018	23.8	87.5	100794.7
04/04/08	2448149.00	0.0	0.0013097	22.3	87.4	100767.7
05/04/08	2455970.00	0.0	0.0005239	19.0	87.4	100846.4
06/04/08	2454192.50	0.0	0.0007779	19.8	87.4	100866.5
07/04/08	2456681.00	0.0	0.0001270	18.7	87.6	101070.9
08/04/08	2453363.00	0.0	0.0001270	20.1	87.3	100735.7
09/04/08	2451111.50	0.1	0.0022780	21.1	87.2	100513.9
10/04/08	2445779.00	0.1	0.0048100	23.3	87.2	100414.8
11/04/08	2449215.50	0.0	0.0000000	21.9	87.5	100820.1
12/04/08	2458458.50	0.0	0.0007779	18.0	87.7	101314.2
13/04/08	2457984.50	0.2	0.0083819	18.2	88.1	101764.0
14/04/08	2457392.00	0.3	0.0125172	18.4	88.2	101818.7
15/04/08	2448741.50	0.1	0.0044052	22.1	88.0	101430.9
16/04/08	2448030.50	0.0	0.0007302	22.4	87.6	100947.7
17/04/08	2448741.50	0.0	0.0005397	22.1	87.4	100696.5
18/04/08	2446727.00	0.1	0.0033893	22.9	87.7	101037.2
19/04/08	2451704.00	0.0	0.0006509	20.8	87.7	101174.0
20/04/08	2437365.50	0.1	0.0041354	26.9	87.4	100518.4
21/04/08	2443883.00	0.0	0.0005159	24.1	87.5	100695.9
22/04/08	2446727.00	0.0	0.0001270	22.9	87.4	100734.3
23/04/08	2440802.00	0.0	0.0000000	25.4	87.4	100604.4
24/04/08	2441157.50	0.0	0.0005397	25.3	87.4	100625.3
25/04/08	2438432.00	0.0	0.0001349	26.4	87.5	100608.9
26/04/08	2450163.50	0.0	0.0003810	21.5	87.5	100818.7
27/04/08	2442224.00	0.1	0.0056435	24.8	87.4	100586.0
28/04/08	2454311.00	0.6	0.0244167	19.7	88.2	101805.3

**Tabla 25.- Variables de entrada y resultados obtenidos al aplicar el Método Combinado de Penman para el cálculo de la evapotranspiración en el vaso de la presa Francisco Zarco.**



$\phi$ Constante psicrométrica	$\Delta$ Pendiente de la curva T-P	$e_s$ Presión de vapor de saturación	HR Humedad Relativa media diaria	B Coeficiente de transferencia de vapor	$e_a$ Presión de vapor actual
kPa/°C	Pa/°C	Pa	%	m Pa/s	Pa
66.83116285	122.4923466	1932.230458	25.2	0.000000000000	486.4121813
66.40909078	141.6812278	2281.752664	23.7	0.000000000018	540.1801416
66.33972873	136.0087028	2177.62686	14.2	0.000000000039	310.1606035
66.69519731	91.7100314	1389.206066	23.2	0.000000000032	322.025684
66.33154173	107.9760863	1673.234111	22.1	0.000000000006	369.6220629
66.25740509	116.8251001	1830.532437	10.3	0.000000000105	188.0109357
66.556467	99.4181829	1522.939606	15.7	0.000000000120	239.3341895
66.66544194	78.74014419	1167.976932	16.1	0.000000000018	188.2304853
66.4162134	107.9760863	1673.234111	14.6	0.000000000006	244.1295046
66.82994799	116.8251001	1830.532437	11.4	0.000000000007	207.8961839
66.70989458	159.9148956	2620.712567	16.1	0.000000000000	420.8115607
66.62031011	177.284086	2949.24969	18.1	0.000000000006	533.1178432
66.50573268	163.7898604	2693.546238	8.5	0.000000000005	227.6420674
66.34571101	137.1275524	2198.112837	20.6	0.000000000002	451.9869521
66.40700558	142.8394336	2303.092504	14.9	0.000000000003	342.904884
66.47420377	134.8975944	2157.308137	20.0	0.000000000000	431.1620012
66.34331339	145.573111	2353.565527	22.0	0.000000000000	516.6403216
66.25804721	153.2171885	2495.47065	22.4	0.000000000008	558.361558
66.33703761	172.6855579	2861.757875	13.7	0.000000000017	393.0942415
66.51137208	159.9148956	2620.712567	14.5	0.000000000000	380.549304
66.58604707	129.4566731	2058.183012	23.1	0.000000000003	475.8118922
66.89453662	130.8890682	2084.21845	24.8	0.000000000031	516.423016
66.94664422	132.6984295	2117.167824	26.0	0.000000000046	550.0225575
66.92725693	161.6274316	2652.867884	47.8	0.000000000016	1268.770911
66.62777316	164.2252648	2701.746954	30.1	0.000000000003	813.9012698
66.44270462	161.6274316	2652.867884	18.2	0.000000000002	483.779935
66.72237292	169.0795727	2793.404137	8.2	0.000000000012	229.8738821
66.67710654	151.1734278	2457.420719	17.3	0.000000000002	426.2942331
66.63475393	207.6298925	3535.242056	17.8	0.000000000015	630.205997
66.57438714	180.0924505	3002.857476	13.8	0.000000000002	414.3526254
66.52236444	169.0795727	2793.404137	18.0	0.000000000000	503.2007175
66.59786359	192.6994569	3245.104465	21.5	0.000000000000	698.3735235
66.60195795	191.2079102	3216.310334	16.1	0.000000000002	519.3001059
66.66556782	202.8956554	3442.873398	15.5	0.000000000000	531.9717577
66.48472948	156.5357737	2557.421824	21.2	0.000000000001	542.9193415
66.54685231	186.7914819	3131.260182	26.7	0.000000000020	835.8725096
67.02188224	142.452478	2295.959913	39.3	0.000000000089	901.2474527

**Continuación Tabla 25.- Variables de entrada y resultados obtenidos al aplicar el Método Combinado de Penman para el cálculo de la evapotranspiración en el vaso de la presa Francisco Zarco.**

$e_s - e_a$ Déficit de presión de vapor	Radiación Neta	K Constante de Von Kármán	Ra Relación de gases entre aire húmedo y aire seco	$q_v$ Humedad Específica	Velocidad viento medio diario a 2 m de altura	Densidad del agua	Densidad del aire
kPa	W/m <sup>2</sup>		J/kg K		en m/s	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1445.818277	250.0	0.40	287.5186754	0.002972420	0.0	998	1.22027
1741.572523	262.5	0.40	287.5811538	0.003330471	0.1	998	1.19826
1867.466257	265.7	0.40	287.333794	0.001912904	0.2	998	1.201986
1067.180382	269.9	0.40	287.3424035	0.001962243	0.2	998	1.246431
1303.612048	276.2	0.40	287.3962488	0.002270819	0.0	998	1.22378
1642.521501	279.3	0.40	287.2020522	0.001157919	0.6	998	1.215681
1283.605417	280.3	0.40	287.2553523	0.001463371	0.7	998	1.236472
979.7464468	296.3	0.40	287.1997334	0.001144630	0.1	998	1.261105
1429.104606	286.5	0.40	287.2613824	0.001497928	0.0	998	1.225918
1622.636253	270.7	0.40	287.2215084	0.001269418	0.0	998	1.226103
2199.901006	587.3	0.40	287.4516707	0.002588430	0.0	998	1.19245
2416.131846	288.8	0.40	287.5740654	0.003289848	0.0	998	1.180294
2465.90417	303.4	0.40	287.2451925	0.001405147	0.0	998	1.187325
1746.125885	301.9	0.40	287.4864537	0.002787764	0.0	998	1.200666
1960.18762	307.2	0.40	287.3689799	0.002114546	0.0	998	1.19832
1726.146135	307.6	0.40	287.4630097	0.002653412	0.0	998	1.204674
1836.925205	301.6	0.40	287.5566483	0.003190035	0.0	998	1.194557
1937.109092	244.8	0.40	287.6029279	0.003455253	0.0	998	1.187887
2468.663634	290.9	0.40	287.4248885	0.002434947	0.1	998	1.178439
2240.163263	283.6	0.40	287.4096751	0.002347762	0.0	998	1.189075
1582.37112	300.1	0.40	287.5097306	0.002921159	0.0	998	1.210489
1567.795434	288.9	0.40	287.5507916	0.003156471	0.2	998	1.214854
1567.145266	271.7	0.40	287.586312	0.003360031	0.3	998	1.214315
1384.096973	305.8	0.40	288.357653	0.007780425	0.1	998	1.191538
1887.845684	326.7	0.40	287.8750868	0.005014939	0.0	998	1.186643
2169.087949	342.5	0.40	287.5214458	0.002988296	0.0	998	1.186351
2563.530255	343.5	0.40	287.2469359	0.001415138	0.1	998	1.188081
2031.126486	328.2	0.40	287.4573158	0.002620781	0.0	998	1.197312
2905.036059	319.3	0.40	287.6804757	0.003899664	0.1	998	1.164661
2588.504851	340.9	0.40	287.4466158	0.002559461	0.0	998	1.178469
2290.20342	308.6	0.40	287.5421751	0.003107092	0.0	998	1.183304
2546.730942	314.3	0.40	287.7534362	0.004317785	0.0	998	1.171022
2697.010228	307.9	0.40	287.5601278	0.003209975	0.0	998	1.172641
2910.90164	314.9	0.40	287.573889	0.003288837	0.0	998	1.167894
2014.502483	224.5	0.40	287.5844803	0.003349534	0.0	998	1.189949
2295.387672	317.9	0.40	287.9019419	0.005168840	0.1	998	1.172559
1394.71246	307.9	0.40	287.9608362	0.005506351	0.5	998	1.207194

**Continuación Tabla 25.- Variables de entrada y resultados obtenidos al aplicar el Método Combinado de Penman para el cálculo de la evapotranspiración en el vaso de la presa Francisco Zarco.**

E <sub>b</sub> Evaporación debida a la radiación solar	E <sub>a</sub> Evaporación debida al viento	ET <sub>o</sub> Evapotranspiración potencial
m/s	m/s	mm/día
0.0000001018	0	5.69
0.0000001072	3.06976E-09	6.39
0.0000001084	7.35683E-09	6.50
0.0000001093	3.42355E-09	5.59
0.0000001122	7.95682E-10	6.03
0.0000001136	1.72374E-08	6.80
0.0000001137	1.54101E-08	6.42
0.0000001198	1.81105E-09	5.68
0.0000001164	8.38961E-10	6.26
0.0000001101	1.1663E-09	6.09
0.0000002403	0	14.65
0.0000001184	1.56669E-09	7.47
0.0000001242	1.16948E-09	7.66
0.0000001232	3.34707E-10	7.18
0.0000001254	5.56715E-10	7.41
0.0000001254	8.03016E-11	7.26
0.0000001232	8.50195E-11	7.31
0.0000001001	1.60276E-09	6.08
0.0000001192	4.28279E-09	7.54
0.0000001160	0	7.08
0.0000001223	4.51968E-10	6.99
0.0000001178	4.82133E-09	6.88
0.0000001108	7.18998E-09	6.57
0.0000001251	2.2013E-09	7.70
0.0000001337	4.98036E-10	8.23
0.0000001401	4.23904E-10	8.59
0.0000001407	3.13989E-09	8.79
0.0000001341	4.80809E-10	8.05
0.0000001313	4.27786E-09	8.68
0.0000001398	4.80343E-10	8.83
0.0000001264	1.05002E-10	7.84
0.0000001290	0	8.28
0.0000001264	5.21354E-10	8.11
0.0000001294	1.40128E-10	8.42
0.0000000918	2.78406E-10	5.57
0.0000001304	4.64094E-09	8.41
0.0000001257	1.24104E-08	7.73

**Continuación Tabla 25.- Variables de entrada y resultados obtenidos al aplicar el Método Combinado de Penman para el cálculo de la evapotranspiración en el vaso de la presa Francisco Zarco.**

**Resultados de la aplicación del Método de la Ecuación estandarizada de evapotranspiración de Referencia ASCE.**

Tiempo	Calor latente de vaporización	Temperatura máxima diaria	Temperatura mínima diaria	Temperatura media diaria	Presión barométrica de la estación	Presión barométrica reducida al nivel medio del mar
Días	Mj/kg	°C	°C	°C	kPa	kPa
01/03/08	2.45	30.0	3.9	17.0	88.1	101.8
02/03/08	2.45	32.9	6.3	19.6	87.4	100.9
03/03/08	2.45	30.5	7.2	18.9	87.4	100.9
04/03/08	2.45	25.5	-1.8	11.9	88.1	102.1
05/03/08	2.45	30.7	-1.3	14.7	87.5	101.2
06/03/08	2.45	28.7	3.5	16.1	87.4	101.0
07/03/08	2.45	25.2	1.3	13.3	87.9	101.7
08/03/08	2.45	23.5	-5.0	9.3	88.2	102.3
09/03/08	2.45	30.1	-0.7	14.7	87.6	101.4
10/03/08	2.45	29.1	3.1	16.1	88.1	101.9
02/04/08	2.45	36.3	7.4	21.9	87.7	101.1
03/04/08	2.45	37.1	10.5	23.8	87.5	100.8
04/04/08	2.45	34.6	10.0	22.3	87.4	100.8
05/04/08	2.45	34.2	3.8	19.0	87.4	100.8
06/04/08	2.45	33.6	5.9	19.8	87.4	100.9
07/04/08	2.45	34.3	3.1	18.7	87.6	101.1
08/04/08	2.45	34.3	5.9	20.1	87.3	100.7
09/04/08	2.45	33.6	8.5	21.1	87.2	100.5
10/04/08	2.45	36.1	10.5	23.3	87.2	100.4
11/04/08	2.45	34.5	9.2	21.9	87.5	100.8
12/04/08	2.45	31.4	4.5	18.0	87.7	101.3
13/04/08	2.45	28.6	7.7	18.2	88.1	101.8
14/04/08	2.45	29.1	7.7	18.4	88.2	101.8
15/04/08	2.45	33.6	10.5	22.1	88.0	101.4
16/04/08	2.45	35.2	9.5	22.4	87.6	100.9
17/04/08	2.45	35.8	8.3	22.1	87.4	100.7
18/04/08	2.45	33.3	12.5	22.9	87.7	101.0
19/04/08	2.45	36.6	5.0	20.8	87.7	101.2
20/04/08	2.45	37.3	16.4	26.9	87.4	100.5
21/04/08	2.45	38.1	10.1	24.1	87.5	100.7
22/04/08	2.45	37.7	8.1	22.9	87.4	100.7
23/04/08	2.45	38.7	12.1	25.4	87.4	100.6
24/04/08	2.45	37.1	13.4	25.3	87.4	100.6
25/04/08	2.45	35.4	17.4	26.4	87.5	100.6
26/04/08	2.45	33.5	9.4	21.5	87.5	100.8
27/04/08	2.45	34.7	14.9	24.8	87.4	100.6
28/04/08	2.45	26.8	12.6	19.7	88.2	101.8

**Tabla 26.- Variables de entrada y resultados obtenidos al aplicar el Método ASCE Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración en el vaso de la presa Francisco Zarco.**



$\phi$ Constante psicrométrica	$\Delta$ Pendiente de la curva T-P	e° Función de presión de vapor de saturación (T max)	e° Función de presión de vapor de saturación (T min)	e <sub>s</sub> Presión de vapor de saturación	HR Humedad Relativa máxima diaria	HR Humedad Relativa mínima diaria
kPa/°C	kPa/°C	kPa	kPa	kPa	%	%
0.066160388	0.122449394	4.243065059	0.80755476	2.525309909	61.0	4.0
0.065574765	0.141631546	5.002001481	0.954709881	2.978355681	58.0	2.0
0.065553712	0.13596101	4.366279321	1.015700692	2.690990006	44.0	3.0
0.06635009	0.091677873	3.263356619	0.53526908	1.89931285	58.0	5.0
0.065808076	0.107938224	4.416429033	0.555372032	2.485900533	60.0	0.0
0.065646085	0.116784135	3.936753503	0.785081093	2.360917298	38.0	0.0
0.066123239	0.099383321	3.205712243	0.671063852	1.938388048	59.0	1.0
0.066485746	0.078712533	2.895530773	0.421176492	1.658353632	49.0	3.0
0.06589208	0.107938224	4.267463105	0.580375263	2.423919184	50.0	0.0
0.066213345	0.116784135	4.028884423	0.76316117	2.396022796	37.0	0.0
0.065728683	0.15985882	6.039487268	1.029711114	3.534599191	56.0	5.0
0.065516558	0.17722192	6.309073177	1.269716891	3.789395034	56.0	1.0
0.065498991	0.163732427	5.499558649	1.227962619	3.363760634	37.0	1.0
0.065550135	0.137079468	5.378781213	0.801883779	3.090332496	65.0	1.0
0.065563209	0.142789346	5.201930456	0.928655184	3.06529282	56.0	0.0
0.0656961	0.134850292	5.408757769	0.76316117	3.08595947	60.0	1.0
0.065478187	0.145522065	5.408757769	0.928655184	3.168706477	59.0	1.0
0.06533402	0.153163462	5.201930456	1.109852891	3.155891673	59.0	3.0
0.065269602	0.172625005	5.973671742	1.269716891	3.621694317	38.0	1.0
0.065533081	0.15985882	5.469145903	1.163664563	3.316405233	46.0	2.0
0.065854248	0.129411278	4.595917317	0.842329745	2.719123531	65.0	3.0
0.066146591	0.130843171	3.914009299	1.051045857	2.482527578	56.0	4.0
0.066182159	0.132651898	4.028884423	1.051045857	2.53996514	48.0	15.0
0.065930087	0.161570756	5.201930456	1.269716891	3.235823674	86.0	7.0
0.065616008	0.164167678	5.685133793	1.187420537	3.436277165	70.0	4.0
0.065452754	0.161570756	5.876113985	1.094886043	3.485500014	56.0	0.0
0.065674183	0.169020284	5.115413295	1.449481125	3.28244721	32.0	1.0
0.065763128	0.151120418	6.139388459	0.87231096	3.50584971	51.0	4.0
0.065336992	0.207557086	6.378075735	1.865266113	4.121670924	48.0	5.0
0.065452353	0.1800293	6.660663388	1.236215522	3.948439455	48.0	1.0
0.065477316	0.169020284	6.518043762	1.080097127	3.799070444	56.0	2.0
0.065392889	0.192631886	6.879655941	1.411839132	4.145747537	45.0	4.0
0.065406435	0.191140862	6.309073177	1.537413793	3.923243485	46.0	5.0
0.065395808	0.202824509	5.748186889	1.987397189	3.867792039	42.0	3.0
0.065532185	0.156480883	5.172951386	1.179454917	3.176203152	50.0	4.0
0.06538087	0.186725982	5.530117966	1.694398038	3.612258002	53.0	4.0
0.066173468	0.142402526	3.523719593	1.459028199	2.491373896	57.0	22.0

**Continuación Tabla 26.- Variables de entrada y resultados obtenidos al aplicar el Método ASCE Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración en el vaso de la presa Francisco Zarco.**

e <sub>a</sub> Presión de vapor actual	e <sub>s</sub> -e <sub>a</sub> Déficit de presión de vapor	Radiación Neta	Radiación Neta	G Densidad de flujo calórico	Velocidad viento medio a 10 m de altura	Velocidad viento medio diario a 2 m de altura
kPa	kPa	W/m <sup>2</sup>	Mj/m <sup>2</sup> * día	Mj/m <sup>2</sup> * día	en m/s	en m/s
0.331165503	2.194144406	250.0	21.6024	0	0.0	0.0
0.32688588	2.651469801	262.5	22.67937391	0	0.1	0.1
0.288948342	2.402041664	265.7	22.9542	0	0.3	0.2
0.236811949	1.662500901	269.9	23.316	0	0.2	0.2
0.16661161	2.319288923	276.2	23.8608	0	0.0	0.0
0.149165408	2.21175189	279.3	24.1338	0	0.7	0.5
0.213992398	1.72439565	280.3	24.2154	0	0.8	0.6
0.146621202	1.51173243	296.3	25.60163478	0	0.1	0.1
0.145093816	2.278825368	286.5	24.756	0	0.0	0.0
0.141184816	2.25483798	270.7	23.39125714	0	0.0	0.0
0.439306294	3.095292897	587.3	50.74518857	0	0.0	0.0
0.387066095	3.402328939	288.8	24.9504	0	0.0	0.0
0.254670878	3.109089757	303.4	26.2116	0	0.0	0.0
0.287506134	2.802826362	301.9	26.0802	0	0.0	0.0
0.260023452	2.805269369	307.2	26.538	0	0.0	0.0
0.25599214	2.82996733	307.6	26.5731	0	0.0	0.0
0.300997068	2.867709409	301.6	26.0616	0	0.0	0.0
0.40543556	2.750456114	244.8	21.15	0	0.1	0.0
0.271114568	3.350579749	290.9	25.131	0	0.1	0.1
0.322334309	2.994070924	283.6	24.5061	0	0.0	0.0
0.342695927	2.376427604	300.1	25.9314	0	0.0	0.0
0.372573026	2.109954552	288.9	24.9642	0	0.2	0.2
0.554417337	1.985547803	271.7	23.4717	0	0.3	0.2
0.728045829	2.507777844	305.8	26.4231	0	0.1	0.1
0.529299864	2.906977301	326.7	28.2234	0	0.0	0.0
0.306568092	3.178931922	342.5	29.592	0	0.0	0.0
0.257494046	3.024953164	343.5	29.6802	0	0.1	0.1
0.345227064	3.160622646	328.2	28.3563	0	0.0	0.0
0.60711576	3.514555163	319.3	27.5895	0	0.1	0.1
0.329995042	3.618444413	340.9	29.4546	0	0.0	0.0
0.367607633	3.431462811	308.6	26.6604	0	0.0	0.0
0.455256924	3.690490613	314.3	27.1518	0	0.0	0.0
0.511332002	3.411911483	307.9	26.5992	0	0.0	0.0
0.503576213	3.364215826	314.9	27.2046	0	0.0	0.0
0.398322757	2.777880395	224.5	19.3932	0	0.0	0.0
0.559617839	3.052640163	317.9	27.4686	0	0.1	0.1
0.803432192	1.687941704	307.9	26.60431304	0	0.6	0.4

**Continuación Tabla 26.- Variables de entrada y resultados obtenidos al aplicar el Método ASCE Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración en el vaso de la presa Francisco Zarco.**



Cn	Cd	ET <sub>sz</sub> Evapotranspiración potencial mm/día
900	0.34	5.72
900	0.34	6.49
900	0.34	6.65
900	0.34	5.73
900	0.34	6.11
900	0.34	7.13
900	0.34	6.67
900	0.34	5.78
900	0.34	6.33
900	0.34	6.15
900	0.34	14.67
900	0.34	7.50
900	0.34	7.69
900	0.34	7.22
900	0.34	7.45
900	0.34	7.29
900	0.34	7.34
900	0.34	6.13
900	0.34	7.62
900	0.34	7.09
900	0.34	7.04
900	0.34	6.98
900	0.34	6.68
900	0.34	7.77
900	0.34	8.25
900	0.34	8.61
900	0.34	8.83
900	0.34	8.09
900	0.34	8.70
900	0.34	8.83
900	0.34	7.85
900	0.34	8.27
900	0.34	8.10
900	0.34	8.40
900	0.34	5.59
900	0.34	8.47
900	0.34	7.77

**Continuación Tabla 26.- Variables de entrada y resultados obtenidos al aplicar el Método ASCE Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración en el vaso de la presa Francisco Zarco.**