



Title: DINÁMICA DE UNA NUBE DE GOTAS DE AGUA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Author: Gloria, MAY-LEÓN, Pedro Antonio, GUIDO-ALDANA, Guillermo,
HERNÁNDEZ-CRUZ, Eduardo, RAMOS-MORA

Editorial label ECORFAN: 607-8534
BCIERMMI Control Number: 2018-03
BCIERMMI Classification (2018): 251018-0301

Pages: 14
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.

244 – 2 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.

Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings

| | | |
|---------|-------------|---------------------|
| Mexico | Colombia | Guatemala |
| Bolivia | Cameroon | Democratic Republic |
| Spain | El Salvador | of Congo |
| Ecuador | Taiwan | Nicaragua |
| Peru | Paraguay | |

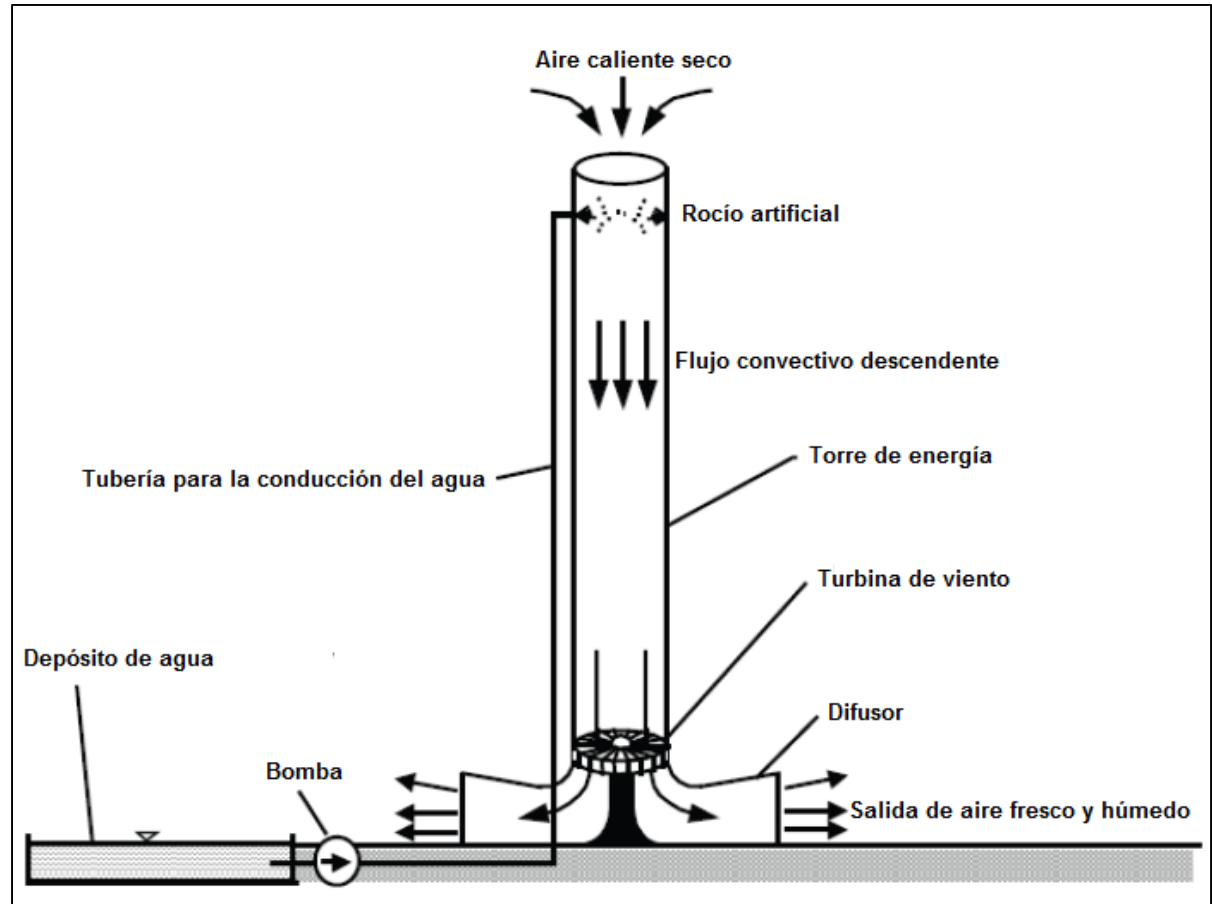
INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

En este trabajo se considera la dinámica de nubes de gotas de agua en confinamiento, con el interés de contribuir al entendimiento de algunos procesos físicos que ocurren en las Torres de Energía.

Una Torre de Energía es una planta o central eléctrica de energías renovables para generar energía eléctrica.

Una Torre de Energía consta de tres componentes: una torre, una bomba de agua y una turbina localizada en el fondo de la torre (Bauer and Gasser, 2012).

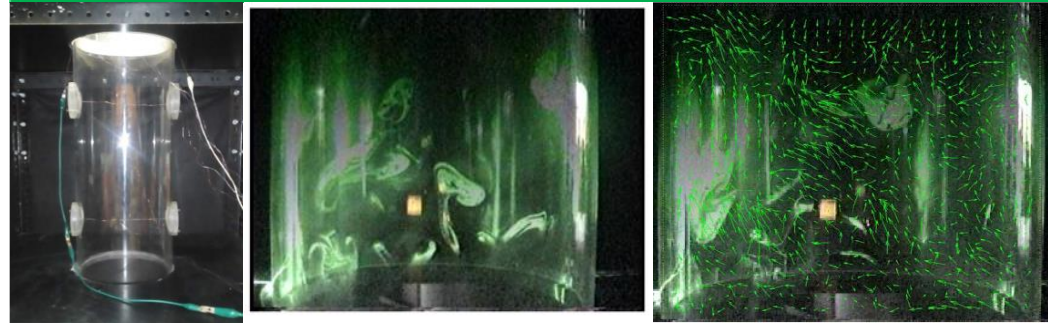
Proceso operativo de una Torre de Energía



(Bauer and Gasser, 2012)

SISTEMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

Los experimentos se realizan en una estructura cilíndrica de acrílico con dimensiones de 45 cm de longitud, y 20 cm de diámetro. En la parte superior de este cilindro se encuentra una caja de acrílico de dimensiones 60x50 cm de base y 42 cm de altura. A esta caja de acrílico están conectados 4 tanques (humidificadores) con capacidad de 3.5 litros cada uno. En esta caja es donde se genera la nube de gotas que cae por efecto de gravedad en el interior del cilindro. Es aquí en el interior de la estructura cilíndrica donde se desarrolla el flujo turbulento que queremos analizar.

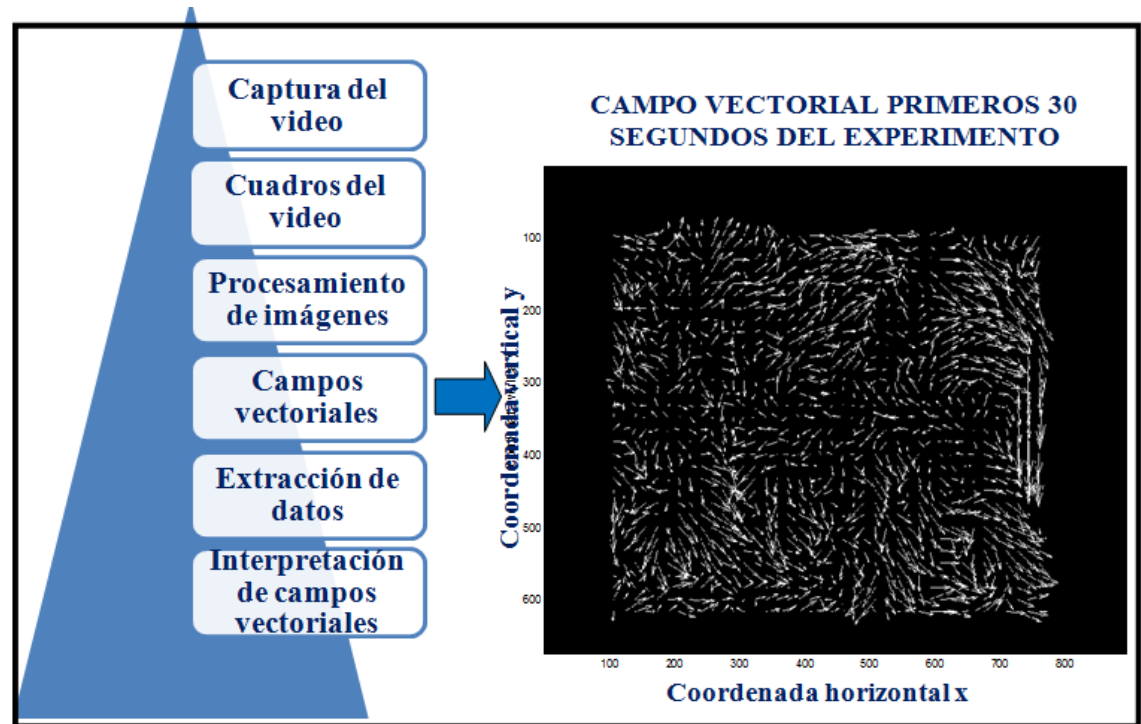


(Elaboración propia)

CONTINUACIÓN / SISTEMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

A partir de la adquisición de imágenes y un intervalo de tiempo entre imágenes consecutivas, se determina el campo instantáneo de velocidades en el plano del fluido, a través del procesamiento de imágenes mediante correlación cruzada. A esta técnica se le conoce como Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) (Raffel et al., 1998; Raffel et al., 2007; Adrian, 1991).

Metodología



(Elaboración propia)

PARÁMETROS EXPERIMENTALES Y SU INTERPRETACIÓN FÍSICA

Cuantitativamente analizamos un flujo turbulento, en este sentido hemos hecho un análisis para caracterizar la nube de gotas, definiendo:

$$u' = u - \bar{u}$$
$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i$$

$$v' = v - \bar{v}$$
$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

Son velocidades turbulentas a las que les hemos quitado las velocidades de las estructuras grandes (vórtices grandes).

$$\lambda_u = \frac{\langle (u')^2 \rangle^{1/2}}{\langle \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \right)^2 \rangle^{1/2}}$$

$$\lambda_v = \frac{\langle (v')^2 \rangle^{1/2}}{\langle \left(\frac{\partial v'}{\partial y} \right)^2 \rangle^{1/2}}$$

Es la medida de la micro-escala de Taylor horizontal y vertical respectivamente, para calcular el número de Reynolds en esa escala.

$$E = \frac{1}{2} \left[2 \overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} \right]$$

Es la energía cinética turbulenta, debido al movimiento de la nube de gotas.

PARÁMETROS EXPERIMENTALES Y SU INTERPRETACIÓN FÍSICA

$$\Omega = \frac{3}{2} \omega^2$$

Se conoce como enstrofía, y es la cantidad directamente relacionada a la energía cinética en el modelo del flujo que corresponde a efectos de disipación en el fluido.

$$Re_\lambda = \frac{E}{\nu} \left(\frac{10}{3\Omega} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\nu = 1.60 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

El número de Reynolds de la micro-escala de Taylor, puede interpretarse como la relación del tiempo del remolino (vórtice) más grande en esa escala.

DOS VARIANTES EXPERIMENTALES

- Sin cilindro

En un primer estudio se hizo el análisis de las propiedades del flujo turbulento en la nube de gotas prescindiendo de la pared cilíndrica. Los resultados de este análisis se comparan con resultados publicados por Korczyk et al., 2006.

- Con cilindro

Subsecuentemente, se repitió el análisis anterior colocando el confinamiento cilíndrico para determinar el efecto de las paredes sobre la dinámica del flujo turbulento en la nube. Y con nuestros experimentos de campos vectoriales, caracterizar la dinámica de una nube de gotas en el interior de una estructura cilíndrica.

VARIANTE 1: SIN EL CILINDRO

Experimentos de 4 minutos

Tabla 1. Propiedades del flujo turbulento sin la pared cilíndrica.

| No. Escena | $\overline{(u')^2}$ [m ² /s ²] | $\overline{(v')^2}$ [m ² /s ²] | E [m ² /s ²] | Ω [1/s ²] | Re_λ | $\lambda_u \lambda_v$ [m] |
|------------|--|--|--|---------------------------------|--------------|------------------------------|
| 1 | 3.4311e-07 | 4.2504e-07 | 5.5563e-07 | 9.4721e-07 | 65.1449 | 0.0027 0.0030 |
| 2 | 3.4552e-07 | 4.1974e-07 | 5.5538e-07 | 9.2430e-07 | 65.9183 | 0.0027 0.0030 |
| 3 | 3.2977e-07 | 3.6485e-07 | 5.1220e-07 | 9.6312e-07 | 59.5547 | 0.0027 0.0028 |
| 4 | 3.7997e-07 | 3.6628e-07 | 5.5626e-07 | 9.5975e-07 | 64.7920 | 0.0029 0.0028 |
| 5 | 3.1100e-07 | 4.2421e-07 | 5.2311e-07 | 8.6384e-07 | 64.2238 | 0.0027 0.0031 |
| 6 | 3.7222e-07 | 4.0944e-07 | 5.7694e-07 | 9.6460e-07 | 67.0309 | 0.0029 0.0030 |
| 7 | 3.4117e-07 | 3.7906e-07 | 5.3070e-07 | 1.0101e-06 | 60.2553 | 0.0028 0.0029 |
| 8 | 3.0353e-07 | 3.5926e-07 | 4.8316e-07 | 9.1153e-07 | 57.7465 | 0.0026 0.0028 |
| Promedio | 3.4079e-07 | 3.9349e-07 | 5.3667e-07 | 9.4306e-07 | 63.0833 | 0.0027 0.0029 |

(Elaboración propia)

- En 7 de 8 escenas se cumple que:

$$\overline{(v')^2} > \overline{(u')^2} \quad \text{y} \quad \lambda_v > \lambda_u$$

Por lo tanto la anisotropía está preferida con dirección en la vertical.

- Estos resultados son similares a los obtenidos por **Korczyk et al., 2006**, cuyos resultados muestran que en 16 de 21 escenas se cumple que:

$$\overline{(v')^2} > \overline{(u')^2}$$

- Esto da confianza para hacer este análisis con nuestros resultados experimentales en la pared cilíndrica.

VARIANTE 2: CON EL CILINDRO

Experimentos de 4 minutos

Tabla 2. Propiedades del flujo turbulento con la pared cilíndrica.

| No. Escena | $\overline{(u')^2}$ [m ² /s ²] | $\overline{(v')^2}$ [m ² /s ²] | E [m ² /s ²] | Ω [1/s ²] | Re_λ | $\lambda_u \lambda_v$ [m] |
|------------|--|--|--|---------------------------------|--------------|------------------------------|
| 1 | 3.4240e-07 | 2.5379e-07 | 4.2499e-07 | 4.5727e-07 | 71.7155 | 0.0028 0.0024 |
| 2 | 3.1784e-07 | 2.6563e-07 | 4.2455e-07 | 4.8280e-07 | 69.7219 | 0.0027 0.0024 |
| 3 | 2.9830e-07 | 2.2919e-07 | 3.7834e-07 | 4.7046e-07 | 62.9428 | 0.0026 0.0023 |
| 4 | 2.9523e-07 | 2.5081e-07 | 3.9843e-07 | 4.8034e-07 | 65.5990 | 0.0026 0.0024 |
| 5 | 3.1271e-07 | 2.5074e-07 | 4.0710e-07 | 5.0314e-07 | 65.4902 | 0.0027 0.0024 |
| 6 | 2.5878e-07 | 2.4309e-07 | 3.7248e-07 | 4.9673e-07 | 60.3072 | 0.0025 0.0023 |
| 7 | 2.7602e-07 | 1.6396e-07 | 3.0197e-07 | 4.6937e-07 | 50.2956 | 0.0026 0.0019 |
| 8 | 3.3592e-07 | 2.8843e-07 | 4.5638e-07 | 4.8608e-07 | 74.6961 | 0.0028 0.0025 |
| Promedio | 3.0465e-07 | 2.4320e-07 | 3.9553e-07 | 4.8077e-07 | 65.0960 | 0.0027 0.0023 |

(Elaboración propia)

- En 8 de 8 escenas se cumple que:

$$\overline{(u')^2} > \overline{(v')^2} \quad y \quad \lambda_u > \lambda_v$$

Por lo tanto la anisotropía está preferida con dirección en la horizontal.

- Este resultado es inverso al obtenido en la Variante 1. Posiblemente se debe a que ahora existe una menor cantidad de energía cinética (menor movimiento de la nube de gotas), en consecuencia menor disipación de energía.
- Como los promedios de las velocidades turbulentas al cuadrado son mayor en la horizontal que en la vertical, entonces el movimiento en la componente vertical se está restringiendo y posiblemente se deba a las paredes del cilindro.

CONCLUSIONES

Nuestro estudio demuestra la posibilidad de utilizar PIV para el análisis cuantitativo de nubes de gotas, ya que muestra visualmente las características de campos de velocidad a pequeñas escalas dentro de los filamentos.

El análisis del campo de velocidad confirma anisotropía de las velocidades turbulentas a pequeñas escalas en regiones de arrastre y mezcla de nubes de gotas. Esto puede ser importante para entender la colisión-coalescencia de las gotas y otros procesos micro-físicos de nubes.

El análisis presentado es válido para movimientos turbulentos a pequeñas escalas. Por otra parte el estudio presentado es único, en el sentido de que la información experimental que se obtiene es a pequeñas escalas de turbulencia en una estructura cilíndrica.

Los resultados de laboratorio en los estudios de campos vectoriales, indican que la turbulencia que se genera por mezcla de nubes de gotas a pequeñas escalas es altamente anisotrópico, esto debido a fluctuaciones de velocidad.

Actualmente trabajamos el efecto de evaporación, tamaño y concentración de gotas en la nube al interior de la pared cilíndrica.

APLICACIÓN

Es de interés aplicar esta investigación al proceso operativo que ocurre en el interior de una Torre de Energía. En principio estamos entendiendo algunos procesos físicos, como saber que la forma cilíndrica de estas estructuras restringen el movimiento en la componente vertical, situación que se asocia al movimiento turbulento en la componente horizontal. Esto significa que debe existir una fuerza de empuje que evite restringir de alguna manera el movimiento vertical. Suponemos que esta fuerza debe originarse por un cambio de temperatura, por lo tanto estamos trabajando en el efecto de calentamiento y evaporación de la nube de gotas. El objetivo futuro de la investigación es ofrecer información útil para hacer un mejor diseño de Torres de Energía.

AGRADECIMIENTOS

- Al **Instituto de Energías Renovables IER-UNAM** por el acceso al laboratorio de transferencia de energía y masa para realizar la presente investigación.
- A la **Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM** y a la **Coordinación de Posgrado del IMTA** por el apoyo para asistir al 3er Congreso Interdisciplinario - CIER.
- A **CIER** por la invitación.

REFERENCIAS

- Adrian, R. J., (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23, 262-304.
- Altmann, T., Carmel, C., Guetta, R., Zaslavsky, D. and Doytsher, Y., (2005). Assessment of an “Energy Tower” potential in Australia using a mathematical model and GIS, *Solar Energy*, 78, pp. 799–808.
- Altmann, T., Zaslavsky, D., Guetta, R. and Czisch, G., (2008). Evaluation of the Potential of Electricity Production by Using Technology of “Energy Towers,” Technical report, Technion - Israel Institute of Technology, Haifa, and University of Kassel, Germany.
- Andrejczuk, M., Grabowski, W.W., Malinowski, S.P., Smolarkiewicz, P.K., (2004). Numerical simulation of cloud–clear air interfacial mixing. *J. Atmos. Sci.* 61, 1726–1739.
- Bauer, M. and Gasser, I., (2012). Modeling, asymptotic analysis, and simulation of an energy tower; *Society for industrial and applied mathematics*, Vol. 72, No.1, pp. 362-381.
- Davidson, P.A., (2015). *Turbulence: An Introduction for Scientists and Engineers*, 2nd Edition., published in the United States of America by Oxford University Press.
- Falkovich, G., Pumir, A., (2004). Intermittent distribution of heavy particles in a turbulent flow. *Phys. Fluids* 16, L47–L50.
- Grabowski, W.W., Vaillancourt, P.A., (1999). Comments on “preferential concentration of cloud droplets by turbulence: effects on the early evolution of cumulus cloud droplet spectra”. *J. Atmos. Sci.* 56, 1433–1436.

CONTINUACIÓN / REFERENCIAS

- Jeffery, C.A., (2001). Investigating the small-scale structure of clouds using the δ -correlated closure: effect of particle inertia, condensation/evaporation and intermittency. *Atmos. Res.* 59–60, 199–215.
- Korczyk, P., Malinowski, S. P. and Kowalewski, T. A., (2006). Mixing of cloud and clear air in centimeter scales observed in laboratory by means of Particle Image Velocimetry. Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland.
- Koziol, A.S., Leighton, H.G., (1996). The effect of turbulence on the collision rates of small cloud drops. *J. Atmos. Sci.* 53, 1910–1920.
- Malinowski, S. P., Andrejczuk, M., Grabowski, W. W., Korczyk, P., Kowalewski, T. A. and Smolarkiewicz, P. K., (2008). Laboratory and modeling studies of cloud–clear air interfacial mixing: anisotropy of small-scale turbulence due to evaporative cooling. Institute of Geophysics, University of Warsaw, Pasteura 7, 02-093 Warsaw, Poland; *New Journal of Physics* 10, 075020 (15pp).
- Pinsky, M.A., Khain, A.P., Shapiro, M., (2000). Stochastic effects of cloud droplet hydrodynamic interaction in a turbulent flow. *Atmos. Res.* 53, 131–169.
- Pinsky, M.B., Khain, A.P., (1997). Turbulence effects on droplet growth and size distribution in clouds—a review. *J. Aerosol Sci.* 28, 1177–1214.
- Rafflel, M., Willert, C. E. and Kompenhans, J. (1998). *Particle Image Velocimetry*. Ed. Springer.
- Rafflel, M., Willert, C. E. and Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry*. Ed. Springer.

CONTINUACIÓN / REFERENCIAS

- Shaw, R.A., (2003). Particle–turbulence interactions in atmospheric clouds. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 35, 183–227.
- Shaw, R.A., Reade, W.C., Collins, L.R., Verlinde, J., (1998). Preferential concentration of cloud droplets by turbulence: Effects on the early evolution of cumulus cloud droplet spectra. *J. Atmos. Sci.* 55, 1965–1976.
- Tennekes, H. and Lumley, J.L., (1999). *A First Course in Turbulence, First Edition.*, in the United States of America.
- Vaillancourt, P.A., Yau, M.K., (2000). Review of particle–turbulence interactions and consequences for cloud physics. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 81, 285–298.
- Vaillancourt, P.A., Yau, M.K., Bartello, P., Grabowski, W.W., (2002). Microscopic approach to cloud droplet growth by condensation: Part II. Turbulence, clustering, and condensational growth. *J. Atmos. Sci.* 59, 3421–3435.
- Vaillancourt, P.A., Yau, M.K., Grabowski, W.W., (2001). Microscopic approach to cloud droplet growth by condensation. Part I: model description and results without turbulence. *J. Atmos. Sci.* 58, 1945–1964.
- Zaslavsky, D. (2006). Energy Towers, *Physica Plus*, 7; available online at <http://physicaplus.org.il/zope/home/en/1124811264/1137833043> en.



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/ booklets)