

Costo unitario del agua producida a través del sembrado higroscópico de tormentas

Michel Rosengaus Moshinsky

Servicio Meteorológico Nacional/Comisión Nacional del Agua

Juan José Calderón García

DEPFI/UNAM (campus Morelos)

Se describe un experimento de estimulación artificial de lluvia con mecanismos objetivos de verificación. El experimento muestra un incremento en la precipitación del orden del 60% en las tormentas convectivas aisladas de verano en la zona de Monclova, Coahuila, en el noreste semiárido de México. Con base en la calibración hidrológica del radar meteorológico utilizado, se calcula el incremento en términos absolutos y con ello se estima, en orden de magnitud, el costo por metro cúbico producido, resultando competitivo en términos de los precios que hoy en día se pagan por el agua en México.

Palabras clave: hidrometeorología, estimulación artificial de lluvias, sembrado de nubes, higroscópico, radar meteorológico.

Introducción

La persistente condición de sequía que reinó durante la década de 1990 en el altiplano semiárido del norte de México (Velasco, 2001) motivó que el gobierno del estado de Coahuila, con soporte financiero y logístico de Altos Hornos de México S.A., contratara al Programa de Aplicaciones de Investigación (RAP) del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) de los Estados Unidos de América, para realizar un estudio científico formal sobre la viabilidad del método higroscópico de sembrado de tormentas como una herramienta para incrementar el recurso hídrico en el estado, a realizarse en los 120 km alrededor de la ciudad de Monclova. La solicitud de apoyo económico a la Comisión Nacional del Agua (CNA) motivó, a su vez, que ésta patrocinara al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (del que el primer autor formaba parte) para participar en dicho experimento. En marcado contraste con lo usualmente realizado en este controversial tema en México (en donde

el sembrado glaciogénico ha sido el usual, a pesar de no ajustarse bien a las características de las tormentas de verano que dominan), el experimento replicó una variante del método higroscópico recientemente desarrollado y aplicado en condiciones similares en África del Sur (Mather, 1991; Mather *et al.*, 1997; WMO, 2000), implementando un sembrado aleatorio de tormentas igualmente promisorias. También, en contraste con las anteriores campañas realizadas en México, el experimento implementó un estricto mecanismo de verificación objetiva, centrado alrededor del rastreo automático de tormentas convectivas aisladas (Dixon y Weiner, 1993), así como la evolución en el tiempo de muchos de sus parámetros (volumen total de agua líquida, área total de precipitación, altitud del centroide de reflectividad, flujo de precipitación, etcétera) a través de un radar meteorológico de alta resolución y barrido volumétrico frecuente. El sembrado se realizó a través de la incineración de bengalas especiales tras las alas de una aeronave bimotor de turbohélice, que además contaba

con instrumentación de física de nubes y navegación GPS (Bruitjes *et al.*, 1999; Calderón, 2001). El diseño original, utilizando la relación de reflectividad a lluvia (o relación $z-R$) de Marshall-Palmer (Rosengaus, 1995a) permitía la evaluación de la efectividad del sembrado en términos relativos; es decir, el porcentaje de incremento de la precipitación pluvial. El IMTA introdujo al experimento un conjunto de pluviógrafos digitales automáticos que se incrementó de cinco a 10 y luego hasta 47 unidades en los tres años del proyecto. Éstos permitieron la obtención de una relación $z-R$ localmente calibrada para la distribución de tamaños de gotas de las tormentas en la región y temporada de interés (Rosengaus, 2000a; Calderón, 2001). Con ella, los incrementos de precipitación pluvial pueden evaluarse en términos absolutos (volumen en m^3). El experimento se realizó durante los veranos de 1996, 1997 y 1998, y se conoce como *PARC* (*Program for the Augmentation of Rainfall in Coahuila*).

Descripción del experimento

El proyecto *PARC* destaca entre muchas otras campañas de estimulación de lluvia que se han llevado a cabo en México, aun aquellas con mecanismos formales de verificación, eminentemente por la instrumentación disponible. El eje del proceso de verificación objetiva fue un radar meteorológico banda C ($\lambda \approx 5.6$ cm), con potencia pico de 250 kW, 256 pulsos s^{-1} y con despliegue/control digital, ubicado en el aeropuerto de Monclova/Frontera, Coahuila, el cual operaba con un barrido volumétrico que permitía identificar y seguir a las tormentas presentes —las unidades experimentales del estudio— y aquellos volúmenes atmosféricos con reflectividad mayor o igual a 30 dBZ, en un radio de 112.5 km alrededor del radar.

La definición espacial de las tormentas era buena, pues el radar operaba con una resolución radial de 750 m y una resolución angular de 1.6° (logrando un muestreo aproximadamente de $750 \times 750 \times 750$ m a una distancia de 27 km del radar). También la definición de la evolución en el tiempo de las tormentas era buena, pues bajo condiciones óptimas de operación el radar hacía un barrido volumétrico a intervalos de 3.5 a cinco minutos. Este instrumento no sólo se calibraba electrónicamente cada dos semanas, sino que se obtuvo una relación de conversión de la reflectividad (z en $mm^6 m^{-3}$) a la intensidad de lluvia (R en $mm h^{-1}$) a través de mediciones pluviográficas sobre la superficie del terreno en varios puntos y simultánea con unas 21,500 imágenes de radar del tipo máxima reflectividad en la vertical. El uso de este tipo de producto por sobre los más comunes *PPI* o *CAPP1* (Rosengaus, 1995a y 1995b) reduce los problemas

asociados con la falta de visibilidad del radar en las porciones de las tormentas que se encuentran detrás de obstáculos orográficos, comunes en la zona del estudio. Las mediciones pluviográficas realizadas suman un total de 3,238 días-pluviógrafo. El tipo de pluviógrafo de balancín utilizado fue el equivalente moderno (digital) del pluviógrafo de registro continuo con pluma usado en el pasado, registrando la fecha/hora de cada evento (lámina acumulada ≈ 0.25 mm) con precisión al segundo.

Los pluviógrafos se calibraban *in situ* en cada visita para rescatar datos (aproximadamente cada treinta días). En las mismas visitas también se evaluaba y corregía el desfase del reloj interno con respecto a la fecha/hora correcta (obtenida del GPS); asimismo, se contaba con un pequeño centro de pronóstico para evaluar la probabilidad de que cada día fuera o no favorable para la convección local.

Para evaluar la estabilidad de la atmósfera fue esencial la operación de una estación de radiosondeo móvil del NCAR, con vuelos aproximadamente a las 09:00 hora local. No se describen la instrumentación de física de nubes de la aeronave y estaciones meteorológicas automáticas, también parte del experimento, por no tener influencia en los resultados particulares que se presentan en este trabajo. Detalles asociados aparecen en Rosengaus y Reza (1996), Rosengaus *et al.* (1998), Rosengaus *et al.* (1999), y Rosengaus y Calderón (2000).

El experimento se diseñó para obtener, hasta donde esto es posible en las condiciones no controladas de la atmósfera real, dos muestras de tormentas, las cuales tuvieron como única diferencia estadística el haber sido o no sembradas con los núcleos higroscópicos provenientes de las bengalas.

Originalmente se estimó, con base en la experiencia en Sudáfrica, que se requerirían cuatro años de muestreo para obtener resultados estadísticamente significativos; el primero para estudios exploratorios preliminares y tres más de sembrado aleatorio. Eventualmente, problemas económicos de la principal fuente de patrocinio limitaron el estudio a tres años en total.

Cada día de operación se iniciaba con la puesta en marcha del radar, el vuelo de radiosondeo local (09:00 hora local) y la realización de un pronóstico de la probabilidad de convección significativa (misma que iniciaba alrededor de las 14:00 local). De ser promisorio el día, se preparaba la aeronave para el vuelo y se cargaban las bengalas en los soportes tras las alas. Una vez que la convección se iniciaba, se identificaban tormentas incipientes que resultaban buenas candidatas a través de mediciones con el radar; la aeronave despegabá, dirigiéndose a la más cercana de ellas. La decisión final de incluir o no a la tormenta en el estudio se

hacia con base en la observación directa del piloto o del meteorólogo de vuelo (bajo la guía de criterios uniformes previamente establecidos), y por el análisis del meteorólogo de radar.

Una vez que se optaba por incluir a la tormenta en el estudio (estableciendo el instante $t=0$), la decisión de sembrar o no se tomaba con un proceso doble ciego, donde en la aeronave se abría un sobre que indicaba la acción sembrar o no sembrar, y otro sobre en el sitio del radar que confirmaba o negaba la acción obtenida en el avión. Los sobres fueron previamente preparados y ordenados aleatoriamente por una institución independiente al experimento. Así se obtendría una muestra de aproximadamente 50% de las tormentas que sí eran sembradas y otra muestra de control de los casos restantes que no eran sembradas, todo esto sin que el piloto, el meteorólogo de vuelo o el meteorólogo de radar pudieran influir en la decisión con una visión subjetiva.

Excepto por el encendido o no de las bengalas, todas las tormentas eran tratadas de igual forma. El sembrado se daba volando inmediatamente por debajo de la base de la nube y encendiendo las bengalas (por pares), al identificar la entrada a la corriente ascendente de la tormenta. El sembrado proseguía hasta por un máximo de 12 bengalas (aproximadamente un máximo de 25 minutos) o hasta que la tormenta mostrara signos de decaimiento. El seguimiento de las tormentas y su evolución era cien por ciento objetivo y automatizado a través de *software* especializado de procesamiento de productos de radar (Dixon y Weiner, 1993). Una vez que una tormenta era seleccionada, ninguna tormenta a menos de 20 km de distancia calificaba como candidata durante dicho día.

Los vuelos proseguían hasta que lo permitía la luz natural (por restricciones del aeropuerto) o cesaba la convección. No puede existir confusión alguna sobre cuál de las tormentas presentes en el radar era la que estaba siendo tratada (y, por lo tanto, aquella cuyos parámetros debían ser almacenados en la base de datos del experimento), puesto que la aeronave incluía un sistema GPS que enviaba, vía radio, su posición cada segundo y ésta era graficada sobre el producto de radar en la pantalla de despliegue del mismo. Detalles sobre lo presentado en este párrafo pueden obtenerse en NCAR (1997a, 1997b y 1999).

Resultados y discusión

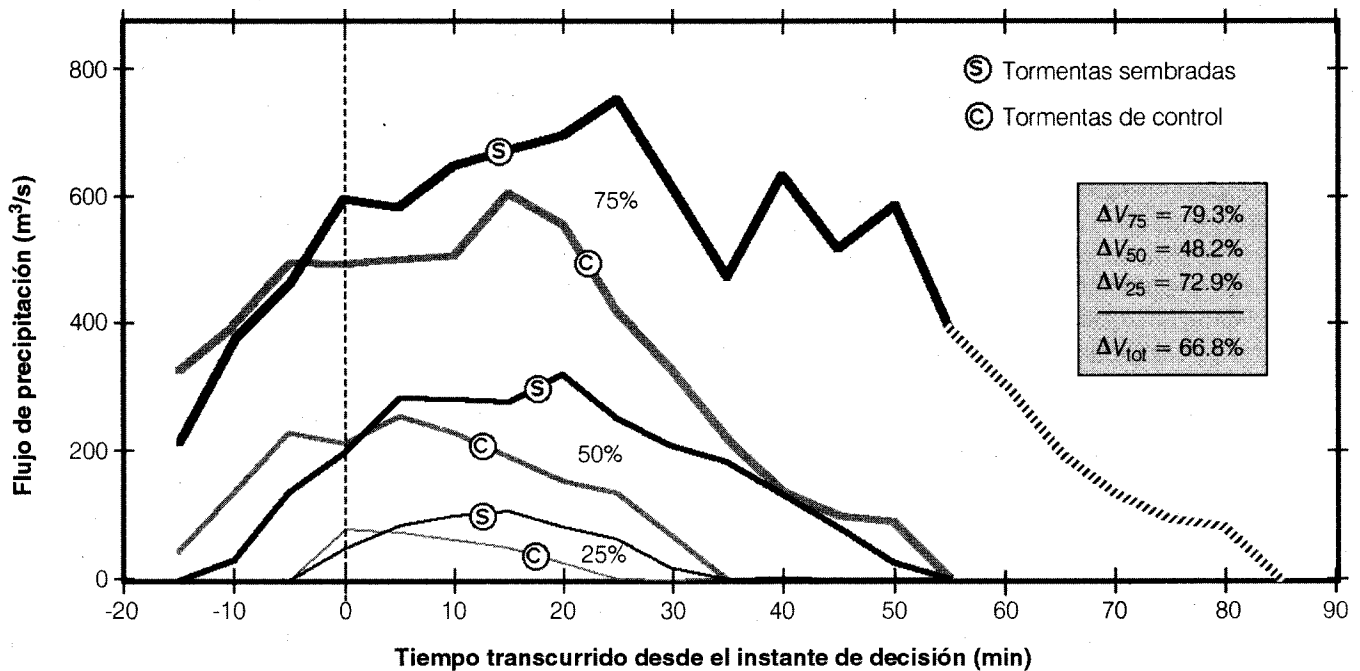
A continuación se presentan los resultados obtenidos por el NCAR (1999), los cuales representan estadísticas de las muestras de tormentas sembradas (con 43 unidades) y no sembradas (con 51 unidades). Aunque la forma más

simple de comparar las muestras de tormentas sembradas y de control sería a través de la media de sus diversos parámetros, el NCAR lo hace a través de la comparación de los cuartiles 25, 50 (mediana) y 75% de dichos parámetros. De esta forma se evita que unas cuantas tormentas de grandes dimensiones influyan excesivamente en los resultados, como lo harían de utilizarse la media, pero no en los cuartiles mencionados. La comparación de los diversos parámetros se realiza desde $t=-15$ min hasta $t=+55$ min, con $t=0$, siendo el instante de decisión y con evaluaciones cada cinco minutos. Este lapso de seguimiento resulta adecuado para las tormentas pequeñas (cuartiles 25 y 50%); pero, en retrospectiva, resulta insuficiente para las tormentas grandes (cuartil 75%); la tormenta representativa (cuartil 75%, sembrada) muestra una duración mayor a sesenta minutos.

Aunque el NCAR calculó muchos parámetros, aquí sólo se presentan los que tienen una influencia directa en el análisis objeto de este trabajo: el flujo de precipitación (en m^3s^{-1}) y el área de precipitación (en km^2). El primero es la integración, sobre el área de precipitación, de la intensidad de lluvia (en $mm h^{-1}$) medida dentro de la tormenta, o sea, el volumen de agua producida por unidad de tiempo en forma instantánea por la tormenta completa (ver ilustración 1). En ella se observa que: a) las tormentas representativas de 25, 50 y 75% resultan similares (entre sembradas y no sembradas) antes del instante de decisión (es decir, para $t < 0$); b) 15 minutos después del sembrado las diferencias son ya apreciables; c) los efectos del sembrado son, en términos absolutos, mucho mayores para las tormentas más grandes que para las más pequeñas; d) la duración de las tormentas sembradas grandes es mayor que la duración de las correspondientes de control. La cola de la tormenta (cuartil 75% sembrada), para $t \geq 55$ min, ha sido extrapolada a partir de suponer un decaimiento similar al que presenta la tormenta (cuartil 75% control), por lo que aparece con una línea punteada. En términos de volumen total precipitado en el evento completo, los incrementos relativos se presentan en el recuadro gris del lado derecho. En forma general se puede concluir que, bajo esta perspectiva, el sembrado higroscópico logró un incremento de 66.8% en el volumen total de agua precipitada.

El área de precipitación corresponde a la proyección horizontal sobre el terreno del volumen limitado por la isosuperficie de reflectividad=30 dBZ y también es variable en el tiempo. Este umbral que define las tormentas analizadas es, hasta cierto punto, arbitrario. Fue seleccionado por limitar, bajo cualquier hipótesis plausible de la relación reflectividad a lluvia vigente en la zona, las

Ilustración 1. Comparación entre tormentas sembradas y de control en términos del flujo de precipitación (calculado con la relación z-R de Marshall-Palmer).



zonas de convección (*versus* las de precipitación estratiforme periférica a la celda convectiva), esto bajo la observación de los propios productos de radar en el primer año de estudio exploratorio del experimento. Bajo la hipótesis de validez de la relación de Marshall-Palmer, la isosuperficie de 30 dBZ encierra un volumen en el que la intensidad de lluvia es igual o mayor a 2.7 mm h⁻¹. Aunque una parte moderada de la precipitación producida por cada tormenta se encuentra fuera de este volumen, no es de esperarse que exista un marcado contraste de ésta entre las tormentas sembradas y las de control. La mayor parte del efecto en los sesenta minutos posteriores al inicio del sembrado se dará dentro de la isosuperficie de 30 dBZ. La comparación entre tormentas sembradas y de control en el contexto de esta área de precipitación se presenta en la ilustración 2. En esta perspectiva se puede observar todavía más claramente que la duración de las tormentas sembradas resulta mayor que las tormentas de control, con todas las demás conclusiones previas aún válidas. También en este caso la cola de la tormenta (cuartil 75% sembrada) fue sintetizada a partir de un comportamiento similar a su contraparte (cuartil 75% control) (en línea gruesa punteada). Los incrementos relativos en la integral del área a lo largo del tiempo se muestran en el recuadro gris a la derecha.

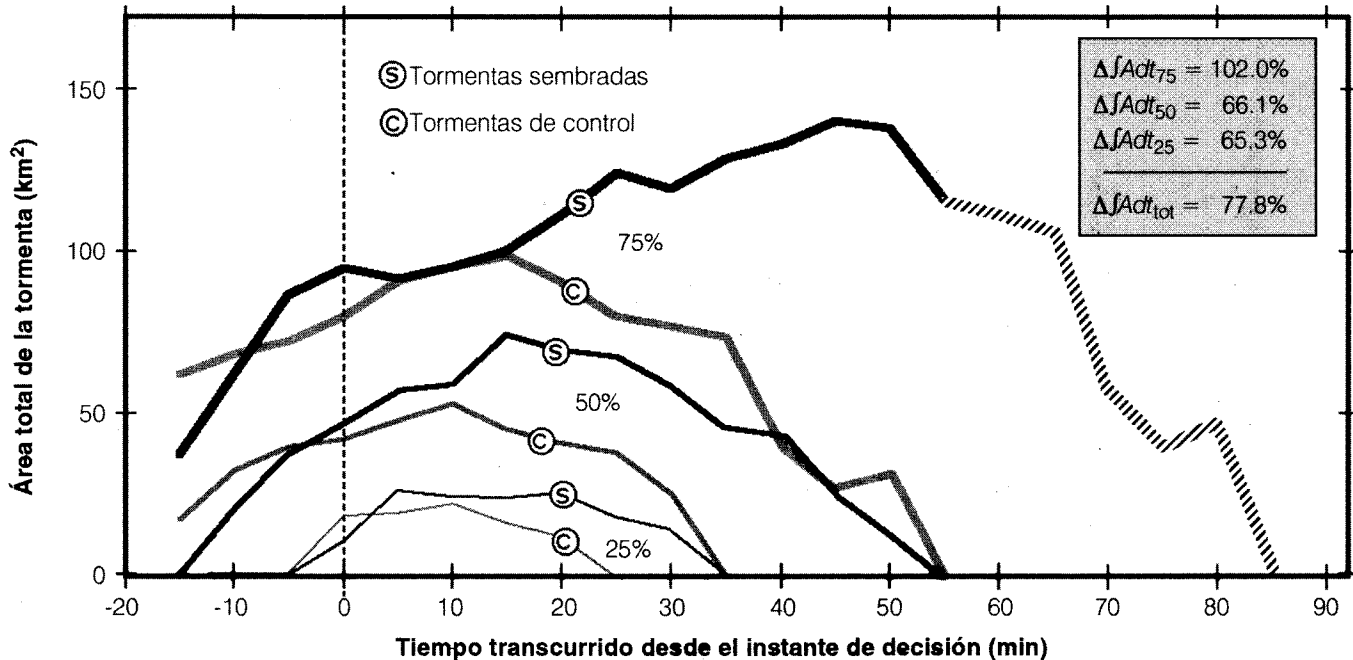
Resulta importante enfatizar que las comparaciones en las ilustraciones 1 y 2 se refieren al volumen en el interior de la isosuperficie de reflectividad 30 dBZ, sin que esto implique que en el exterior de la misma no existiera ninguna precipitación. La obtención de una comparación en términos de la intensidad de lluvia promedio en las tormentas (mm h⁻¹) es directa de las ilustraciones 1 y 2, dividiendo el flujo de precipitación entre el área de precipitación para instantes correspondientes. Por ejemplo, la intensidad de lluvia promedio en la tormenta (cuartil 75% sembrada) para t=25 min sería:

$$R_{med} = (720 \text{ m}^3\text{s}^{-1}) / (125 \text{ km}^2) = 20.7 \text{ mmh}^{-1}$$

Los incrementos relativos obtenidos son útiles para calificar al método en cuanto a su efectividad, pero no permiten obtener los costos unitarios debido a que el número de m³ producidos por cada tormenta no es confiable, dado que la reflectividad del radar fue convertida a intensidad de lluvia utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin verificación local de su validez. En la ilustración 3 se muestra la nube de puntos de calibración obtenida de las mediciones simultáneas de radar y pluviógrafos en superficie.

Resulta claro que el radar debe ser considerado como un instrumento probabilístico, más que determinístico, de

Ilustración 2. Comparación entre tormentas sembradas y de control en términos de área de precipitación.



estimación de la intensidad de lluvia instantánea (Rosengaus, 2000b). En la misma ilustración 3 se presentan las líneas rectas que representan la relación z - R de Marshall-Palmer (punteada gris claro) y la obtenida por el IMTA (continua gris oscuro). La de Marshall-Palmer claramente subestima la intensidad de lluvia real para un nivel de reflectividad Z dado (mayúscula, que es simplemente la reflectividad z , pero expresada en decibelios, dBZ).

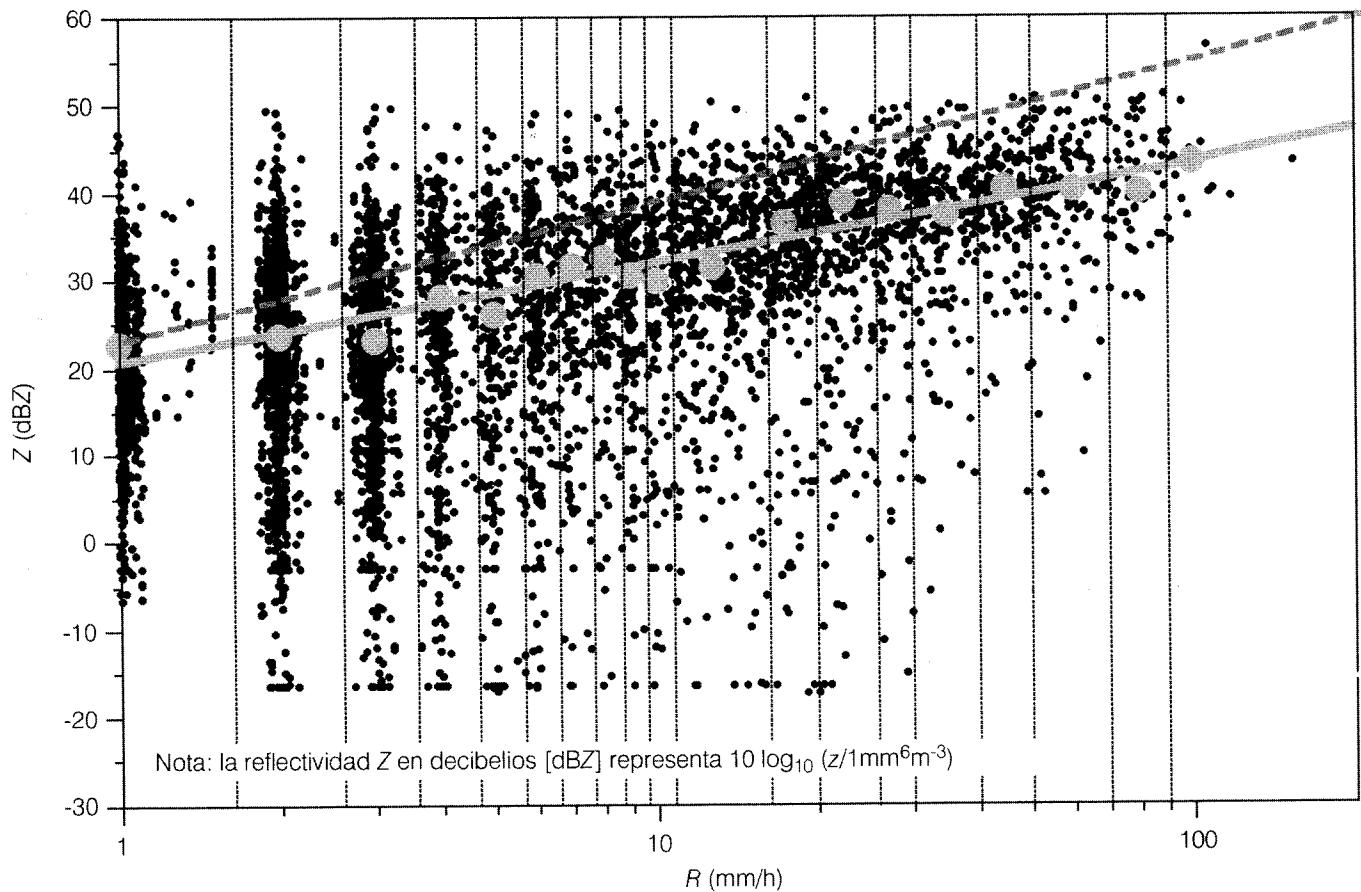
La relación propuesta por el IMTA se basa en un ajuste por mínimos cuadrados a los círculos grises, que a su vez representan la moda de las distribuciones de frecuencia de los puntos experimentales agrupados en bandas ΔR predefinidas (bandas que aparecen delimitadas por las líneas punteadas verticales en la misma ilustración 3). En otras palabras, la relación IMTA define, para un valor de Z dado, el valor de R que tiene la máxima probabilidad de ser el real, aunque las distribuciones muestran una considerable dispersión. Las diferencias entre ambas relaciones es significativa; por ejemplo, el umbral de $Z=30$ dBZ, que el NCAR usó para definir la tormenta, representa una intensidad de $R=2.73$ mm h⁻¹ con Marshall-Palmer, mientras que representa $R=6.78$ mm h⁻¹ con la relación IMTA. La gran dispersión de los puntos de calibración alrededor de la relación de conversión de Z a R propuesta implica que el tamaño de

la muestra de tormentas sembradas y de control necesario para indicar incrementos significantes por el sembrado es mayor que el que se calcularía inicialmente al considerar al radar como un medidor determinístico de la intensidad de lluvia.

Ya con la relación z - R localmente obtenida, los datos de las tormentas en ambas muestras deberían ser reprocesados con las nuevas intensidades de lluvia.

Dado que el IMTA no tuvo acceso directo a los registros completos de las tormentas en lo individual para propósitos de la estimación de costos unitarios del agua producida por la estimulación artificial de lluvia, el reprocesamiento se realizó sólo para las tres tormentas representativas de los cuartiles 25, 50 y 75%. Así, de las ilustraciones 1 y 2 se obtienen las curvas respectivas en términos de intensidad promedio de lluvia, y de éstas (usando la relación Marshall-Palmer utilizada por el NCAR) se reconstruyen las curvas en términos de reflectividad atmosférica, mismas que se presentan como ilustración 4. Es necesario observar que el estrecho intervalo de valores de Z (en dBZ) presentes implica un amplio rango de valores de R (ver ilustración 3). También es importante identificar que las reflectividades promedio de cada tormenta son muy similares entre las curvas de tormentas sembradas y tormentas de control; es decir, los cambios más grandes no se dan en la reflectividad (y por ello en la

Ilustración 3. Datos experimentales Z contra R , con las relaciones de Marshall-Palmer e IMTA-Monclova.



intensidad de lluvia), sino en la duración y amplitud espacial de las tormentas. Este hecho resulta importante, porque la teoría del radar muestra que los valores de R que representa cada valor dado de Z depende fuertemente de la distribución de tamaños de las gotas de agua de lluvia presentes en el volumen de muestreo (Rosengaus, 1995a). Puesto que el sembrado higroscópico produce un cambio en esta distribución de tamaños de gotas (NCAR, 1997a, 1997b y 1999), cualquier incremento puramente adjudicable a un aumento en la reflectividad medida podría ser sólo aparente. Sin embargo, los incrementos adjudicables al aumento en duración y amplitud espacial de las tormentas no están en duda.

Operando en dirección inversa, pero ahora ya con la relación z - R obtenida localmente a partir de las curvas en las ilustraciones 2 y 4, las curvas en la ilustración 1 fueron recalculadas; el resultado se muestra en la ilustración 5. En este caso, los incrementos de volumen total precipitado en el recuadro gris a la derecha son ahora en términos

absolutos. Como es de esperarse, la ilustración 5 es similar a la ilustración 1, pero con el eje de las ordenadas escalado de forma no lineal. Tanto los volúmenes totales precipitados por cada tormenta tipo como los incrementos logrados con la estimulación de lluvia resultan mucho mayores en la ilustración 5 que en la ilustración 1.

Se está ahora en posición de poder estimar los costos unitarios del agua producida por estimulación de tormentas. Para ello se establecen tres escenarios que varían en: a) considerar o no los incrementos por intensidad de lluvia; b) considerar la relación z - R IMTA-Monclova o la de Marshall-Palmer; c) considerar o no la porción extrapolada (línea punteada en las ilustraciones 1, 2, 4 y 5), y d) considerar que 100, 20 o 4% del agua producida es realmente aprovechable. En el cuadro 1 se sintetizan las combinaciones de estos criterios.

Se considera que el tiempo de vuelo utilizado por tormenta es de una hora y un costo horario de operación en México de \$10,000.00 (del año 2000);

Ilustración 4. Reconstrucción de las muestras de tormentas sembradas y control en términos de la reflectividad promedio de cada tormenta.

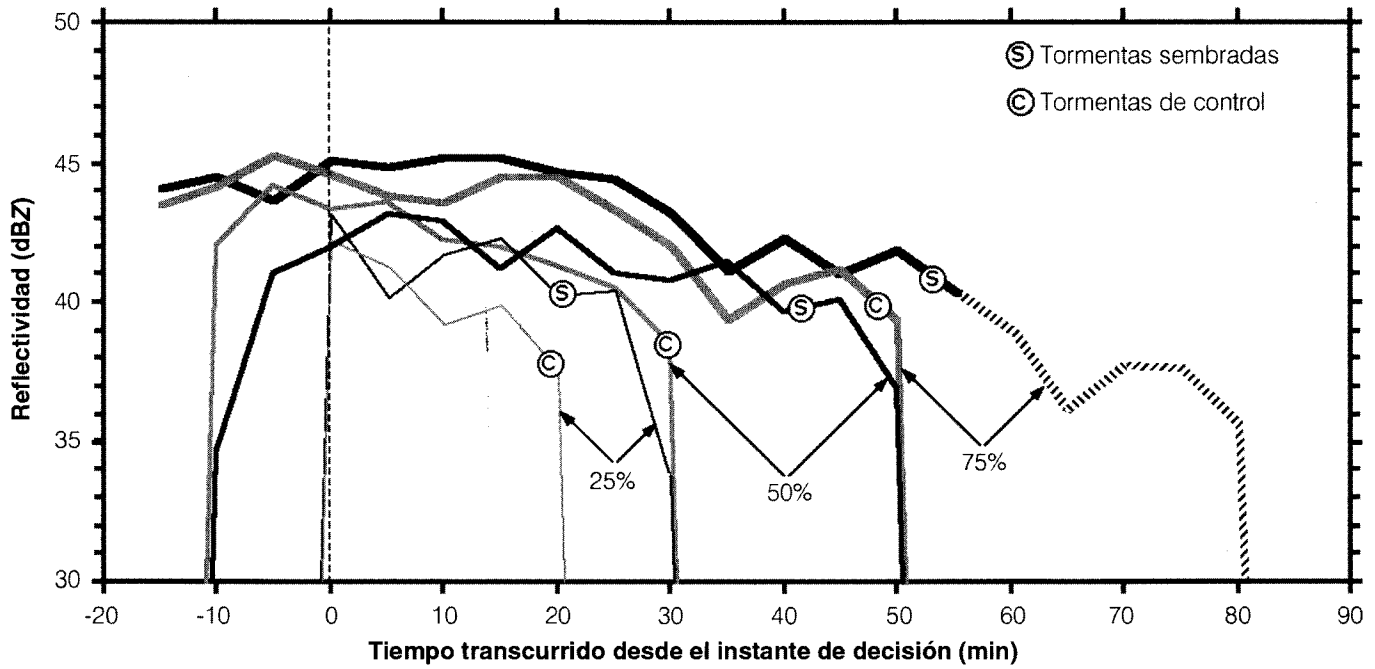
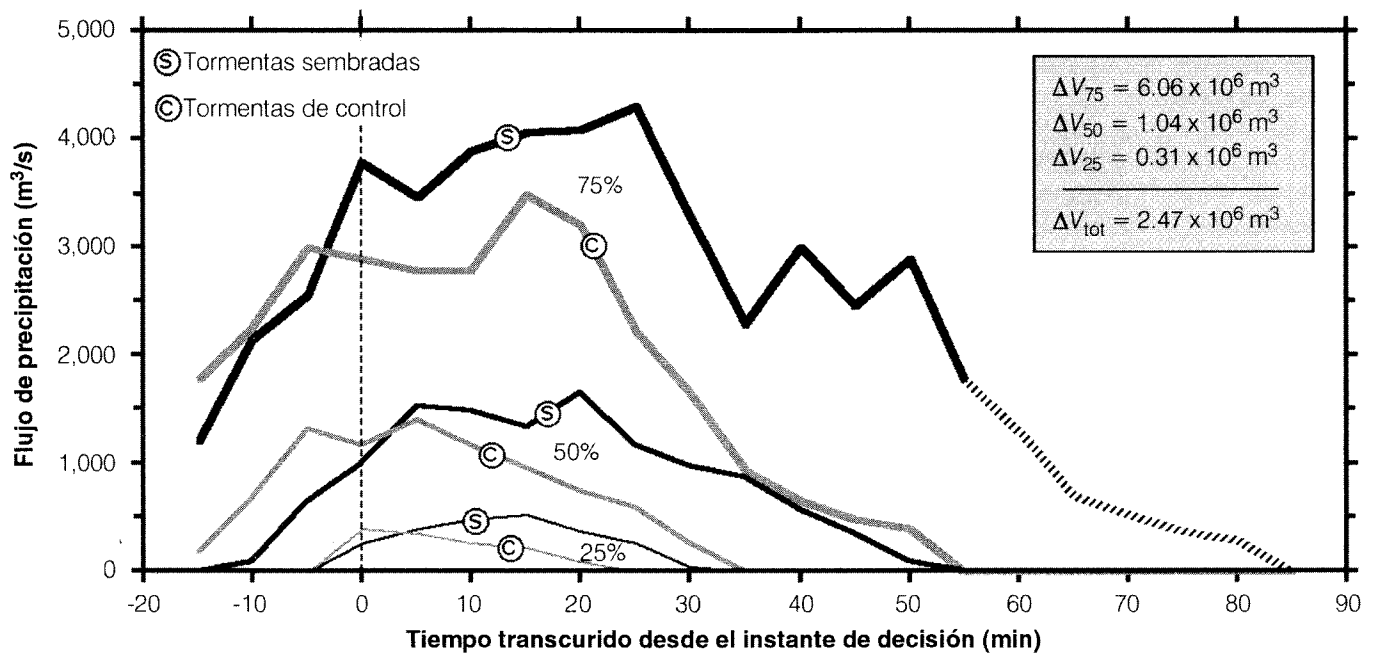


Ilustración 5. Comparación entre tormentas sembradas y de control en términos del flujo de precipitación (calculado con la relación z-R obtenida por el IMTA para Monclova).



ambos, criterios conservadores. En el caso de no considerar el incremento en la intensidad de lluvia ΔR , se calcula el aumento en flujo de precipitación con el área incrementada (ver ilustración 2), pero considerando la intensidad R , en el caso de las tormentas sembradas, igual a la medida en el caso de las tormentas de control. Por azar, ya que la única tormenta tipo que rebasa el instante $t=55$ min es la cuartil 75% sembrada, esta condición resulta equivalente a no considerar el intervalo para $t>55$ min (ver escenario intermedio, segunda y tercera columnas en el cuadro 1).

Los costos por m^3 de agua producida (y aprovechada), incluyendo la integración de las tres tormentas tipo (1/3 de los casos cada una), se presentan en el cuadro 2. Obsérvese que la ilustración 5 sintetiza el escenario optimista y la ilustración 1 (sin considerar la porción de línea punteada) sintetiza el agua precipitada del escenario pesimista.

Como es de esperarse, el cuadro 2 muestra que los costos unitarios son mayores para las tormentas más pequeñas y menores para las tormentas más grandes; es decir, resulta una mejor inversión dedicar los recursos limitados (aeronave, piloto, etcétera) a sembrar las tormentas más grandes. Pero lo más notable es que los

Cuadro 1. Criterios utilizados en los escenarios para la estimación de costos unitarios.

Escenario	¿Considera ΔR ?	¿Considera $t>55$ min?	Relación z-R	% aprovechado
Optimista	S	S	IMTA-Monclova	100
Intermedio	S/No	No/S	IMTA-Monclova	20
Pesimista	No	No	Marshall-Palmer	4

Cuadro 2. Resumen de los resultados para cada escenario en términos de volúmenes y costo unitario.

Escenario	Tormenta tipo	$V_{\text{precipitado}}$ (x 10^6 m 3)	$\Delta V_{\text{precipitado}}$ (x 10^6 m 3)	$\Delta V_{\text{aprovechado}}$ (x 10^6 m 3)	Méx. \$/m 3 (año 2000)
Optimista	S 75%	14.347	6.059	6.059	\$0.0016
	C 75%	8.288			
	S 50%	3.534	1.040	1.040	\$0.0096
	C 50%	2.494			
	S 25%	0.700	0.313	0.313	\$0.0319
	C 25%	0.387			
	S todas	6.194	2.471	2.471	\$0.0040
	C todas	3.723			
Intermedio	S 75%	11.060	2.772	0.554	\$0.0180
	C 75%	8.288			
	S 50%	3.123	0.629	0.126	\$0.0794
	C 50%	2.494			
	S 25%	0.454	0.067	0.013	\$0.7692
	C 25%	0.387			
	S todas	4.879	1.156	0.231	\$0.0433
	C todas	3.723			
Pesimista	S 75%	2.375	0.875	0.035	\$0.2857
	C 75%	1.500			
	S 50%	0.722	0.236	0.0094	\$1.0638
	C 50%	0.486			
	S 25%	0.147	0.063	0.0025	\$4.0000
	C 25%	0.084			
	S todas	1.081	0.391	0.0156	\$0.6388
	C todas	0.690			

costos mostrados, aun en el caso más pesimista, se encuentran en el orden de magnitud de lo que hoy en día se paga por m³ de agua en domicilio urbano; mientras que en el caso más optimista, el orden de magnitud es competitivo, comparado con los costos reales para usos agrícolas (aunque, por supuesto, no con las tarifas subsidiadas que los agricultores pagan en México).

Es importante resaltar que lo mostrado en el cuadro 2 no son los costos unitarios obtenidos en el experimento científico. En dicho experimento, los costos incluyen los de la adquisición del conocimiento para poder llegar a las conclusiones en este trabajo y en varias de las referencias. Pero aun así no son irrazonablemente altos; por ejemplo, bajo las hipótesis del escenario optimista, ascendieron a \$ 0.18 pesos por metro cúbico.

Conclusiones

Del experimento PARC, el más completo y mejor instrumentado que se ha realizado sobre estimulación de lluvia en México, se estiman costos por m³ de agua adicional producida, que resultan claramente competitivos con los costos actuales del agua en México, en el orden de magnitud de \$0.01 a \$1.00 pesos. En conjunto con otros dos experimentos similares realizados en Sudáfrica y Tailandia, sus resultados han hecho renacer el interés de la comunidad científica en este controversial tema (WMO, 2000; Rosengaus y Bruintjes, 2002). Aunque aún no se justifica establecer sembrado higroscópico como una técnica operativa masiva para el incremento sistemático del recurso agua, resulta razonable continuar con las investigaciones relacionadas con su aplicabilidad en diversas zonas de México y del resto del mundo subtropical, ahora ya incorporando a investigadores críticos en ramas afines con los usos potenciales del recurso (hidrología, aguas subterráneas, obras hidráulicas, desarrollo agropecuario y forestal, ecología, etcétera).

Recibido: 28/11/2002
Aprobado: 13/05/2003

Referencias

- BRUINTJES, R.T., BREED, D.W., FOOTE, G.B., DIXON, M.J., BROWN, B.G., SALAZAR, V. y RAMÍREZ, H. Program for the augmentation of rainfall in Coahuila (PARC): overview and design. *Proceedings of the 7th Conference on Weather Modification*. World Meteorological Organization. 1999, pp. 53-56.
- CALDERÓN G., J.J., *Verificación objetiva de campañas de estimulación de lluvia*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 2001, 227 pp.
- DIXON, M.J. y WEINER, G. TITAN-Thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting-a radar based methodology. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. Vol.10, 1993, pp.785-797.
- MATHER, G.K. Coalescence enhancement in large multicell storms caused by emissions from a kraft paper mill. *Journal of applied meteorology*. Vol.30, 1991, pp. 1134-1146.
- MATHER, G.K., TERBLANCHE, D.E., STEFFENS, F.E. y FLETCHER, L. Results of the South African cloud-seeding experiment using hygroscopic flares. *Journal of applied meteorology*. Vol.36, 1997, pp. 1433-1447.
- NCAR. *Report on first year activities of PARC*. Informe técnico. Boulder, Colorado: Research Applications Program. National Center of Atmospheric Research. 1997a, 105 pp.
- NCAR. *Report on second year activities of PARC*. Informe técnico. Boulder, Colorado: Research Applications Program. National Center of Atmospheric Research. 1997b, 54 pp.
- NCAR. *Report on third year activities of PARC*. Informe técnico. Boulder, Colorado: Research Applications Program. National Center of Atmospheric Research. 1999, 67 pp.
- ROSENGAUS, M. Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos (primera parte). *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. X, núm. 1, 1995a, pp. 55-74.
- ROSENGAUS, M. Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos modernos (segunda parte). *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. X, núm. 2, 1995b, pp. 59-78.
- ROSENGAUS, M. y REZA A., G. *Informe anual del proyecto HG-9622: verificación de campañas de estimulación de lluvias*. Informe técnico. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1996, 46 pp.
- ROSENGAUS, M., REZA A., G. y MUNDO M., J.A. *Informe final del proyecto TH-9723: participación en la campaña de estimulación de lluvia en Monclova*. Informe técnico. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1998, 66 pp.
- ROSENGAUS, M., CALDERÓN G., J.J., GARCÍA R., F. y MUNDO M., J.A. *Informe final del proyecto TH-9814: participación en la campaña de estimulación de lluvia 96-99 (durante 98), Monclova, Coahuila*. Informe técnico. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1999, 172 pp.
- ROSENGAUS, M. y CALDERÓN G., J.J. *Informe final de los proyectos TH-9082 y TH-9083: participación en la campaña de estimulación de lluvia*. Informe técnico. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000, 47 pp.
- ROSENGAUS, M. *Estimulación artificial de lluvia en Coahuila*. Anuario 1999. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000a, pp.42-51.
- ROSENGAUS, M. Precisión y exactitud del radar meteorológico como instrumento para medir lluvia. *Memorias del 5º Congreso de Meteorología de la CFE*. Ponencia 20. México, 23 y 24 de marzo de 2000(b).

ROSENGAUS, M. y BRUINTEJES, R. Estimulación de lluvia por sembrado higroscópico. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XVII, núm.1, 2002, pp.13-29.

VELASCO, I. Detección y evaluación de la sequía meteorológica mediante el SPI. *Memorias del IV Diálogo Interamericano de Gerenciamiento de Aguas* [en CD-

ROM] ponencia dial 158.pdf. Iguazú, Paraná, Brasil, 2001, 11 pp.

WMO. *Report of the WMO International Workshop on Hygroscopic Seeding: Experimental Results, Physical Processes, and Research Needs*. World Meteorological Organization. WMP Report número 35, 2000, 68 pp.

Abstract

ROSENGAUS MOSHINSKY, M. & CALDERÓN GARCÍA, J.J. *Per unit cost estimate of water produced by hygroscopic cloud seeding*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). January-March, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 17-26.

A hygroscopic cloud seeding experiment with objective verification procedures is described, which shows an additional 60% of precipitation in isolated convective summer storms in the area of Monclova, Coahuila, in the semiarid northeastern region of Mexico. Based on the hydrologic calibration of the weather radar used, the improvement is computed on absolute terms and with it, the order of magnitude of the per-cubic-meter cost of additional rainfall produced is estimated, showing that it is competitive when compared to the current prices of water in Mexico.

Keywords: hydrometeorology, artificial rain enhancement, cloud seeding, hygroscopic, weather radar.

Dirección institucional de los autores:

Michel Rosengaus Moshinsky

Doctor en Ciencias.
Comisión Nacional del Agua.
Jefe de la Unidad del Servicio Meteorológico Nacional.
Avenida Observatorio 192, col. Observatorio,
Delegación Miguel Hidalgo,
México, D.F., 11860,
teléfono: + (52) (55) 9159 8600, extensión 3404,
fax: + (52) (55) 9159 8695,
mickros@terra.com.mx, mrosengaus@mailsmn.cna.gob.mx.

Juan José Calderón García

Maestro en Ingeniería
DEPFI-UNAM, Campus Morelos,
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec,
Morelos, México. C.P. 62550,
Teléfono: + (52) (777) 239 3600, extensión 136.