

RELACION ENTRE PRECIPITACION Y APORTACIONES DE AGUA A LA PRESA "ADOLFO RUIZ CORTINES". SU USO PARA EVALUAR EL PROGRAMA DE ESTIMULACION DE LLUVIAS*

Oscar H. MORENO RAMOS¹

RESUMEN

La lluvia artificial mediante la estimulación de nubes es un tema sumamente debatido. A la fecha existe una serie de procedimientos de patente extranjera, cuyo funcionamiento en condiciones de México ha dejado mucho que desear. Hacia 1974, Menéndez propuso un método que él había estado ajustando a las condiciones nacionales desde 1967. Este método fue empleado en el noroeste de México; sin embargo, de su aportación poco se sabía.

Por tal razón, en el sur de Sonora se llevó a cabo el análisis de la información disponible, con objeto de emitir un juicio acerca del programa de estimulación de lluvias que usa la metodología antes citada. El análisis partió de la hipótesis de que la cantidad de agua aportada a la presa está estrechamente asociada con la cantidad de lluvia que cae en la costa, fuera de la cuenca de captación, pues de otra manera estaría influenciada por el proceso de estimulación de lluvias. Si la hipótesis opera, entonces la aportación puede calcularse mediante la precipitación, la cual estaría afectada por un coeficiente. En consecuencia, un procedimiento para estimular lluvias funciona si y sólo si altera de manera positiva dicho coeficiente. Es decir, el procedimiento funciona sólo si el agua aportada a la presa es mayor con el uso de este procedimiento, manteniendo constante la lluvia en el área de la costa elegida con tal propósito.

Para el análisis se usó fundamentalmente la información relativa a la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas del área del Distrito de Riego Núm. 149, así como las cifras de las aportaciones de agua al vaso de la presa. La información disponible se dividió por períodos: el histórico y el del programa; en seguida se procedió a mostrar que su distribución era normal y se calculó la correlación entre la precipitación y las aportaciones para ambos períodos; luego se efectuó el análisis de regresión entre la precipitación usada como variable independiente y las aportaciones usadas como dependiente, y por último se procedió a mostrar que las funciones eran diferentes para ambos períodos.

* *Este artículo fue enviado al Comité Editorial del INIFAP. Área Agrícola el 8 de junio de 1994.*

¹ DCA. Investigador Nal. II en el SNI y Sistemas de Producción INIFAP.

Los resultados indicaron que el período propicio para estimular lluvias es de julio a octubre y que, en el tiempo que operó el programa, la lluvia acaecida fue el 67% de la correspondiente al período histórico, pero la aportación a la presa fue de 87% y la correlación entre precipitación y aportación fue cercana al 72%. Asimismo, de acuerdo con la información disponible, no hubo evidencias de que la aportación de agua al almacenamiento no se distribuya normalmente, lo que pudo aceptarse *a priori*, en virtud del teorema del límite central. El coeficiente de regresión del período del programa resultó mayor que el correspondiente al histórico, lo cual aporta evidencias a favor de la hipótesis planteada. De ahí puede deducirse que, al funcionar la estimulación de lluvias, es de esperarse que la presa se llene en la mayoría de los años; en consecuencia, puede especularse sobre la necesidad de construir nuevos almacenamientos y también en la posibilidad de abrir entre un 30 y 40% de nuevas tierras al cultivo, con lo cual prácticamente se duplicaría la actividad económica del área.

Palabras clave: Lluvia artificial, precipitación, aportaciones al almacenamiento de la presa.

INTRODUCCION

El sistema terrestre conocido como la planicie costera del noroeste está formado por una serie de deltas fusionados, los cuales se fueron rellenando mediante los acarreos de los ríos que drenan esta parte del continente. El clima del sistema es considerado en general como árido; sin embargo, dicha aridez va en aumento conforme se avanza hacia el norte. Este sistema colinda hacia el este con la Sierra Madre Occidental, sistema en donde se ubica la cuenca de captación de dichos ríos. Hacia el sur y oeste, con el Mar de Cortés y hacia el norte, con los Estados Unidos de América.

En las llanuras costeras, la agricultura es la actividad económica más importante de los residentes del área. Dicha actividad se considera empresarial, dado el adelanto tecnológico que manifiesta, así como el uso tan intenso de insumos modernos de producción. En esta región, el ambiente seco cálido (en la parte costera) fuerza al individuo a practicar una agricultura de riego. Este es el motivo por el cual el gobierno federal propició la construcción de una buena serie de infraestructuras en la parte sureste de la planicie (Culiacán, Fuerte, Mayo, Yaqui, etc.), que en su conjunto reciben el nombre de Distritos de Riego.

En estos Distritos de Riego se pretende básicamente captar los escurrimientos de los ríos, en vasos de almacenamiento o presas, durante los períodos de abundancia. Este hecho propicia la posibilidad de distribuir este vital elemento de manera programada, tomando en cuenta las necesidades y prioridades a que está sujeto su uso.

Al inicio de este complejo sistema de producción agregado, el agua almacenada fue suficiente para satisfacer la demanda. Sin embargo, al paso de los años el progresivo aumento de la población, y su consecuente presión demográfica, trajo consigo la apertura de una mayor cantidad de tierras al cultivo. Todo esto se reflejó en un marcado decremento de las disponibilidades de agua *per cápita* para fines agrícolas. Ante este fenómeno que amenazaba constantemente la producción agrícola, muchos productores se ocuparon durante 1976 en la búsqueda de soluciones que pudieran garantizar su estabilidad económica y social. Algunas de las proposiciones planteadas pueden sintetizarse como sigue:

A. Aumentar la eficiencia en el uso de agua disponible:

- 1) Mejorando la infraestructura de operación y distribución.
- 2) Perforando pozos profundos que permitan reciclar una buena parte del agua perdida en el manejo.

B. Aumentar las reservas de agua mediante el uso de las técnicas de estimulación de lluvias.

A la postre, todas estas alternativas tendrán que ser evaluadas y, de ser factible, llevarse a la práctica cuando el fenómeno de desarrollo social así lo exija y justifique.

En este trabajo se propone una alternativa para evaluar el funcionamiento de un programa que usa la tecnología mexicana de estimulación de lluvias, cuya meta es aumentar las reservas de agua en el corto plazo. Esta metodología fue desarrollada por Menéndez*, en Tecamachalco, Pue., a partir de 1969, e incluye desde la teoría de cómo se origina la lluvia, hasta los productos químicos y las formas de operar las cuencas, usando la aviación y/o equipos terrestres.

Objetivos e hipótesis

Este trabajo tiene por objetivo proponer una metodología que permita evaluar el funcionamiento de un programa que usa la tecnología mexicana de estimulación de lluvias, para aumentar las disponibilidades de agua en el estado de Sonora. En las condiciones actuales se hace patente la necesidad de una

* Comunicación personal del Ing. Manuel Menéndez O.

metodología que, usando la información disponible permita evaluar la capacidad de los métodos actuales para estimular lluvias. Para cumplir con este objetivo se formuló la hipótesis de que la cantidad de agua aportada al almacenamiento en la presa está estrechamente relacionada con la cantidad de lluvia registrada en la parte de la planicie costera correspondiente a la zona de riego, que es abastecida por una cuenca de captación. Se especifica que esta información esté fuera de la cuenca, puesto que de otra manera la información estaría afectada por el método de estimulación de lluvias.

De esta hipótesis se deduce que si en forma natural la aportación se calcula multiplicando la precipitación por un coeficiente, entonces se acepta que un procedimiento para estimular lluvias funciona cuando altera positivamente tal coeficiente. En otras palabras, se acepta que un procedimiento de estimulación de lluvias funciona sí y sólo sí la cantidad de agua aportada a la presa es mayor cuando se usa el procedimiento que cuando no, para una misma cantidad de lluvia registrada en la planicie costera, fuera de la cuenca de captación.

REVISION DE LITERATURA

La desertificación puede entenderse como un proceso dinámico que deteriora física y biológicamente los ecosistemas del planeta. Este deterioro es algunas veces de carácter irreversible y sus consecuencias pueden ser de índole diversa: políticas, sociales y económicas, según mencionó Anaya (1) en 1980. La zona árida de México abarca en la actualidad el 53% del territorio nacional y en ella queda comprendido todo el norte de México.

Aun cuando el agua es abundante (su cuantía se estima en 1,358 millones de km³), su disponibilidad en cantidades apropiadas condiciona la calidad, la continuidad y la distribución de la vida en el planeta. La importancia de estos postulados destaca en condiciones de las regiones áridas del país, donde las manifestaciones biológicas serían escasas o nulas, de no ser por las obras hidráulicas que ha llevado a cabo el sector público, como ocurre en el estado de Sonora.

Al principio, la disponibilidad de agua fue abundante, pues la demanda era pequeña; sin embargo, la tasa de crecimiento demográfico (superior al 3.5% en el período comprendido entre 1960 y 1980 según datos del INEGI (3), 1990), una de las más altas del mundo, ha propiciado que incluso las regiones como el sur de Sonora y norte de Sinaloa, cuya disponibilidad de agua ha sido usualmente alta, limiten su actividad agrícola. De acuerdo con lo comentado por Moreno (4)

en 1982, este hecho es aún más importante conforme se avanza hacia el norte de la región, razón por la cual se están haciendo esfuerzos considerables por aumentar la eficiencia en el uso y distribución del agua disponible, a la vez que se promueven programas de desarrollo hidráulico en pequeña y grande irrigación (Plan Agrícola 1985).

Hace tiempo, Menéndez logró desarrollar una metodología para estimular lluvias, cuyo diseño se inició a partir de 1969 y culminó en 1976. Dicha metodología consiste de un reactivo específico y una rutina para el ataque de las nubes, para poder propiciar la nucleación y la lluvia subsecuente. Durante 1979, por encargo del comité de estimulación de lluvias en el estado de Sonora se analizó la información existente y los resultados fueron publicados por Moreno (4) en 1981. En esa ocasión se sentaron las bases para el análisis, las cuales siguen siendo válidas para el presente trabajo que comprende hasta 1982, año en el cual se suspendió el citado programa.

Los fenómenos climatológicos poseen una componente dinámica de magnitud considerable, lo que ocasiona que su diagnóstico con certidumbre razonable sea prácticamente imposible. El problema de la cantidad y oportunidad de la lluvia ha sido estudiada por muchos autores, de los cuales quizá el más sobresaliente es el Dr. Carrillo Liz (2) quien en 1974 trabajó la distribución de frecuencias de la precipitación, indicando que la mejor alternativa es la Gamma, que representa la distribución de probabilidad de ocurrencia de una cierta cantidad de lluvia en un período dado. La función de distribución acumulada de la probabilidad, obtenida al integrar la anterior función, la nominó el citado autor como la Gamma incompleta.

MATERIALES Y METODOS

En la prueba de hipótesis se usó la información correspondiente al Distrito de Desarrollo Rural Núm. 149, del Río Mayo; su cuenca de captación, su presa y su área de riego. Algunas de sus características se resumen en el Cuadro 1.

En la planicie costera (fuera de la cuenca) existe información pluviométrica de 14 estaciones meteorológicas, la cual se presenta en el Cuadro 2. El área de trabajo se seleccionó por darse la condición de que la parte testigo (la zona de riego), se ubica precisamente "vientos arriba" (Barlovento) de la cuenca, como se observa en la Figura 1. Esto constituye una coincidencia geográfica de incalculable valor para el proceso de evaluación, pues los vientos húmedos pasan

CUADRO 1. CARACTERÍSTICAS SOBRESALIENTES DEL AREA DONDE SE LLEVO A CABO LA ESTIMULACION DE LLUVIAS. DDR 149 (Río Mayo, Sonora).

Característica	Valor	Unidades
Area de riego	95,800	ha
Area de la cuenca de captación	9,500	km2
Precipitación promedio (Jul-Oct)	363	mm
Valor máximo (Jul-Oct)	688	mm
Valor mínimo (Jul-Oct)	249	mm
Capacidad de almacenamiento	1,114	Mm3
Aportación promedio (Jul-Oct)	670	Mm3
Aportación mínima (Jul-Oct)	415	Mm3
Aportación máxima (Jul-Oct)	1,257	Mm3

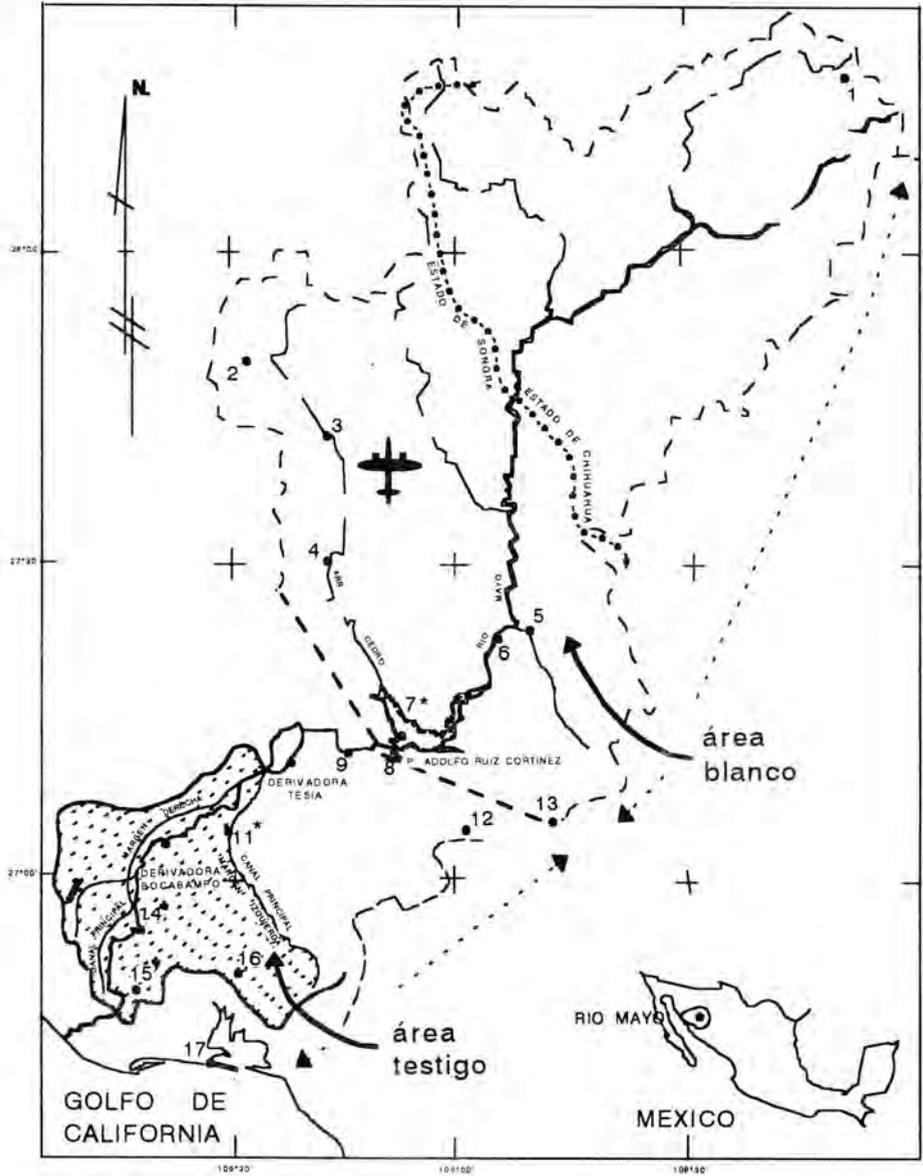
primero por encima de los pluviómetros ubicados en la zona testigo y luego entran al área donde se aplica el tratamiento. La orientación de ambas áreas, que coincide con la dirección de los vientos, y el hecho de que la zona testigo tenga una anchura ligeramente menor que la cuenca, hacen que este estudio cuente con inmejorables condiciones naturales para evaluar los efectos del tratamiento de las masas atmosféricas. Aunado a lo anterior, es la parte que se ha atendido con mayor oportunidad.

En el desarrollo de este trabajo se usó la información de la Sección de Hidrometría y Estadística de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). Fundamentalmente, los registros de precipitación colectados en las 14 estaciones meteorológicas del Distrito de Riego Núm. 149 antes mencionado y los aforos (volumétricos) de las aportaciones en la Presa Adolfo Ruíz Cortines en su historia de funcionamiento.

Para llevar a cabo el trabajo, la información se separó en dos subconjuntos; uno de ellos comprende la información previa al funcionamiento del programa de estimulación de lluvias, al cual se le referirá en lo sucesivo como período "histórico", y que abarca desde 1956 hasta 1975 inclusive. El otro subconjunto incluye la información de 1977-1982, lapso durante el cual se estuvo trabajando en la estimulación de lluvias, y se denominará período de "Programa".

CUADRO 2. UBICACION Y OTRAS CARACTERISTICAS DE LAS ESTACIONES METEOROLOGICAS USADAS EN LA EVALUACION DEL PROGRAMA DE ESTIMULACION DE LLUVIA EN EL SUR DE SONORA.

Estación	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud	Años
San Bernardo	Alamos	27°24'40"	108°52'30"	185.54	23
Tesocoma	Quiriego	27°41'00"	109°17'20"	266.20	22
Tesia	Navojoa	27°10'25"	109°22'18"	47.00	31
Tres Hermanos	Navojoa	27°12'12"	109°12'00"	85.00	34
Cortina	Alamos	27°14'10"	109°05'30"	144.30	28
San Pedro	Etchojoa	27°02'30"	109°56'25"	20.00	26
Navojoa	Navojoa	27°10'29"	109°22'30"	47.80	23
Jurpare	Huatabampo	26°46'48"	109°45'00"	5.15	8
Lindero	Etchojoa	26°54'30"	109°45'18"	10.20	13
Nachuquis	Navojoa	27°04'30"	109°36'18"	33.50	13
Sinahuisa	Navojoa	26°33'50"	109°27'57"	33.00	9
Mumuncuera	Navojoa	26°50'10"	109°25'10"	31.85	21
CIANO	Navojoa	27°28'45"	109°40'08"	29.00	15
Huatabampo	Huatabampo	26°51'00"	109°37'01"	8.00	21



Estaciones climatológicas:

- | | | | | |
|-------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| 1. Concheño | 5. San Bernardo | 9. Tres Hermanos | 13. San Antonio | 17. Tavaros |
| 2. Tezopaco | 6. Las Panelas | 10. Tesia | 14. Etchojoa | |
| 3. Tezocoma | 7. Isleta Mocozañi | 11. El Nudo (Navojoa) | 15. Huatabampo | |
| 4. Quiniago | 8. P. Adolfo Ruiz Cortines | 12. Minas Nuevas | 16. Mumuncuera | |

Figura 1. Ubicación del área de estudio y del Distrito de Riego Núm. 149 y su cuenca de captación.

Posteriormente, se llevó a cabo una prueba de bondad de ajuste, para justificar el uso de la distribución normal en las pruebas estadísticas.

Una vez justificado el uso de la distribución normal, se efectuó el análisis de correlación, con objeto de encontrar la o las estaciones meteorológicas, cuyas precipitaciones estuviesen más asociadas con las aportaciones de agua a la presa, y de esta manera proceder al análisis gráfico que proveyera elementos para emitir un juicio acerca del modelo que pudiera explicar las aportaciones de agua a la presa, en función de la precipitación de la estación previamente seleccionada. Esta información fue el punto de partida para el análisis de regresión lineal simple en el que se usó la precipitación como variable independiente y las aportaciones como dependiente. Una vez hecho lo anterior, se llevó a cabo la prueba central del trabajo, la cual consistió en mostrar que la relación entre la precipitación y la aportación era diferente para los dos subconjuntos de datos formados inicialmente.

RESULTADOS Y DISCUSION

La información empleada en el trabajo comprendió básicamente la precipitación mensual registrada en las 14 estaciones climatológicas de que consta el Distrito y cuyas características se presentan en el Cuadro 2. En el Cuadro 3 se muestra la aportación mensual al almacenamiento de la presa. Una síntesis de la información, a nivel de promedio de las estaciones climatológicas, se incluye en la Figura 2, de donde se desprenden cuatro comentarios importantes:

1. Un programa para estimular lluvias tiene mayores posibilidades de funcionar eficientemente si se realiza en el período comprendido entre julio y octubre, porque es cuando se registra más del 80% de la precipitación (Figura 1). Eventualmente, podría intentarse dicha estimulación en diciembre y enero, pues además de la presencia (aunque errática) de nubes, los cauces están húmedos y cualquier precipitación podría influir en el almacenamiento de las presas.
2. La precipitación promedio en el área del estudio ha sido mucho mayor durante el período histórico que la correspondiente al período del programa de estimulación de lluvias. Es decir, el programa fue establecido y funcionó en años extremadamente secos.

3. Se observa en la Figura 2 cierta concordancia en la tendencia de la información.
4. Las aportaciones de agua al almacenamiento de la presa durante el período del programa resultaron sólo ligeramente menores a las correspondientes al período histórico, aun cuando la precipitación en el área testigo, como se observa en la Figura 2, resultó mucho menor, sobre todo en julio y agosto, meses en que llueve el 70-80% del total.

CUADRO 3. APORTACIONES DE AGUA AL VASO DE LA PRESA EN EL PERIODO EN QUE SE LLEVO A CABO LA ESTIMULACION DE LLUVIAS EN EL SUR DE SONORA.

Años	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Suma
1956	146.4	149.2	51.3	12.6	359.5
1957	114.1	179.9	66.8	160.6	521.4
1958	126.8	232.8	155.7	61.0	576.3
1959	199.0	529.1	79.4	203.3	1,010.8
1960	124.1	235.6	162.9	33.4	556.0
1961	186.3	270.8	174.7	125.1	756.9
1962	118.3	75.8	191.4	37.5	423.0
1963	180.2	281.6	94.8	29.9	586.5
1964	151.9	361.1	346.2	24.6	883.8
1965	81.2	143.8	213.3	16.7	455.0
1966	182.1	639.1	123.4	16.6	961.2
1967	204.3	229.9	150.9	8.9	594.0
1968	241.9	282.5	134.0	39.4	697.8
1969	214.2	107.7	87.8	5.2	414.9
1970	149.0	289.9	132.1	14.0	585.0
1971	236.7	389.4	100.2	530.3	1,256.6
1972	106.1	290.3	130.9	193.3	640.1
1973	94.2	386.4	133.1	193.8	623.3
1974	262.4	143.4	221.7	9.6	663.4
1975	125.8	251.5	203.2	35.9	593.9
1976	165.7	110.0	149.4	89.5	514.6
1977	167.4	336.9	143.4	18.0	665.7
1978	95.9	259.3	207.1	237.4	797.7
1979	66.2	147.0	45.6	10.6	269.4
1980	102.0	392.5	179.5	31.6	705.6
1981	245.8	259.0	299.0	91.4	895.2
1982	126.6	142.3	97.6	34.1	400.6

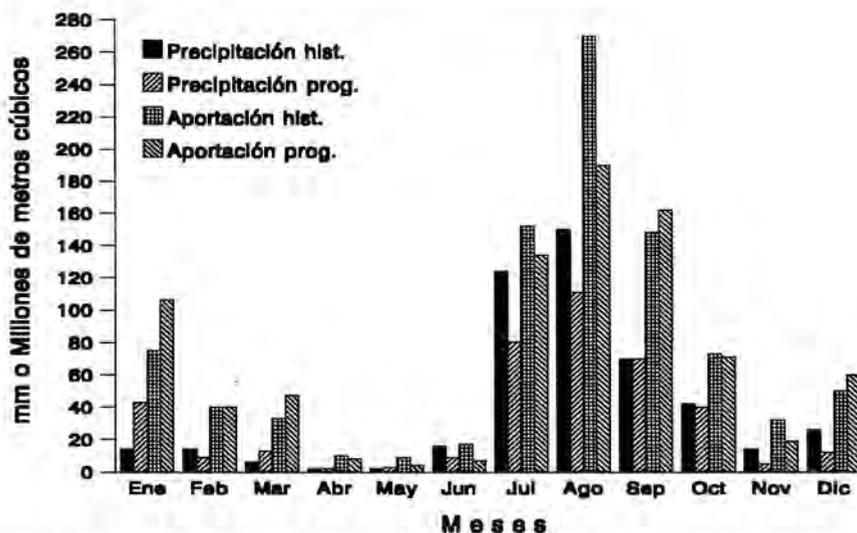


Figura 2. Aportaciones de agua y precipitaciones mensuales en los dos periodos estudiados en relación con el programa de estimulación de lluvias en el sur de Sonora

Prueba de bondad de ajuste a la distribución normal

Se llevó a cabo una prueba de bondad de ajuste de la información a la distribución normal de frecuencias. En dicha prueba se usó la suma de la aportación de agua al almacenamiento de las presas durante los meses que funcionó el programa de estimulación de lluvias. Esta información fue la correspondiente al período histórico, dado que sólo en éste se cuenta con un buen número de años. Idealmente, dicha prueba debió ejecutarse en ambos períodos, pero dado que esto no fue posible, se tendrá que suponer que ambos conjuntos de datos tienen la misma distribución de frecuencias, lo cual es un supuesto razonable. Los resultados de la antes mencionada prueba se exhiben en la Figura 3. La prueba de X^2 proporcionó los siguientes resultados.

$$X^2 \text{ calc} = 3.93; \quad X^2 \text{ tab} = 9.49;$$

De ahí que la regla de decisión fue: No se rechaza que la variable A, se distribuya normal e independientemente, puesto que la X^2 de las tablas resultó mayor que la X^2 calculada.

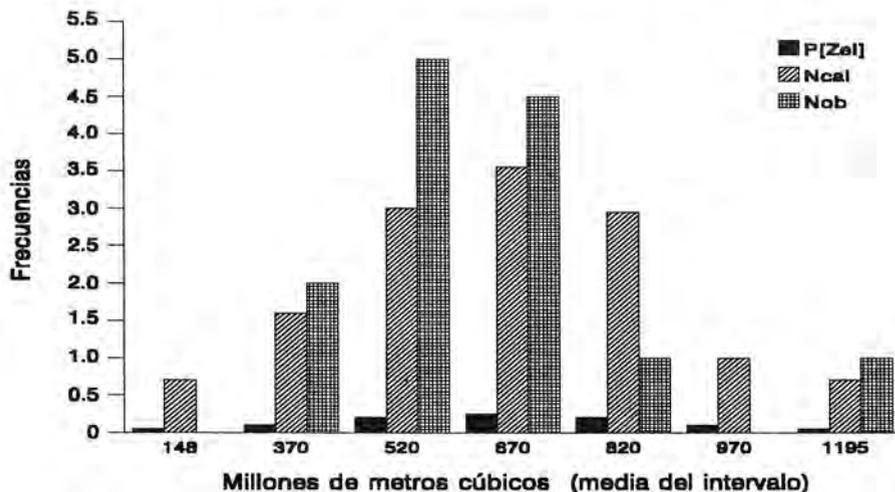


Figura 3. Distribución de frecuencias de la información empleada en la evaluación del programa de estimulación de lluvia en el sur de Sonora

De acuerdo con los resultados de esta prueba, no existen evidencias al nivel de probabilidad de 0.05 de cometer error tipo I de que la variable aportación en el período de julio-octubre no se distribuya normal e independientemente, con media 658.025 y varianza 641 375. Este hecho es, para los fines de este trabajo, de importancia capital, dado que la teoría de prueba de hipótesis estadísticas ha sido elaborada en su mayor parte para esta distribución de frecuencias. El hecho de que esta variable se distribuya normalmente, pudo también deducirse usando el teorema central de límite, en virtud del cual siendo A una variable con distribución desconocida, entonces la variable formada por la sumatoria de las A (sobre el número de estaciones) se distribuye forzosamente normal cuando N (el número de observaciones) es grande. En razón de esta última condición fue que se optó por llevar a cabo la anterior prueba de normalidad.

Análisis de la información

Una vez realizada la prueba de normalidad, se procedió a graficar la aportación a la presa contra la precipitación registrada en las diferentes estaciones

climatológicas disponibles con el objetivo de poder emitir un juicio acerca del posible modelo matemático para expresar la relación entre estas dos variables.

Posteriormente, se llevó a cabo el análisis de correlación entre la precipitación de las estaciones disponibles y las aportaciones en el vaso de presa, de todas maneras y acomodados posibles. Algunos de los resultados de dicho análisis se presentan en el Cuadro 4, donde puede constatararse que en general, la correlación precipitación-aportación fue alta, siendo la global (usando toda la información) de 72%. El hecho de que la correlación sea alta, evidencia por un lado que la hipótesis planteada no se rechaza y por el otro, justifica el empleo de la información pluviométrica disponible para explicar las aportaciones de agua a la presa en cuestión. La decisión de que la información para el análisis de regresión fuera la correspondiente al promedio de las estaciones: Nachuquis, CIANO y Navojoa, para los cuatro meses en que se estimuló la lluvia, se tomó después de un buen número de intentos.

Con los datos del Cuadro 5 se llevó a cabo el análisis de regresión para cada subconjunto previamente formado (Histórico y Programa); este análisis se realizó por mes en cada subconjunto, usando para ello la aportación total en el período de trabajos (julio-octubre), contra la precipitación total en el mismo período para cada subconjunto. Esta información se presenta en el Cuadro 5, en el cual se observa que en general, la precipitación en la zona testigo (promedio) fue siempre mayor durante el período histórico que la correspondiente al período del programa: este hecho parece indicar que la región atraviesa por una etapa de escasa precipitación o, lo que es lo mismo, una etapa más seca que el promedio de los años. Esto mismo puede apreciarse en lo que se refiere a la información relativa a las aportaciones al almacenamiento de la presa; sin embargo, cabe destacar que las diferencias observadas entre ambos períodos son menos drásticas en este último caso.

Aun cuando el análisis de regresión se llevó a cabo a nivel mensual y por cada estación climatológica, para la discusión de resultados sólo se usó la suma de los cuatro meses en que se realizó la estimulación de lluvias. Las funciones calculadas se refirieron a la precipitación de 200 mm, dado que es cercana a la mínima registrada, y las predicciones deberán hacerse hasta 650-770 mm, que es la máxima registrada. De esta manera, las ecuaciones quedan de la siguiente manera:

$$A_H = 609.4818 + 0.7958 (P_H - 200)$$

$$A_P = 683.499 + 2.4233 (P_P - 200)$$

Donde: A_H = Aportación período histórico, A_P = Aportación período Programa, P_H = Precipitación período histórico, P_P = Precipitación período programa. Gráficamente estas funciones se presentan en la Figura 4.

CUADRO 4. COEFICIENTES DE CORRELACION ENTRE LA PRECIPITACION Y LA APORTACION DE AGUA A LA PRESA EN LAS DIFERENTES ESTACIONES CLIMATOLOGICAS

Mes	Período	Estación climatológica de:					
		Etcho.	Navo.	Huata.	3 Hnos.	Cortin	Prom.
Enero	H	0.49	0.49	0.62	0.91	0.88	0.81
	P	0.98	0.97	0.98	0.99	0.99	0.97
Febrero	H	0.83	0.92	0.85	0.84	0.83	0.87
	P	-0.36	-0.36	-0.14	-0.10	0.00	-0.18
Marzo	H	0.89	0.97	0.96	0.87	0.84	0.90
	P	0.78	0.76	0.78	0.74	0.77	0.77
Abril	H	0.00	0.55	1.00	0.73	0.53	0.42
	P	1.00	1.00	1.00	-0.29	-0.29	-0.29
Mayo	H	0.38	0.14	0.14	0.15	0.11	0.16
	P	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Junio	H	0.41	0.01	0.27	0.78	0.70	0.73
	P	0.40	0.95	-0.98	-0.85	-0.90	-0.97
Julio	H	0.12	0.35	0.15	0.21	0.46	0.31
	P	0.91	-0.27	0.51	0.05	0.30	0.19
Agosto	H	0.14	0.18	-0.04	0.09	-0.01	0.016
	P	0.28	0.92	0.77	0.54	0.97	0.82
Septiembre	H	-0.02	0.09	0.35	0.32	0.50	0.23
	P	-0.89	0.22	-0.94	0.18	0.31	1.00
Octubre	H	0.79	0.78	0.79	0.57	0.66	0.74
	P	0.99	0.94	0.81	0.55	0.36	0.88
Noviembre	H	0.78	0.84	0.84	0.67	0.65	0.81
	P	0.98	0.96	0.96	0.96	0.98	0.96
Diciembre	H	0.26	0.52	0.38	0.73	0.66	0.56
	P	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Global	H	0.60	0.70	0.53	0.71	0.71	0.72
	P	0.42	0.61	0.43	0.73	0.78	0.72

H = Período histórico, P = Período del programa

CUADRO 5. PRECIPITACION REGISTRADA EN LAS 14 ESTACIONES CLIMATOLOGICAS Y LA APORTACION A LA PRESA DURANTE LOS MESES EN QUE SE REALIZO LA ESTIMULACION DE LLUVIAS EN EL SUR DE SONORA.

Año	Jupare	Sinah.	Lind.	Nach.	CIANO	Mumun.	Huatab.	Tesoco.	Sn.Ber.	Etch	Navoj.	Cort.	Tesia 3 Hnos.	Aport.	
1957										222.0		610.2	339.3	593.2	521.4
1958										309.0		727.1	539.0	752.5	576.3
1959										325.9		794.4	420.5	790.8	1,010.8
1960									317.7	331.2	243.5	319.5	337.1	432.5	556.0
1961								594.7	669.5	330.3	371.9	547.8	447.4	539.5	756.9
1962						288.2	195.3	630.8	308.0	247.8	188.5	437.3	299.8	372.6	423.0
1963						274.7	246.0	614.0	672.0	297.7	380.5	436.1	520.6	312.6	586.5
1964						266.4	251.0	605.7	422.4	286.3	249.0	409.5	347.8	359.0	883.8
1965						280.5	210.0	412.8	332.9	216.5	267.0	474.5	336.4	401.6	455.0
1966						311.2	364.5	506.1	443.5	355.9	365.5	364.6	363.9	446.1	961.2
1967						258.6	208.8	268.6	510.3	323.5	385.5	522.6	382.0	444.2	593.9
1968					197.6	258.1	292.0	886.6	508.4	233.7	281.4	488.8	295.6	431.6	697.8
1969					193.6	248.9	139.5	367.2	502.1	93.9	223.8	428.1	244.5	361.0	415.1
1970			201.1	191.0	332.5	372.2	155.0	702.0	661.6	281.0	361.5	503.6	454.5	547.3	585.0
1971			288.8	422.4	369.6	304.2	452.0	705.4	814.9	459.4	402.1	491.2	497.2	455.2	1,256.6
1972			657.0	462.5	508.6	416.9	874.0	449.5	575.7	752.8	602.1	780.0	490.5	428.4	640.1
1973			266.0	176.6	196.9	216.4	150.5	493.5	393.6	124.9	213.1	456.7	271.4	324.3	623.3
1974		119.5	276.5	419.4	209.0	239.1	212.8	488.8	433.8	220.9	298.8	744.5	365.5	697.0	663.9
1975	144.5	231.0	154.9	194.2	253.9	210.6	105.5	644.5	463.2	122.9	262.2	346.2	333.6	542.7	593.8
1976	365.5	311.7	295.2	111.5	365.9	301.6	270.5	506.0	619.2	248.5	463.9	552.6	440.9	365.1	514.6
1977	230.8	134.4	133.5	176.5	161.4	384.3	162.0	591.9	588.4	134.8	189.4	328.4	274.8	395.1	665.7
1978	183.3	243.8	187.1	246.7	301.9	190.1	104.0	522.1	724.2	125.6	355.4	400.2	317.1	428.1	797.7
1979	212.6	105.2	178.5	109.4	127.9	86.3	162.5	248.2	376.3	209.3	116.3	208.2	252.8	305.2	269.4
1980	271.7	368.4	233.9	222.1	266.9	209.6	334.0	601.7	629.1	181.5	491.5	369.5	576.6	415.7	705.6
1981	253.5	280.4	220.5	292.1	320.7	279.8	254.8	626.4	553.8	285.9	356.8	456.4	465.1	384.0	895.4
1982	126.9	277.5	144.2	189.8	214.7	248.1	145.0	517.8	551.6	110.0	219.3	449.9	397.7	503.5	400.6

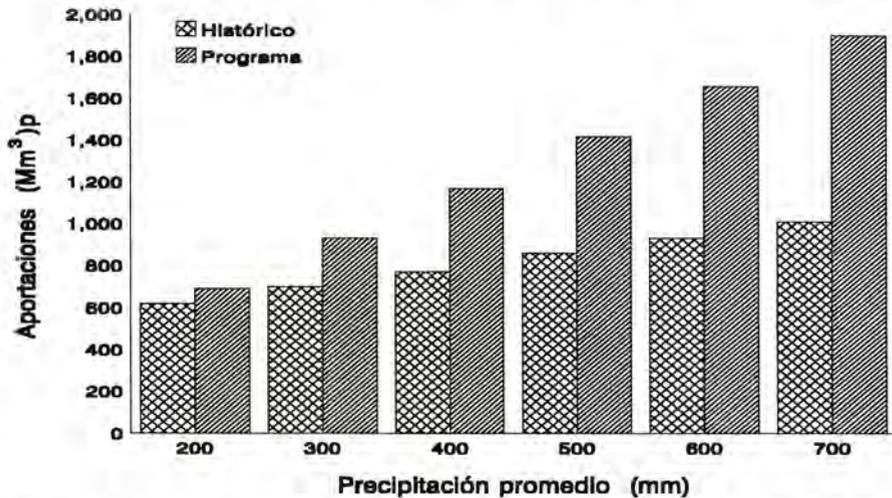


Figura 4. La aportación teórica de agua al almacenamiento de la presa usando los modelos estimados

De acuerdo con estos resultados, se observa que la función histórica y la de programa refieren sensiblemente la misma cantidad de agua a valores bajos de precipitación. Es posible que este hecho obedezca a que en el período del programa, el mes de junio fue seco por completo y consecuentemente los cauces en la cuenca estaban secos, y para que se inicie el escurrimiento es necesario primero que éstos se mojen. Aunado a lo anterior, ocurre que no se aplica el procedimiento debido a la ausencia de nubes; es decir, no es posible hacer la estimulación.

En el Cuadro 6 puede constatar que la pendiente de la función resultó mucho mayor en período del programa, siendo sus valores de 0.8 y 2.42 millones de metros cúbicos aportados a la presa por cada milímetro de lluvia registrado en la costa, para los períodos históricos y del programa, respectivamente. Este hecho parece indicar que en el ámbito estudiado, las aportaciones al almacenamiento de la presa durante el período del programa fueron superiores a las correspondientes al período histórico, para precipitaciones mayores de 275 mm. Esta precipitación, de acuerdo con la información, ocurre un año de cada 10, lo cual es una probabilidad sumamente baja. Queda ahora por mostrar que las funciones son realmente diferentes y las diferencias entre ambas obedecen única y exclusivamente al azar. Esta prueba se presenta enseguida.

CUADRO 6. ANALISIS DE REGRESION PARA LAS ESTACIONES CLIMATOLOGICAS CONSIDERADAS EN EL DDR NUM. 149 (RIO MAYO, SON.)

Estación	Período	Ordenada	Pendiente	R ²
Linderos	H	698.1238	0.1058	8
	P	90.20334	2.90897	48
Nachuquis	H	441.7646	0.91749	48
	P	-89.7294	3.4555	91
CIANO	H	473.7245	0.74537	34
	P	28.8841	2.5555	83
Mumuncuera	H	505.3945	0.58375	14
	P	346.3846	1.1845	49
Huatabampo	H	546.9688	0.4345	36
	P	443.5146	0.9234	33
Tesocoma	H	407.3574	0.4809	34
	P	-102.40963	1.3992	82
San Bernardo	H	272.6623	0.7882	53
	P	-103.5049	1.4489	48
Etchojoa	H	504.146	0.5846	38
	P	440.457	1.0426	29
Navojoa	H	437.4083	0.7247	34
	P	259.6853	1.2589	73
Cortina	H	499.7827	0.3106	21
	P	48.1669	1.5592	60
Tesia	H	425.0536	0.6141	25
	P	302.5155	0.8295	44
Tres Hermanos	H	440.1355	0.4594	29
	P	385.9126	0.5835	16
Nach, Nav y CIANO	H	450.9658	0.7958	39
	P	198.839	2.4233	82

H = Histórico, P = Del programa

Prueba de los coeficientes

La prueba central de este trabajo, como ya se mencionó, fue mostrar, bajo un nivel de probabilidad dado, que la función calculada es diferente para los dos

periodos previamente definidos; para decidir si la estimulación de lluvias funciona, el coeficiente de regresión deberá ser mayor durante el período del programa con respecto al correspondiente al período histórico.

Para probar esta hipótesis (estadística) se usó la distribución de t, cuyo cálculo es de la siguiente manera.

$$t_c = \frac{b_2 - b_1}{S_{b_2-b_1}}$$

Donde: t_c = t calculada, b_2 = Coeficiente de regresión en el período del programa, b_1 = Coeficiente de regresión en el período histórico, $S_{b_2-b_1}$ = Desviación estándar de la diferencia de los coeficientes.

$$t_c = \frac{2.4235 - 0.7958}{\frac{1}{21317(723671)} + \frac{1}{54433}}$$

$$t_c = \frac{1.627}{0.029456 + 0.3916} = 2.51^{**}$$

** Significativo al 1% de probabilidad de cometer error tipo I.

De aquí se deduce que: los coeficientes de las funciones calculadas son diferentes (es mayor el del período del programa), con un 1% de probabilidad de que sea errónea esta afirmación. Tratándose de fenómenos climatológicos es una seguridad estadística muy alta, difícilmente igualable (o alcanzable). La predicción con ambos modelos se presenta gráficamente en la Figura 4.

Un breve análisis de la información del Cuadro 4, indica que la precipitación media del testigo fue de 384.3 y de 298.2 mm, en los períodos histórico y del programa, respectivamente; esto significa que la lluvia durante el programa fue apenas el 75% de la histórica. La aportación al almacenamiento de la presa fue de 641 y 557 millones de metros cúbicos para el período histórico y del programa, es decir, 87% de la aportación histórica. Esto significa que con el 75% de la lluvia

se captó el 87% de las aportaciones, lo cual parece indicar una mayor eficiencia durante el período en que se llevó a cabo la estimulación de lluvias, máxime si se considera que a menor cantidad de lluvia, los escurrimientos disminuyen de manera desproporcionada.

Considerando las eventualidades a que puede estar sujeta la aseveración siguiente, puede decirse que de acuerdo con este análisis bastaría con que la precipitación fuera de 300 mm para llenar por completo la presa "Adolfo Ruíz Cortines". Esta información indica que, en el 71% de los casos, la precipitación de julio a octubre es superior a esta cantidad durante el período histórico. En cambio, durante el período del programa nunca se ha llegado a los 300 mm de precipitación en la zona testigo.

De lo anterior se deduce que en el 60% de los casos, bajo el funcionamiento del programa de estimulación de lluvias puede esperarse que la capacidad para almacenar el agua sea insuficiente, lo que implica la necesidad de construir vasos de almacenamiento adicionales que permitirían especular en la factibilidad de abrir aproximadamente un 30-40 más de área de segundos cultivos. Todo lo anterior se haría en función del análisis de una cantidad de información tal que permita llevar a cabo esto sin limitaciones, pues hay posibilidades de duplicar la actividad económica del área.

CONCLUSIONES

1. El período propicio para estimular lluvias es de julio a octubre, dado que es cuando cae el 70-80% de la precipitación; pero si se presentan nubes, puede hacerse también en diciembre y enero, o programa de invierno.
2. En el período de estimulación, la lluvia promedio fue el 67% de la correspondiente a la histórica, mientras que la aportación a la presa fue el 87% de la histórica.
3. La precipitación promedio de las cinco estaciones situadas fuera de la cuenca está correlacionada al 72% con la aportación al almacenamiento.
4. De acuerdo con la información disponible, no existen evidencias de que la variable aportación no se distribuya normalmente. Esto pudo aceptarse *a priori* en virtud del teorema central del límite.

5. Se obtuvo una ecuación de regresión para cada uno de los dos períodos (Histórico y Programa) que fueron, respectivamente: $A_H = 609.4818 + 0.7958 (P_H - 200)$ y $A_P = 683.499 + 2.4233 (P_P - 200)$, donde: A_H = Aportaciones en período histórico, A_P = Aportaciones en período del programa, P_H = Precipitación en período histórico, P_P = Precipitación en período del programa.
6. Se mostró que el coeficiente de regresión es mayor (con 1% p((E|I)) en el período del programa, lo que indica que a partir de 200 mm de lluvia, la aportación al vaso de la presa es mayor durante el período del programa, y que al llegar a 600 mm, la aportación prácticamente se duplicaría.
7. Al funcionar la estimulación de lluvias, en el 61% de los años, puede llenarse la presa. Por tanto, puede especularse en la necesidad de construir nuevos vasos para almacenar el agua remanente y consecuentemente en la posibilidad de abrir un 30-40% más de área de siembra de segundos cultivos, con lo cual prácticamente se duplicaría la actividad económica del área.

LITERATURA CITADA

1. Anaya G.M. 1980. *Estrategias para prevenir la desertificación. Conferencia sobre recursos naturales*. Cocoyoc, Morelos, México.
2. Carrillo L.A. y Casas D.E. 1974. *Predicción de lluvia y su aplicación en la agricultura*. Chapingo, Méx. Colegio de Postgraduados, CEC-ENA. p. 127.
3. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990. *Sonora. Cuaderno de información para la planeación*. Aguascalientes, Ags. México.
4. Moreno R.O.H. 1981. Análisis de la relación entre la precipitación pluvial en el Valle del Mayo y las aportaciones a la presa Adolfo Ruíz Cortines. *MAS Actualidades Políticas*. (México) 8 (31):27-47.