

mensual en la estación La Piedad, del estado de Tamaulipas.

1.3 PRUEBAS BASICAS DE HOMOGENEIDAD

Para probar la homogeneidad de los datos de la Tabla 1, primeramente se aplicaron las pruebas de Helmert (Mather, 1977) y de las secuencias (Doorenbos, 1976) a los 38 valores de lluvia anual. Los cálculos correspondientes a dichas pruebas se tienen en las dos últimas columnas de la Tabla 1, de donde se deduce para el test de Helmert que $s=23$ y $c=14$, y como la diferencia entre tales cantidades no debe de exceder de $\sqrt{n-1} \approx 6$ se concluye que el registro es inhomogéneo. Para la prueba de las secuencias se obtuvo $u=15$, y como los límites permisibles de acuerdo al número de datos son $16 < u < 23$ se dictamina que el registro es inhomogéneo.

A partir de los resultados se deduce que la inconsistencia se puede deber a una tendencia o cambio en la media, ya que el número de secuencias es mayor que el número de cambios en el test de Helmert y la cantidad de secuencias está muy próxima a su límite inferior en el segundo test. La mecánica operativa de ambas pruebas se puede consultar en Campos (1987).

1.4 CAUSAS DE INCONSISTENCIA

Al revisar la historia de la estación La Piedad, se encontró que ésta sufrió un cambio de emplazamiento, al inicio del año 1974, sin embargo dicho traslado no involucró grandes distancias y por ello no se consideró que tal cambio haya afectado su comportamiento. En el inciso siguiente se estudiará con detalle tal inconsistencia.

2. ANALISIS DE LA PRECIPITACION ANUAL

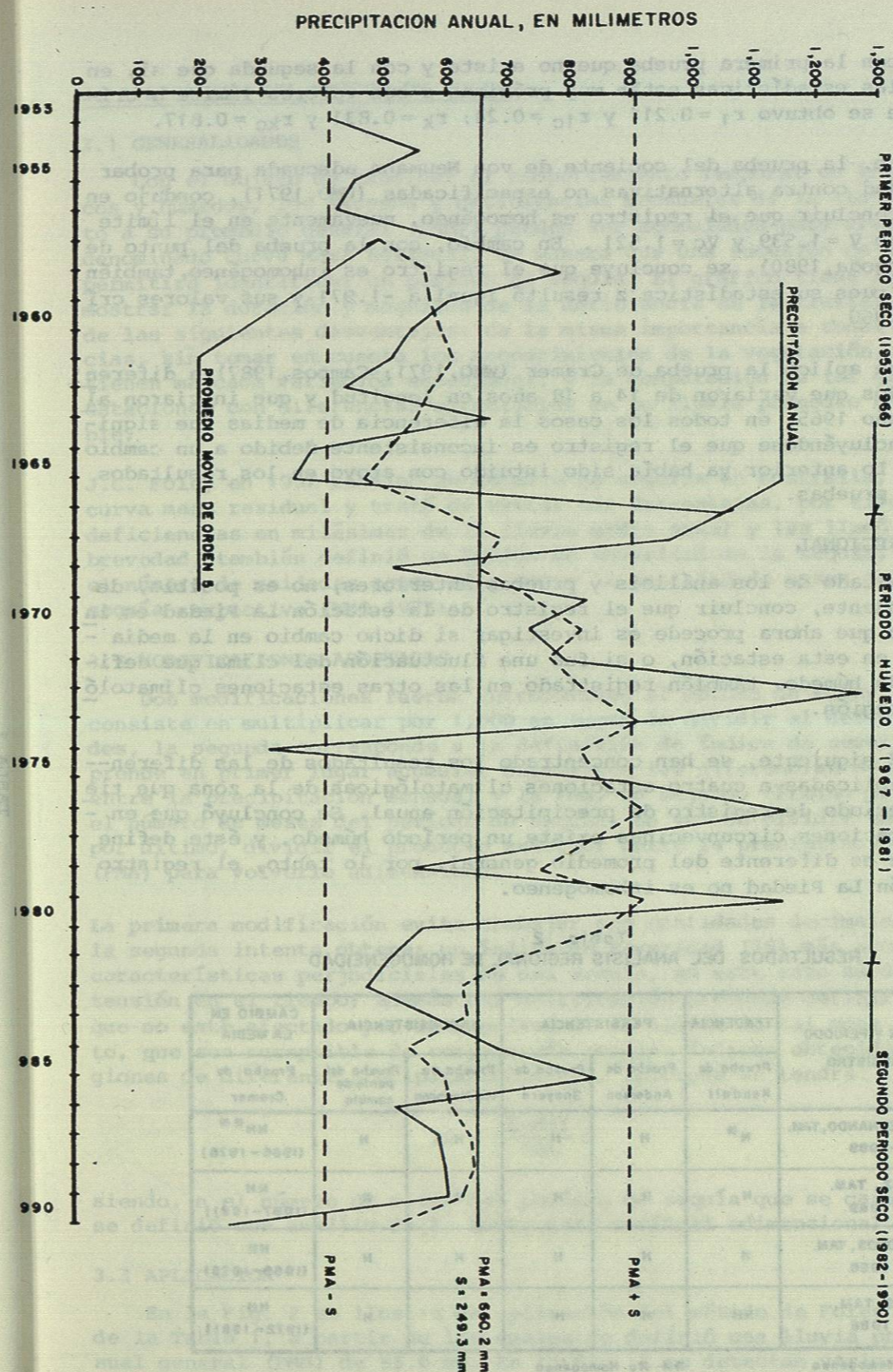
2.1 TECNICA DE PROMEDIOS MOVILES

Este análisis básicamente gráfico, permite visualizar el comportamiento de la precipitación anual en cuanto a tendencia, persistencia, fluctuaciones cíclicas o cambios en la media. En el caso que se analiza (Fig. 1), se dedujo un aumento sustancial en el período 1966-1979, por ello su media se confrontó con la de todo el registro, en la prueba de Cramer (WMO, 1971).

Por su parte, el estudio a través de la técnica de promedios móviles de orden 5, permite suavizar el comportamiento de la serie para definir los períodos secos y húmedos; los primeros son aquéllos en que la curva de promedios está por debajo de la media general, y los húmedos cuando se ubica por arriba. Conviene notar que el promedio móvil de la precipitación anual se recomienda dibujarlo al final del intervalo considerado, en este caso 5 años. En la Fig. 1 se han definido dos períodos secos y uno húmedo.

2.2 PRUEBAS ESPECIFICAS DE HOMOGENEIDAD

Para buscar la presencia de tendencia en el registro se aplicó la prueba de Kendall (Kottegoda, 1980), obteniéndose que no existe tal componente determinística, pues el valor de la estadística τ resultó de +0.893 y sus límites críticos al 95% de confiabilidad son de ± 1.960 . También se aplicaron las pruebas de Anderson al coeficiente de correlación serial de orden 1 (Linsley et al., 1977) y de Sneyers (WMO, 1971) para probar persistencia, en-



contrándose con la primera prueba que no existe y con la segunda que sí, en ambos casos las estadísticas están muy próximas a sus valores límite o críticos, ya que se obtuvo $r_1 = 0.211$ y $r_{1c} = 0.24$; $r_k = 0.831$ y $r_{kc} = 0.817$.

Por otra parte, la prueba del cociente de von Neumann adecuada para probar la aleatoriedad contra alternativas no especificadas (WMO, 1971), condujo en este caso a concluir que el registro es homogéneo, nuevamente en el límite pues se obtuvo $V = 1.539$ y $V_c = 1.521$. En cambio, con la prueba del punto de cambio (Kottegoda, 1980), se concluye que el registro es inhomogéneo, también en el límite pues su estadística z resultó igual a -1.971 y sus valores críticos son ± 1.960 .

Por último, se aplicó la prueba de Cramer (WMO, 1971; Campos, 1987) a diferentes subperíodos que variaron de 14 a 18 años en longitud y que iniciaron alrededor del año 1965, en todos los casos la diferencia de medias fue significativa, concluyéndose que el registro es inconsistente debido a un cambio en la media. Lo anterior ya había sido intuido con apoyo en los resultados de las otras pruebas.

2.3 ESTUDIO REGIONAL

Como resultado de los análisis y pruebas anteriores, no es posible, de manera contundente, concluir que el registro de la estación La Piedad es inhomogéneo, lo que ahora procede es investigar si dicho cambio en la media sólo ocurrió en esta estación, o si fue una fluctuación del clima que definió un período húmedo, también registrado en las otras estaciones climatológicas de la región.

En la Tabla 2 siguiente, se han concentrado los resultados de las diferentes pruebas aplicadas a cuatro estaciones climatológicas de la zona que tienen amplio período de registro de precipitación anual. Se concluyó que en todas las estaciones circunvecinas existe un período húmedo, y éste define una media que es diferente del promedio general, por lo tanto, el registro de la estación La Piedad no es inhomogéneo.

Tabla 2
RESULTADOS DEL ANALISIS REGIONAL DE HOMOGENEIDAD

ESTACION Y PERIODO DE REGISTRO	TENDENCIA	PERSISTENCIA			INCONSISTENCIA		CAMBIO EN LA MEDIA
	Prueba de Kendall	Prueba de Anderson	Prueba de Sneyers	Prueba de Van Neumann	Prueba del punto de cambio	Prueba de Cramer	
SAN FERNANDO, TAM. 1932 - 1989	H*	H	H	H	H	NH** (1966-1976)	
MENDEZ, TAM. 1941 - 1989	H	H	H	H	H	NH (1967-1981)	
MATAMOROS, TAM. 1959 - 1988	H	H	H	H	H	NH (1969-1978)	
REYNOS, TAM. 1953 - 1988	NH	H	H	H	H	NH (1972-1981)	

* Homogénea

** No Homogénea

3. APLICACION DEL METODO DE FOLEY

3.1 GENERALIDADES

Con el objeto de examinar el comportamiento temporal de los períodos secos y húmedos, los excesos y deficiencias mensuales de la lluvia con respecto a su promedio general (PMM), pueden ser acumulados para crear un gráfico denominado Curva Masa Residual, de manera que una sucesión de deficiencias, permitirá identificar un período de sequía. El gráfico tiene la ventaja de mostrar la duración y magnitud de la deficiencia de la lluvia, pero adolece de las siguientes desventajas: da la misma importancia a todas las deficiencias, sin tomar en cuenta los requerimientos de la vegetación, los cuales tienen marcada variación estacional, y la comparación de tal gráfica entre estaciones con diferencias apreciables en su lluvia promedio no es confiable.

J.C. Foley en 1957 realizó un estudio de sequías en Australia, utilizó la curva masa residual y trató de evitar sus desventajas, por ello expresó las deficiencias en milésimas de la lluvia media anual y les llamó unidades por brevedad, también definió un índice de severidad de la sequía, al dividir el número de unidades acumuladas entre la cantidad de meses del período de sequía respectivo (WMO, 1975).

3.2 MODIFICACIONES ADOPTADAS

Dos modificaciones fueron introducidas al método de Foley, la primera consiste en multiplicar por 1,000 en lugar de dividir al definir las unidades, la segunda corresponde a la definición de índice de severidad y comprende en primer lugar acumular únicamente las diferencias negativas ($\Sigma\text{-dif}$) entre la precipitación mensual y la PMM, en segundo término multiplicar por el número de meses del período de sequía, en vez de dividir entre éste, y por último, dividir el producto anterior entre la precipitación media anual (PMA) para volverlo adimensional.

La primera modificación evita trabajar con cantidades decimales, en cambio la segunda intenta obtener un índice de severidad (IS) más acorde con las características perjudiciales de una sequía, en este caso su duración o extensión en el tiempo; además tal modificación pretende definir un índice que no esté afectado por la magnitud de la lluvia de tal zona y por lo tanto, que sea susceptible de comparación con los índices obtenidos en otras regiones de diferente precipitación media. Entonces se tendrá:

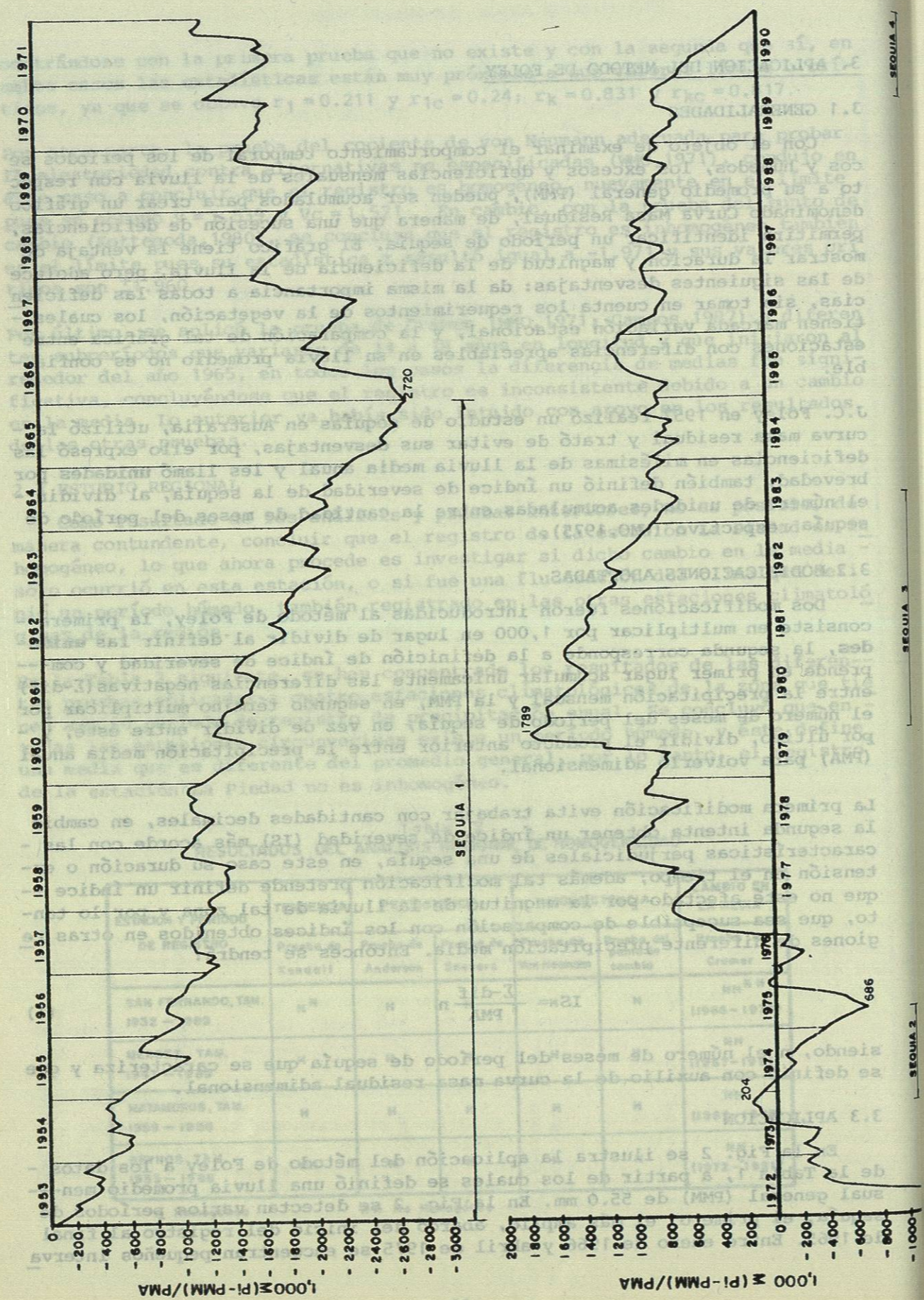
$$IS = \frac{\Sigma\text{-dif}}{PMA} n \quad (1)$$

siendo, n el número de meses del período de sequía que se caracteriza y que se definió con auxilio de la curva masa residual adimensional.

3.3 APLICACION

En la Fig. 2 se ilustra la aplicación del método de Foley a los datos de la Tabla 1, a partir de los cuales se definió una lluvia promedio mensual general (PMM) de 55.0 mm. En la Fig. 2 se detectan varios períodos de sequía, el primero, el más amplio, abarcó del inicio del registro al final de 1965. Entre enero de 1966 y abril de 1975 se encuentran pequeños intervalos

Fig. 2 CURVA MASA RESIDUAL ADIMENSIONAL EN LA ESTACION CLIMATOLOGICA : LA PIEDAD, TAM.



los con sequía, el último de ellos inició en noviembre de 1973. De octubre de 1979 a mayo de 1983 se detecta otro período, el último del registro comienza en septiembre de 1989. Los índices de severidad correspondientes a los períodos citados resultaron ser:

$$IS_1 = \frac{4,165.4}{660.2} (199) \doteq 984$$

$$IS_2 = \frac{632.8}{660.2} (18) \doteq 17$$

$$IS_3 = \frac{1,065.6}{660.2} (43) \doteq 69$$

$$IS_4 = \frac{532.5}{660.2} (16) \doteq 13$$

4. ANALISIS PROBABILISTICO

4.1 DISTRIBUCION DE PROBABILIDADES GAMMA MIXTA

El modelo de función de densidad de probabilidad f(x) generado por Karl Pearson como tipo III es conocida como función gamma, tiene tres parámetros: el de forma (γ), el de escala (β) y el de localización (ξ). Cuando su frontera izquierda se ubica en ξ=0, caso común en las variables climáticas e hidrológicas, se obtiene la f(x) de dos parámetros, cuya probabilidad F(x) de que la variable aleatoria X, precipitación acumulada en uno o más meses, sea menor o igual que una cantidad dada x, se puede evaluar por medio de algoritmos computacionales como los descritos por Thom(1971), Kite(1977), Haan (1977) y Campos(1988a,1990). Por otra parte, la función de distribución de probabilidades gamma mixta definida por Thom(1971), es la siguiente:

$$H(x) = q + p \cdot F(x) \quad (2)$$

en la cual, q es la probabilidad de tener valores nulos (ceros) en la serie que se analiza y p=1-q, de manera que cuando x=0, H(0)=q; si el registro no tiene ceros, q=0, p=1 y por lo tanto: H(x) = F(x).

4.2 ANALISIS DE LA SERIE ANUAL

En primer lugar se definirán los **deciles** y su uso para clasificar las magnitudes de lluvia de acuerdo a su desviación de la media. El primer decil es la cantidad de lluvia cuya probabilidad de no excedencia P(X=x) es el 10%, es decir, se tiene un 90% de probabilidad de que sea excedida. El segundo decil es la cantidad de lluvia que tiene P(X=x)=0.20 y P(X>x)=0.80. El quinto decil o mediana corresponde a la lluvia que tiene un 50% de probabilidad de ser o no excedida. El rango de un decil es el intervalo de valores entre deciles, de manera que el rango del octavo decil está entre los deciles 7 y 8. La tabulación siguiente es útil para clasificar la ocurrencia de la lluvia (WMO,1975):

Rango decil 1	$P(X \leq x) \leq 10\%$	muy por debajo de lo normal
Rango decil 2	$10\% < P(X \leq x) \leq 20\%$	bastante abajo de lo normal
Rango decil 3	$20\% < P(X \leq x) \leq 30\%$	abajo de lo normal
Rango decil 4	$30\% < P(X \leq x) \leq 40\%$	sensiblemente abajo de lo normal
Rango decil 5 y 6	$40\% < P(X \leq x) \leq 60\%$	normal
Rango decil 7	$60\% < P(X \leq x) \leq 70\%$	sensiblemente arriba de lo normal
Rango decil 8	$70\% < P(X \leq x) \leq 80\%$	arriba de lo normal
Rango decil 9	$80\% < P(X \leq x) \leq 90\%$	bastante arriba de lo normal
Rango decil 10	$P(X \leq x) > 90\%$	muy por arriba de lo normal