

6. Modelo Kd-Kt diario

6.1 Cálculo de la radiación diaria

Como hemos visto en el apartado 4.2 el sistema de adquisición de datos almacena medidas de irradiancia cada 5 segundos y además, la irradiación desde el instante de salida del sol hasta cualquier otro del día. De esta forma, el último valor de irradiación acumulada al final del día sería el valor de la irradiación diaria de cada una de las variables. Estos valores no van a ser utilizados, ya que no son del todo fiables. Cada vez que aparece un hueco en la base de datos como los descritos en el apartado 5.1 el sistema de adquisición de datos comienza a contabilizar la acumulada empezando de nuevo desde cero. De modo que para aquellos días en los que aparece este tipo de problema, el valor acumulado durante el día sería menor que el real, tanto menor cuanto más tarde aparezca el hueco. A continuación, se muestra una imagen de uno de los archivos en los que aparece este tipo de fallo:

	0	10	20	30	40	50	60	70	
1145 06:50:00	56	141	173	310	88	191	496	1103	06:22
1146 06:50:05	56	141	173	311	88	192	497	1106	06:22
1147 06:50:11	56	142	173	312	88	192	497	1109	06:22
1148 06:50:16	56	142	174	313	88	193	497	1112	06:22
1149 06:59:57	63	0	213	0	89	0	547	0	06:32
1150 07:00:06	63	1	213	2	89	1	547	6	06:32
1151 07:00:12	64	1	213	3	89	1	548	9	06:32
1152 07:00:17	64	1	214	4	89	2	548	11	06:32
1153 07:00:22	64	2	214	6	89	2	548	15	06:32
1154 07:00:28	64	2	214	7	89	3	548	18	06:32
1155 07:00:33	64	2	215	8	89	3	549	20	06:32
1156 07:00:38	64	3	215	9	89	4	550	24	06:32
1157 07:00:44	64	3	215	10	89	4	550	26	06:32
1158 07:00:49	64	3	215	12	89	5	550	30	06:32
1159 07:00:55	64	4	216	13	89	5	550	32	06:33

Figura 6.1. Archivo de radiación registrado el día 218 del 2001.

Por este motivo se ha decidido calcular la irradiación diaria mediante la integración de los valores instantáneos recogidos en los ficheros cada 5 segundos. Para ello, se ha desarrollado un programa que genera a partir de todos los ficheros “arad” de un año un listado con la acumulada diaria calculada utilizando el método de los trapecios para cada una de las variables radiométricas con la siguiente estructura:

	Año	día	Hg (Wh/m2)	Hdif (Wh/m2)	HrD (Wh/m2)	H37 (Wh/m2)
1	2001	1	653.27	650.61	549.87	7.93
2	2001	2	2616.22	815.86	4282.51	3969.06
3	2001	3	1741.60	1236.44	2192.12	914.15
4	2001	4	1082.15	1021.85	1162.07	292.63
5	2001	5	598.52	608.48	481.61	0.81
6	2001	6	2655.95	1030.21	4179.52	3623.15
7	2001	7	3252.90	525.45	5706.13	6914.93
8	2001	8	3216.90	467.82	5700.44	6971.22
9	2001	9	247.93	255.47	200.59	3.69
10	2001	10	1011.05	843.41	1047.02	262.08
11	2001	11	1464.37	751.58	2099.30	1491.23
12	2001	12	1184.93	921.74	1428.68	732.50
13	2001	13	3050.30	409.80	5233.90	6310.14
14	2001	14	956.51	972.22	795.20	15.08
15	2001	15	1350.67	991.51	1698.25	973.02
16	2001	16	1051.05	1032.45	940.65	55.46
17	2001	17	2475.69	843.38	3681.36	3346.65
18	2001	18	1252.34	969.03	1636.67	890.78

Figura 6.2. Imagen del archivo acu2001.dat.

En estos archivos, Hg representa la irradiación diaria global sobre superficie horizontal, Hdif la irradiación diaria difusa sobre superficie horizontal, HrD la irradiación diaria directa normal sobre superficie horizontal y H37 la irradiación diaria global sobre superficie inclinada 37°.

Los archivos “acuyyy.dat” para el período de estudio, donde los cuatro dígitos designados por la letra “y” representan el año al que pertenecen los datos, se encuentran en el CD adjunto.

6.2 Obtención del modelo

Una vez hallado el valor de la irradiación diaria para todos los días válidos del período, calculamos para cada uno de ellos los coeficientes Kt y Kd definidos en el apartado 3.2.1.:

$$K_t = \frac{H_{gh}^d}{H_{oh}^d} \quad [6.1]$$

$$K_d = \frac{H_{dfh}^d}{H_{gh}^d} \quad [6.2]$$

Para el cálculo del coeficiente Kt necesitamos primero conocer la irradiación extraterrestre diaria que alcanza la atmósfera proyectada sobre una superficie horizontal utilizando la expresión 3.30 del apartado 3.17. Los valores de la irradiación diaria global sobre superficie horizontal fueron obtenidos en el apartado anterior.

El cálculo del coeficiente Kd lo haremos de dos formas diferentes, para poder comparar los resultados y detectar algún posible fallo que haya pasado desapercibido al aplicar los filtros. La primera forma será utilizando directamente el valor de la irradiación difusa diaria sobre superficie horizontal que obtuvimos en el apartado anterior, y la segunda,

calculando los valores de difusa a partir de los de irradiación directa normal mediante la siguiente expresión:

$$K_{dD} = \frac{H_{gh}^d - H_D^d \cdot \cos(\theta_z)}{H_{gh}^d} \quad [6.3]$$

Como el valor de la altura solar varía a lo largo del día, no podemos aplicar esta fórmula directamente a los valores de directa normal diarios. Así que se calculará para cada valor de irradiancia directa normal almacenado cada 5 segundos su altura solar correspondiente y a partir de estas dos variables generaremos una nueva columna de valores instantáneos de irradiación directa horizontal. Integrando estos valores como hicimos en el apartado anterior con el resto de las variables, hallamos la irradiación directa diaria sobre superficie horizontal que será el que restaremos a H_{gd} en la expresión 6.3. El coeficiente que obtendremos aplicando este procedimiento lo denominaremos KdD para diferenciarlo del Kd donde aplicamos directamente la irradiación difusa registrada.

Una vez calculados los coeficientes para cada uno de los días del período de estudio, representamos los puntos Kd-Kt y los KdD-Kt:

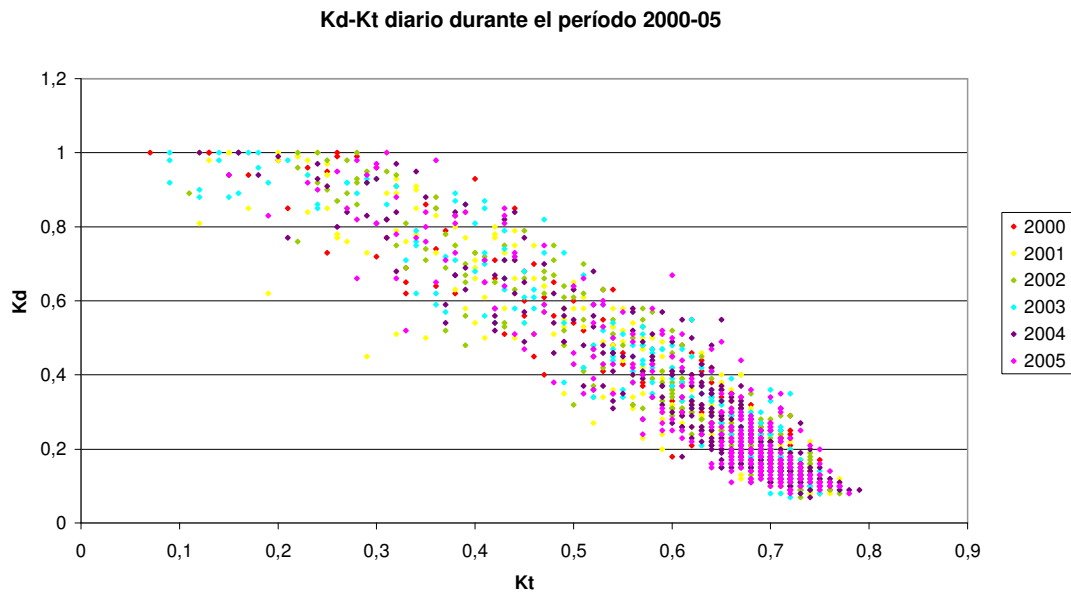


Figura 6.3 Representación de los valores Kd-Kt diarios obtenidos durante el período 2000-05.

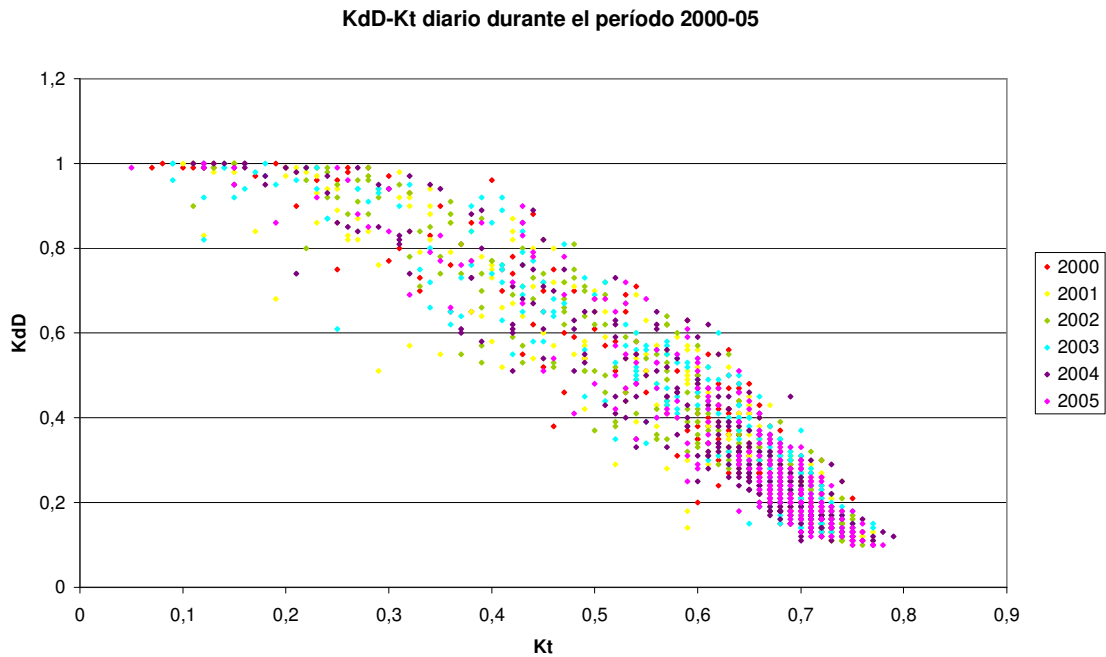


Figura 6.4 Representación de los valores KdD-Kt diarios obtenidos durante el período 2000-05.

Podemos observar que ambas figuras son muy parecidas, lo que nos hace pensar que el control de calidad de los datos ha sido el adecuado. Las pequeñas diferencias se pueden achacar a los errores que han podido introducir los aparatos de medida, a que para un mismo día los valores de difusa han sido descartados y los de directa no, o que los márgenes de error en los filtros no han sido lo suficientemente restrictivos. Aún así, consideramos como bastante satisfactorio el resultado para la obtención de dos nuevos modelos Kd-Kt y KdD-Kt.

Para aproximar los puntos representados en las figuras por un modelo matemático, emplearemos varios tipos de ajustes. En primer lugar, probaremos con un ajuste lineal de la nube de puntos, en segundo lugar con ajustes polinómicos de tercer y cuarto orden, y por último hallaremos otro modelo a partir de los valores medianos. Todos ellos serán evaluados mediante un coeficiente para conocer cuál de ellos es el óptimo.

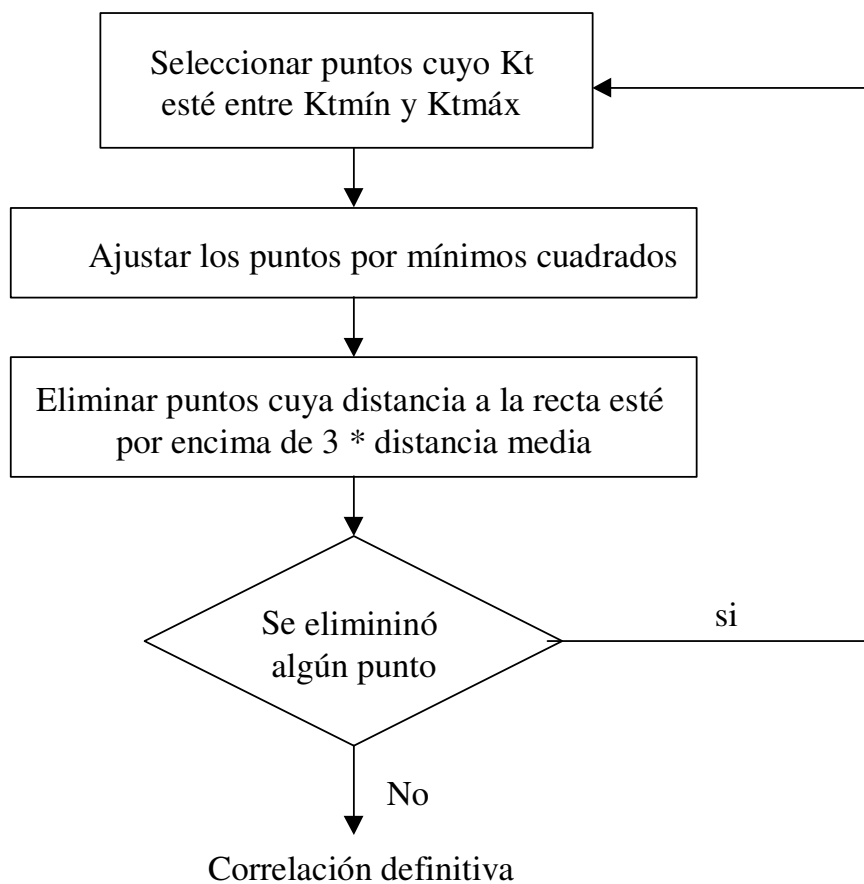
- **Ajuste lineal:**

Se aproximará la nube de puntos representada en las figuras 6.3 y 6.4 por un modelo lineal formado por 3 intervalos, dos intervalos donde el valor de Kd se considerara constante, y otro donde se ajustará el resto de valores con una recta de pendiente negativa. Para saber el valor de Kt que delimita el comienzo y el fin de uno y otro intervalo, seguiremos el siguiente procedimiento:

1. Calculamos la recta realizando un ajuste en el sentido de los mínimos cuadrados con todos los puntos representados en la figura.
2. Comprobamos si el valor de Kd, al sustituir en la ecuación de la recta obtenida el menor Kt de la nube de puntos, es mayor que 1. Si es así, pasamos al siguiente punto, si no, ya hemos encontrado el valor de Kt antes del cual los puntos serán

- aproximados por una recta horizontal de valor el Kd calculado y pasamos al punto 4.
3. Si el valor de Kd ha sido mayor que 1 probaremos a hacer un nuevo ajuste con los puntos que tengan un Kt mayor que el menor de los incluidos en el paso anterior. Y volvemos al punto 2°.
 4. Para obtener el segundo tramo horizontal comprobamos si al sustituir el valor del mayor Kt de la nube de puntos en la ecuación de la recta se alcanza un Kd menor que el mínimo que ha sido representado en los puntos. Si esto es así, debemos recalcular la ecuación excluyendo del ajuste todos los puntos cuyos Kt sean mayores o iguales que último Kt incluido, e ir de nuevo al punto 2. Si no, el último Kt incluido en el ajuste de la recta será el límite del tramo horizontal de valor su Kd correspondiente y hemos completado el modelo.

Para el ajuste de la recta de pendiente negativa, se ha utilizado el mismo procedimiento empleado en el último modelo diario desarrollado por la ETSI, para poder comparar los resultados sin que esto influya. A continuación, presentamos un diagrama de flujo que explica los pasos seguidos a la hora de obtener la correlación:



Una vez aplicado el procedimiento a los datos y conocida la correlación definitiva, representaremos el conjunto de puntos que se han utilizado para el ajuste final de la recta con pendiente decreciente calculados a partir de la radiación difusa:

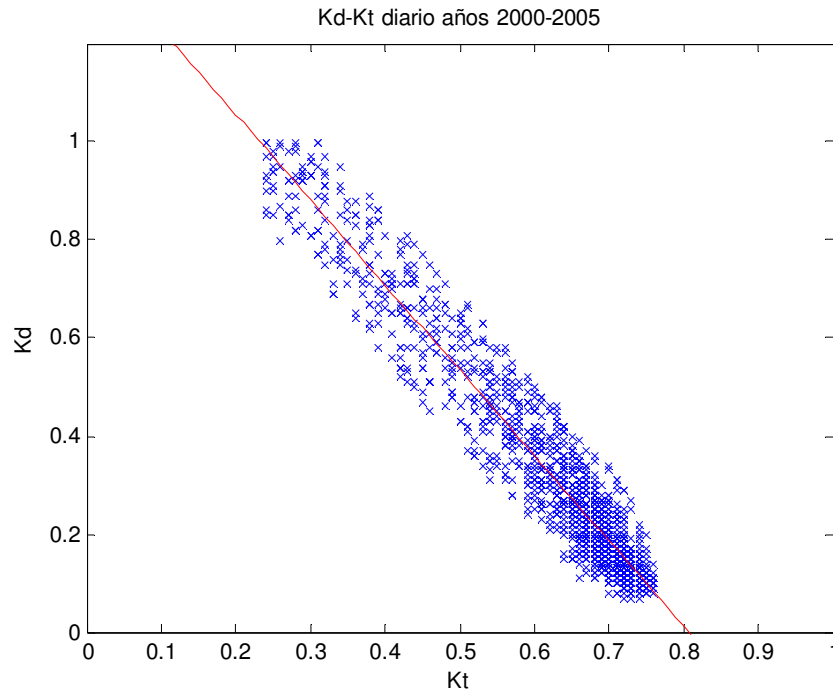


Figura 6.5 Representación de los valores Kd-Kt diarios empleados en el ajuste de la recta definitiva de pendiente negativa.

La recta representada en la figura es aquella en la que converge el procedimiento empleado que tiene la siguiente expresión:

$$K_d = 1.403973 - 1.739671 \cdot K_t \quad [6.4]$$

Sustituyendo los puntos representados en la figura 6.5 en la ecuación de la hallamos los siguientes extremos:

$$\begin{array}{ll} K_{t_{\max.}} = 0.76 & K_{d_{\min.}} = 0.081822 \\ K_{t_{\min.}} = 0.24 & K_{d_{\max.}} = 0.986452 \end{array}$$

Modelo obtenido con los datos de radiación difusa:

$$\begin{array}{lll} K_d = 0.986 & \text{si} & K_t \leq 0.23 \\ K_d = 1.403973 - 1.739671 \cdot k_t & \text{si} & 0.23 < K_t < 0.77 \\ K_d = 0.082 & \text{si} & K_t \geq 0.77 \end{array}$$

[6.5]

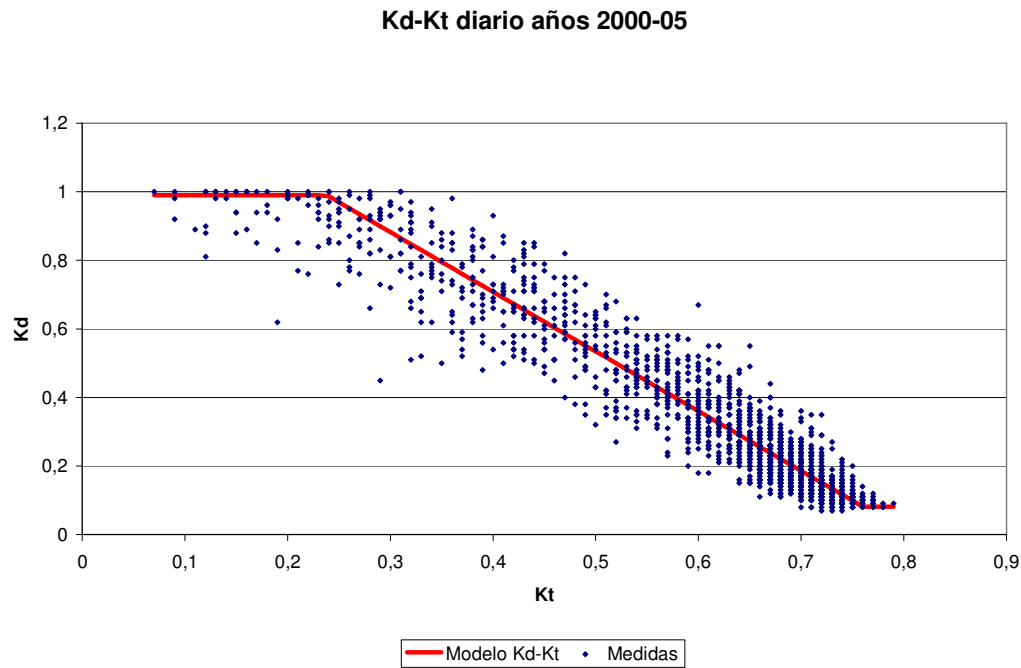


Figura 6.6 Representación de los valores Kd-Kt diarios del período 2000-05 con el modelo lineal obtenido a partir de ellos.

Para los puntos KdD-Kt representados en la figura 6.4 y siguiendo el mismo procedimiento que en el caso anterior hallamos el siguiente modelo:

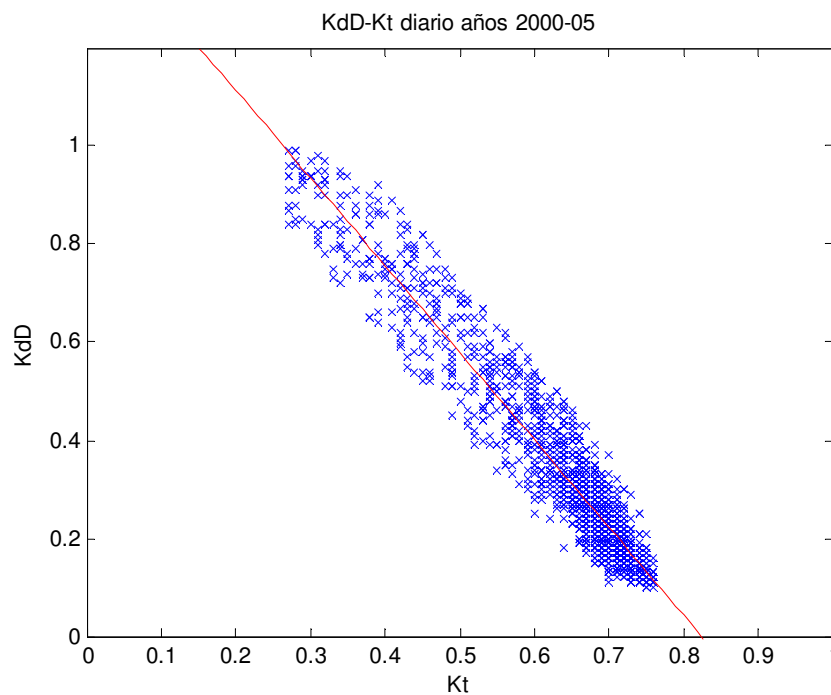


Figura 6.7 Representación de los valores KdD-Kt diarios empleados en el ajuste de la recta definitiva.

Ecuación de la recta representada en la figura 5:

$$KdD = 1.470991 - 1.784447 \cdot Kt \quad [6.6]$$

Sustituyendo los puntos representados en la figura 6.7 en la ecuación de la recta hallamos los siguientes extremos:

$$\begin{array}{ll} Kt_{\text{máx.}} = 0.76 & Kd_{\text{mín.}} = 0.114811 \\ Kt_{\text{mín.}} = 0.27 & Kd_{\text{máx.}} = 0.989190 \end{array}$$

Modelo obtenido con los datos de radiación directa:

$$\begin{array}{lll} KdD = 0.99 & \text{si} & Kt \leq 0.26 \\ KdD = 1.470991 - 1.784447 \cdot Kt & \text{si} & 0.26 < Kt < 0.77 \\ KdD = 0.11 & \text{si} & Kt \geq 0.77 \end{array}$$

[6.5]

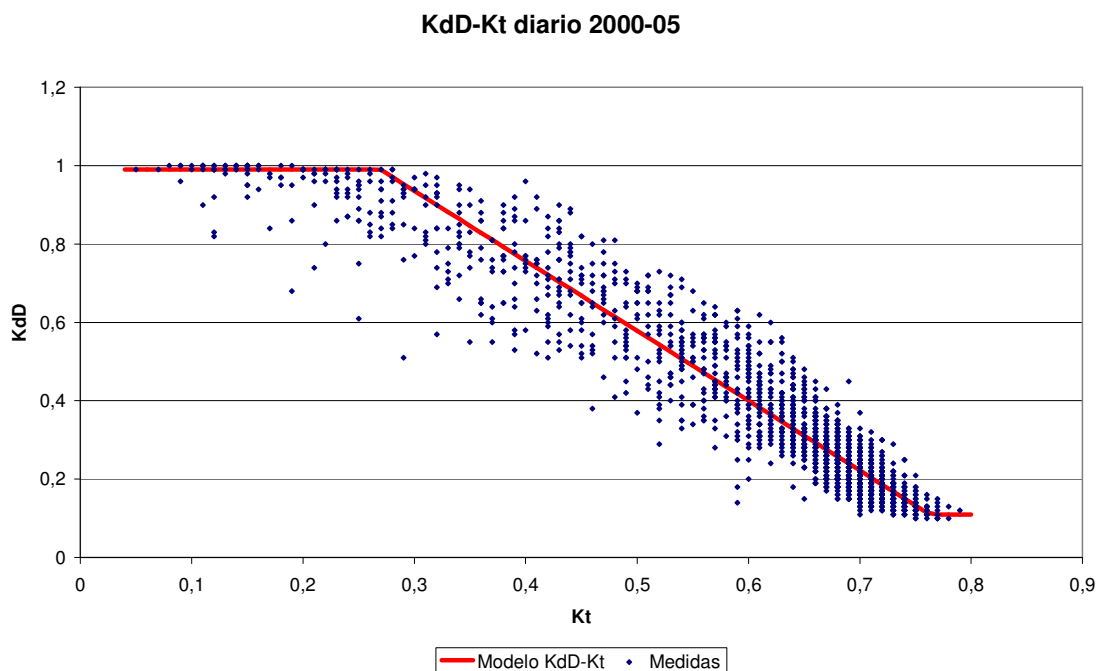


Figura 6.8 Representación de los valores KdD-Kt diarios del período 2000-05 con el modelo lineal obtenido a partir de ellos.

Una vez hecho el ajuste representamos ambos modelos juntos sobre los puntos de partida para poder comparar los resultados:

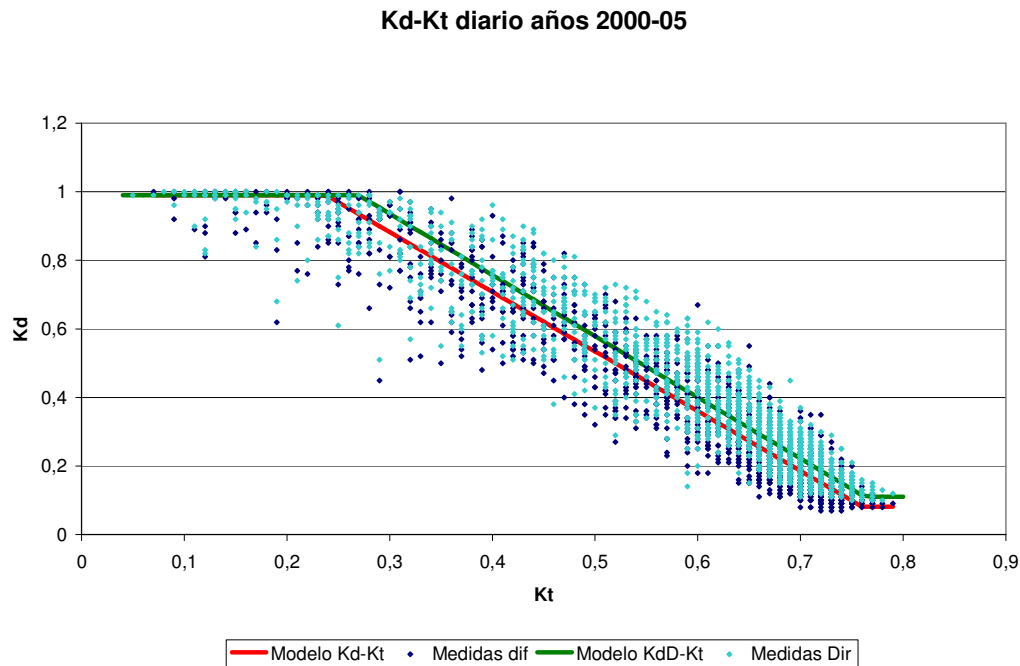


Figura 6.9 Representación de los valores Kd-Kt y KdD-Kt diarios del período 2000-05 con sus respectivos modelos.

Puede verse con toda claridad en la figura 6.9 que tanto la nube de puntos como el modelo obtenido con la radiación directa es prácticamente igual que el obtenido con la difusa, pero ligeramente desplazado hacia arriba. Esto quiere decir, que los valores de radiación difusa calculados con la directa son un poco mayores que los que directamente medimos con el piranómetro con banda de sombra. Esto podría deberse a que los aparatos de medida no estén bien calibrados. Aunque también podría ocurrir que el tipo de sistema elegido para dar sombra al piranómetro no sea el adecuado, y como consecuencia, el piranómetro mida menos difusa de la que realmente hay ya que la banda de sombra impide que parte de la radiación difusa procedente de la bóveda celeste no llegue a éste. Aun así, resulta más fiable el modelo desarrollado directamente a partir de los valores de radiación difusa, ya que introducen menos error por dos motivos, en primer lugar, no se necesitan cálculos intermedios de ninguna variable como ocurre al usar los de directa, y en segundo lugar, porque a la hora de filtrar los datos es más fácil detectar que la banda de sombra no haya tapado del todo al piranómetro que el hecho de que el pirheliómetro se encuentre desalineado. Por estos motivos, nos quedaremos finalmente con el modelo desarrollado con los valores medidos de radiación difusa y en lo que sigue, sólo utilizaremos estos datos para obtener nuevos modelos.

Para saber que tipo de evolución ha seguido el modelo Kd-Kt lineal a lo largo de los años, hallaremos un modelo para cada uno de los años del período de estudio utilizando el mismo procedimiento. A continuación, representamos los resultados:

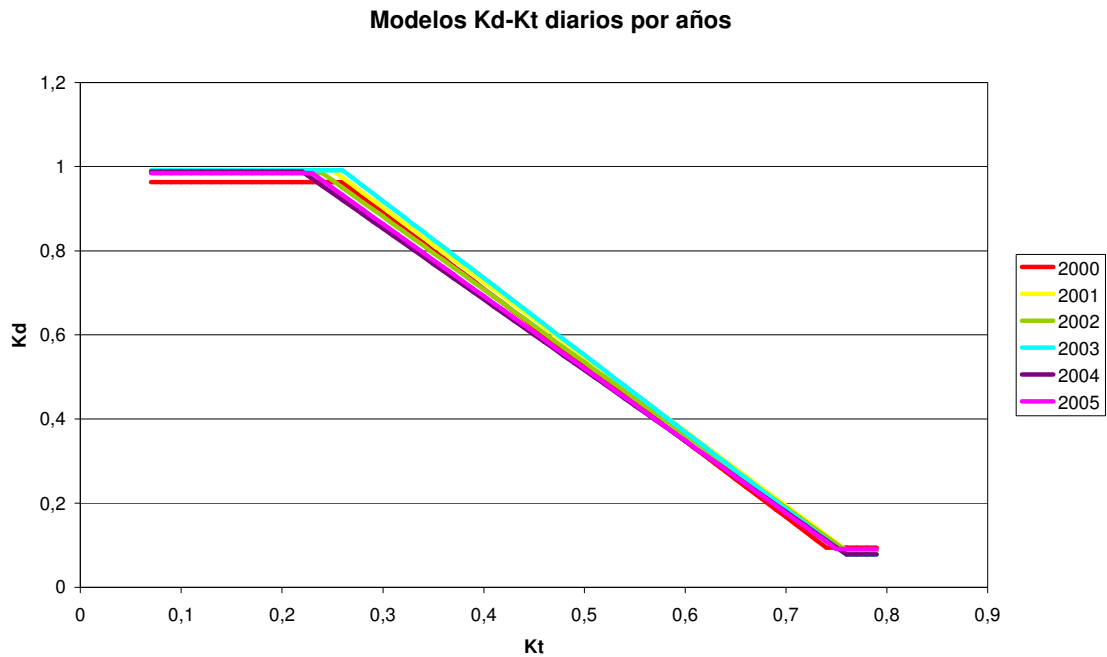


Figura 6.10 Modelos Kd-Kt anuales del período 2000-05.

Año 2000:

$K_d = 0.963$	si	$K_t \leq 0.25$
$K_d = 1.432952 - 1.808808 \cdot k_t$	si	$0.25 < K_t < 0.75$
$K_d = 0.094$	si	$K_t \geq 0.75$

Año 2001:

$K_d = 0.992$	si	$K_t \leq 0.24$
$K_d = 1.434728 - 1.772612 \cdot k_t$	si	$0.24 < K_t < 0.77$
$K_d = 0.088$	si	$K_t \geq 0.77$

Año 2002:

$K_d = 0.985$	si	$K_t \leq 0.22$
$K_d = 1.399615 - 1.728868 \cdot k_t$	si	$0.22 < K_t < 0.77$
$K_d = 0.086$	si	$K_t \geq 0.77$

Año 2003:

$K_d = 0.991$	si	$K_t \leq 0.23$
$K_d = 1.466578 - 1.828527 \cdot k_t$	si	$0.23 < K_t < 0.77$
$K_d = 0.077$	si	$K_t \geq 0.77$

Año 2004:

$K_d = 0.988$	si	$K_t \leq 0.21$
$K_d = 1.358060 - 1.683610 \cdot k_t$	si	$0.21 < K_t < 0.77$
$K_d = 0.079$	si	$K_t \geq 0.77$

Año 2005:

$K_d = 0.984$	si	$K_t \leq 0.22$
$K_d = 1.378815 - 1.716953 \cdot k_t$	si	$0.22 < K_t < 0.76$
$K_d = 0.091$	si	$K_t \geq 0.76$

Todos los modelos obtenidos son muy similares, sobre todo para valores de Kt cercanos a 0,8. Esto ocurre porque casi el 80% de los puntos para todos los años se registran entre los valores de Kt 0,5 y 0,8, y además en este tramo es donde se encuentran menos dispersos. Si comparamos las pendientes de las rectas, podemos observar que la de mayor pendiente en valor absoluto pertenece al año 2003, siendo la de menor pendiente la del año 2002. Por eso aparentemente no parece que la recta Kd-Kt tenga alguna tendencia con el paso de los años. Si comparamos además de las rectas, el número y la dispersión de los puntos con los que hemos obtenido los modelos, observaremos que el proceso de filtrado y el tipo de ajuste influyen demasiado en la tendencia de la recta como para sacar conclusiones de estas comparaciones.

Para poder comparar mejor la evolución de los modelos entre si, ajustaremos la recta de pendiente negativa de cada uno de los años, utilizado en todos los mismos límites de Kt. Estos límites serán los del modelo Kd-Kt que hallamos con todos los años conjuntamente [6.5]. De esta forma podremos comparar mejor las pendientes entre ellas y ver cómo se alejan respecto de la del modelo global sin que influya el procedimiento empleado:

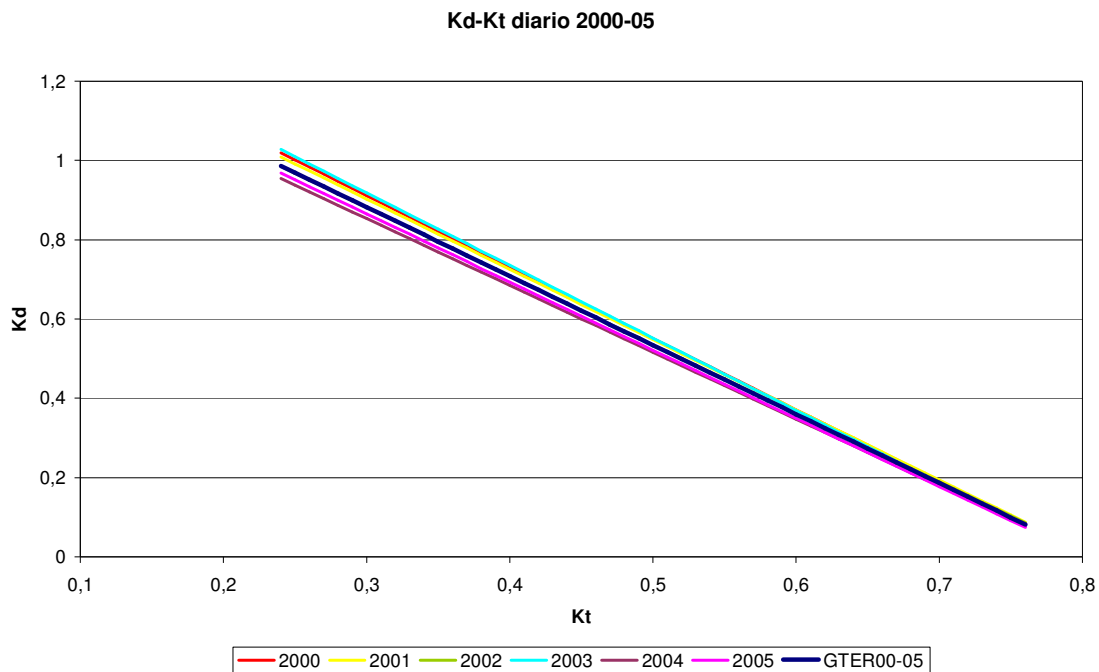


Figura 6.11 Representación de los modelos Kd-Kt anuales con el modelo Kd-Kt obtenido con los datos de todos los años.

Los años que menos se aproximan al modelo conjunto son los años 2003 y 2004 que lógicamente son los que tienen mayor y menor pendiente respectivamente. El año que más se parece es el 2002 que curiosamente no es el año que cuenta con mayor número de puntos. Para intentar justificar que dos años consecutivos sean los que más se alejan agruparemos en una tabla algunos datos que caracterizan a los modelos:

Años	a	b	Días válidos	Kt>0.4 (%)	Kt>0.6 (%)
2000	1.451139	-1.799611	201	88	32
2001	1.434237	-1.771871	318	85	37
2002	1.399813	-1.728868	279	87	38
2003	1.466578	-1.828527	294	87	34
2004	1.358060	-1.683610	318	89	29
2005	1.380885	-1.719202	317	91	26
2000-05	1.403973	-1.739671	1727	88	32

Tabla 6.8 Evolución anual de los modelos Kd-Kt diarios.

Para ver como influye la distribución de los puntos a lo largo del eje de abscisas, hemos incluido en la tabla el porcentaje de datos por encima de los valores $K_t=0.4$ y $K_t=0.6$ que tiene cada uno de los casos. El 2000 tiene exactamente los mismos porcentajes que todos los años juntos y, sin embargo, es la recta perteneciente al 2002 la que más se aproxima a la de todos los años. Tampoco encontramos ninguna relación entre el número de días válidos y el parecido entre las rectas. Quizás un estudio más exhaustivo por meses o incluso uno en el que intervengan variables meteorológicas pudiera encontrar una relación que a simple vista parece compleja.

- **Ajuste polinómico:**

A continuación, haremos un ajuste polinómico de tercer y cuarto orden para la nube de puntos que hemos obtenido con los valores de radiación difusa. En este caso impondremos la condición de que la polinomial pase por el punto $K_d=1$ y $K_t=0$.

El procedimiento a seguir para elegir los valores de K_t que limitan las distintas partes de los modelos es el mismo que para el modelo lineal. Representaremos ambos ajustes junto a los puntos de partida correspondientes para poder comparar los resultados:

Modelos polinómicos Kd-Kt del periodo 2000-05

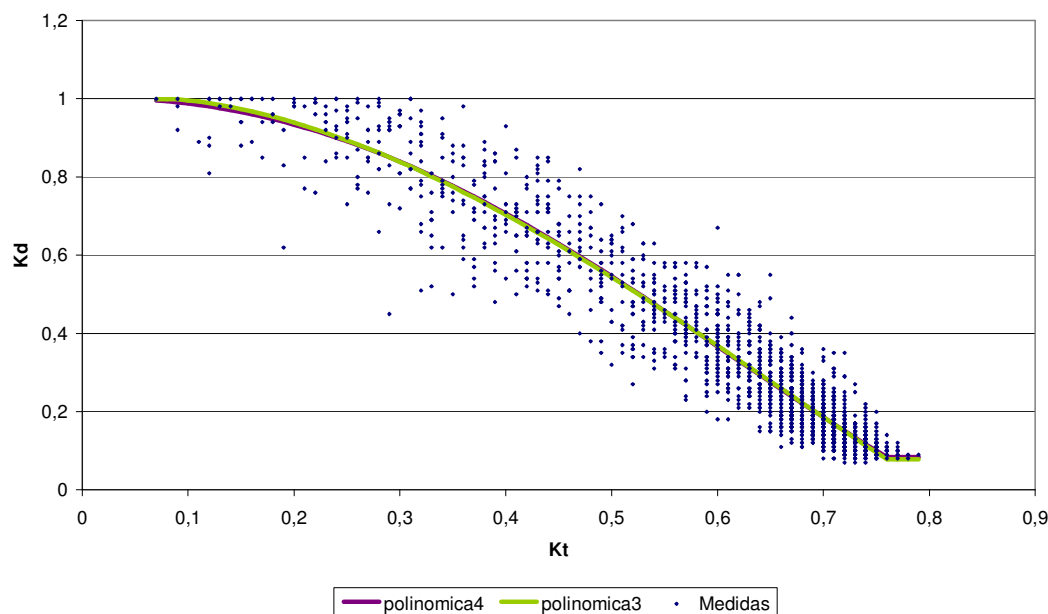


Figura 6.12 Representación de los modelos Kd-Kt polinómicos de 3º y 4º orden obtenidos a partir de los datos de radiación difusa del período 2000-05.

Modelo polinómico de tercer orden:

$$K_d = 1$$

$$K_d = 1 + 0.2564 K_t - 3.1159 K_t^2 + 1.5561 K_t^3$$

$$K_d = 0.078$$

si

$$K_t < 0.09$$

si

$$0.09 < K_t < 0.77$$

si

$$K_t \geq 0.77$$

[6.6]

Modelo polinómico de cuarto orden:

$$K_d = 1 + 0.0791 K_t - 1.9428 K_t^2 - 0.8292 K_t^3 + 1.5280 K_t^4$$

$$K_d = 0.084$$

si

$$K_t < 0.77$$

si

$$K_t \geq 0.77$$

[6.7]

Ambos modelos prácticamente se superponen y a simple vista es casi imposible distinguir cual se ajusta mejor a la nube de puntos.

Mediana:

Por último, calcularemos la mediana de los valores K_d registrados para cada centésima de valores de K_t y los representaremos junto con un ajuste polinomial de cuarto orden aplicado a los mismos:

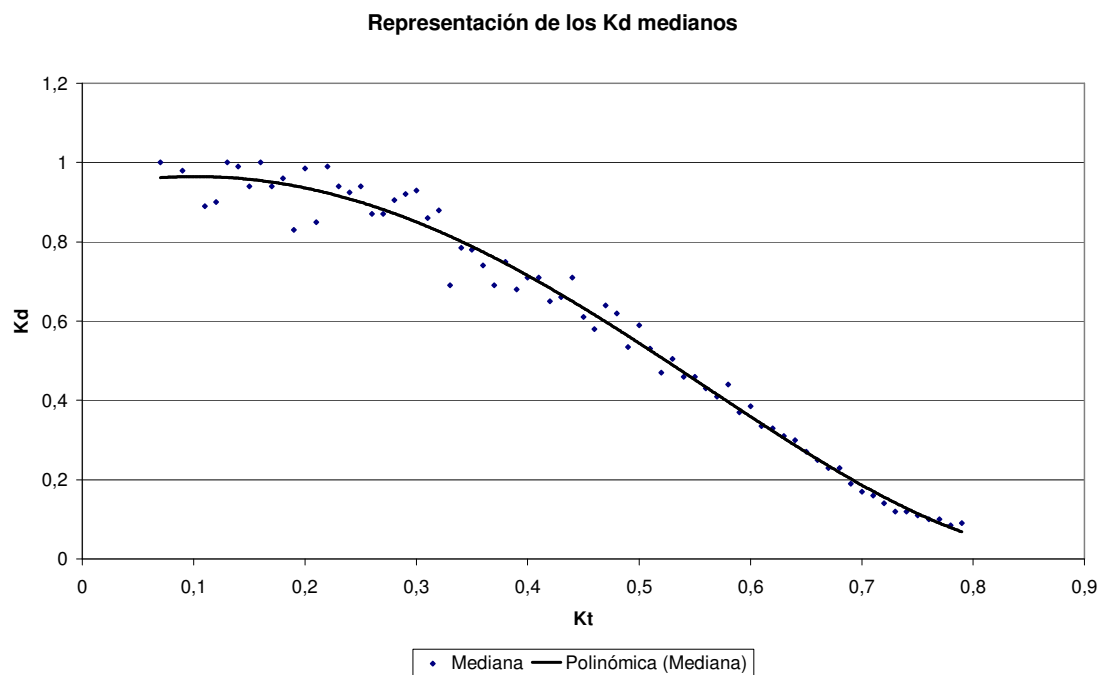


Figura 6.13 Representación de los valores Kd-Kt diarios medianos aproximados por una polinomial de cuarto orden.

Ajuste polinomial de los valores medianos:

$$K_d = 2.6766 K_t^4 - 1.4009 K_t^3 - 2.6776 K_t^2 + 0.5726 K_t + 0.9355 \quad [6.8]$$

También representaremos el modelo lineal desarrollado junto a los valores medianos para ver si se alejan mucho del ajuste [6.8]:

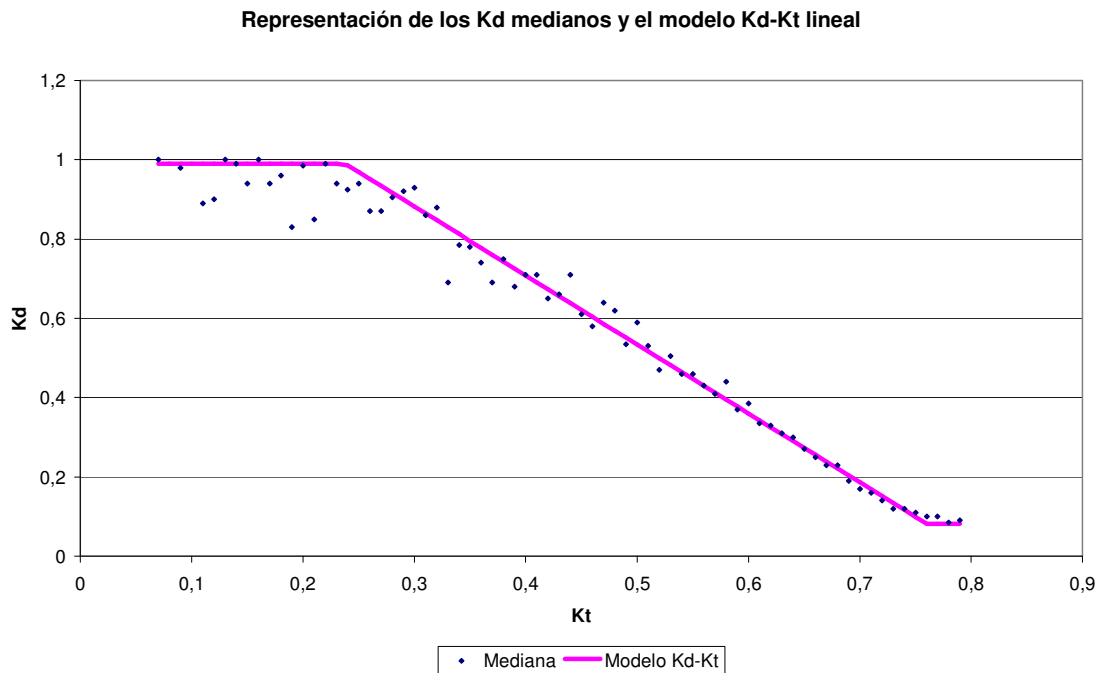


Figura 6.14 Representación de los valores Kd-Kt diarios medianos junto a los valores que tomarían con el modelo lineal obtenido.

Vemos que la recta se ajusta bastante bien a los valores medianos sobretodo para valores de Kt mayores de 0.4, donde se concentran el 88% del total de puntos representados en la figura 6.3, y donde el valor de la mediana es más representativo. Para el caso de las dos polinomiales ocurre igual, aunque en estos casos los modelos se adaptan mejor a los puntos en la zona del cambio de pendiente que el modelo lineal:

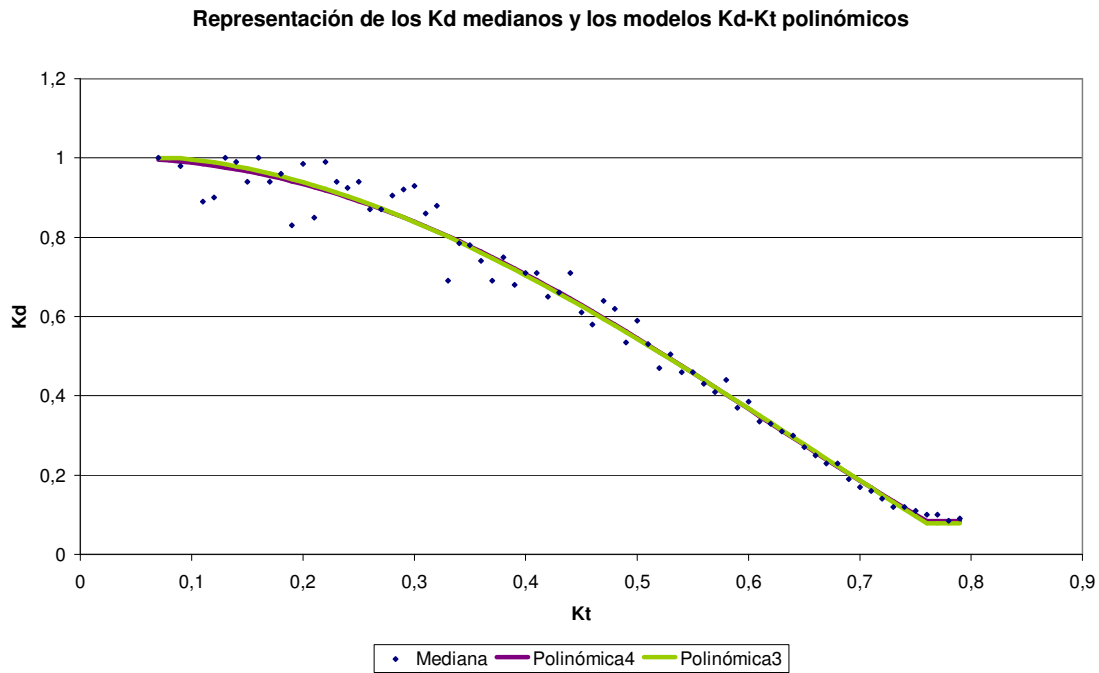


Figura 6.15 Representación de los valores Kd-Kt diarios medianos junto con los valores que tomarían con los modelos polinómicos.

Una vez hallados todos los modelos calculamos los coeficientes RESNORM para cada uno de ellos definidos por la expresión:

$$RESNORM = \sum (Kd_{modelos} - Kd_{medidos})^2 \quad [6.9]$$

Este coeficiente nos informa de qué modelo se ajusta mejor a los puntos. Cuanto menor sea el valor del coeficiente, menos alejados se encuentran los puntos del modelo. Los coeficientes obtenidos son:

Modelos	Lineal	Polinomial 4°	Polinomial 3°	Mediana
RESNORM	9.4390	9.0835	9.1052	9.1287

Tabla 6.9 Valores del coeficiente RESNORM para los modelos Kd-Kt obtenidos con los valores de difusa.

Según lo expuesto el modelo que mejor se ajusta a la nube de puntos representada en la figura 6.3 es el modelo polinómico de cuarto orden [6.7].

6.3 Comparación con otros modelos

En este apartado compararemos los modelos obtenidos en el apartado anterior, con otros modelos basados en datos procedentes de la misma estación radiométrica, y a continuación, con el resto de modelos descritos en el apartado 3.2.2.

De entre los modelos Kd-Kt diarios citados en el apartado 3.2.2, aquellos que han sido desarrollados utilizando los datos de radiación recogidos por la estación radiométrica de la ETSI (Escuela Técnica Superior de Ingenieros) de Sevilla son el modelo de Frutos Ruiz, GTER84-03 y GTER00-03. Los dos últimos modelos son lineales, por lo que los representaremos junto con el modelo lineal del apartado anterior:

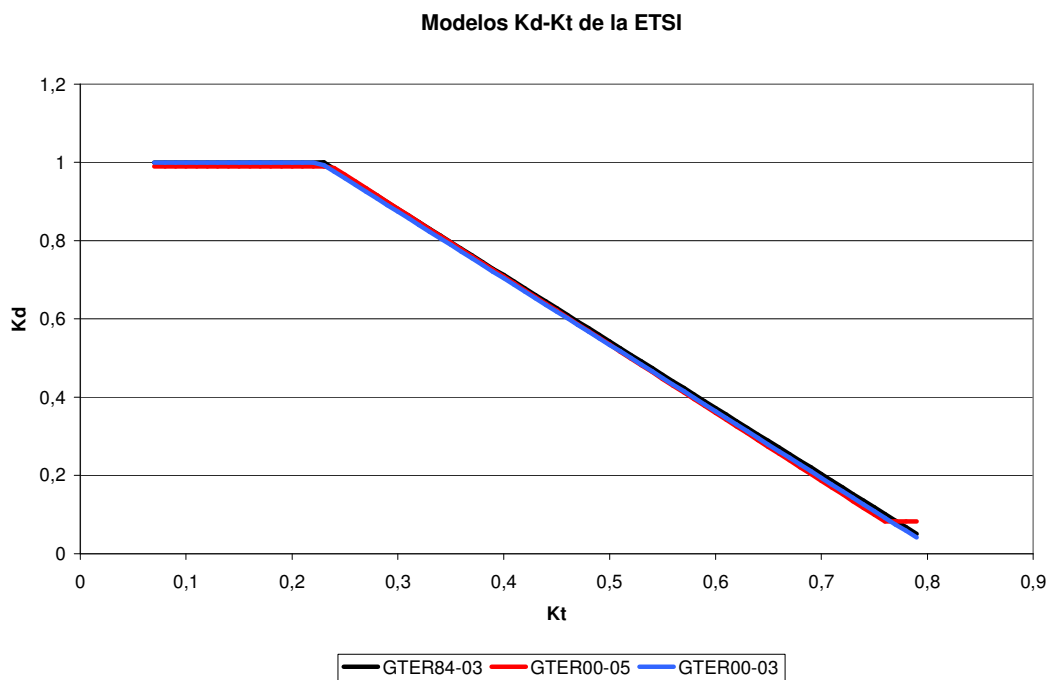


Figura 6.16 Representación de los modelos Kd-Kt diarios del GTER para diferentes períodos.

Como podemos ver en la figura 6.16 las tres rectas casi se superponen. La única diferencia que podemos encontrar entre ellas es una pequeña variación en la pendiente de la recta decreciente del 2%. El modelo que se obtuvo para el período 84-03 es el que menor pendiente tiene, y el que más, el del presente proyecto. Esto significa que la pendiente es mayor para períodos más recientes, donde se obtendrán menores valores de Kd para un mismo Kt. Es posible que este hecho sea una consecuencia de utilizar en el último modelo valores experimentales cada 5 segundos en lugar de cada 5 minutos, dando resultados más precisos que nos presentan una atmósfera cada vez más limpia. Otra posibilidad es que el filtrado empleado en nuestro período haya sido más estricto y los desajustes de la banda de sombra hayan sido eliminados con mayor rigor, consiguiendo así valores de difusa menores. A continuación, presentamos las expresiones de las rectas de los tres modelos para comprobar que la diferencia entre ellas no es muy destacable:

$$\text{GTER00-05: } K_d = 1.403973 - 1.739671 \cdot K_t \quad \text{si } 0.23 < K_t < 0.77$$

$$\text{GTER00-03: } K_d = 1.384394 - 1.700599 \cdot K_t \quad \text{si } K_t > 0.22$$

$$\text{GTER84-03: } K_d = 1.390975 - 1.69912 \cdot K_t \quad \text{si } K_t > 0.22$$

[6.5]

Un estudio similar haremos con los modelos obtenidos a partir de los valores de directa, pero en este caso incluiremos una modificación. Para los valores de difusa, los límites de K_t a la hora de calcular la recta no difieren apenas entre los modelos a comparar, pero para los de directa si. Por este motivo, compararemos al igual que hicimos con los modelos anuales únicamente las rectas para los límites fijados en este caso por los modelos anteriores. El resultado es el siguiente:

kdD-kt diario años 2000-05

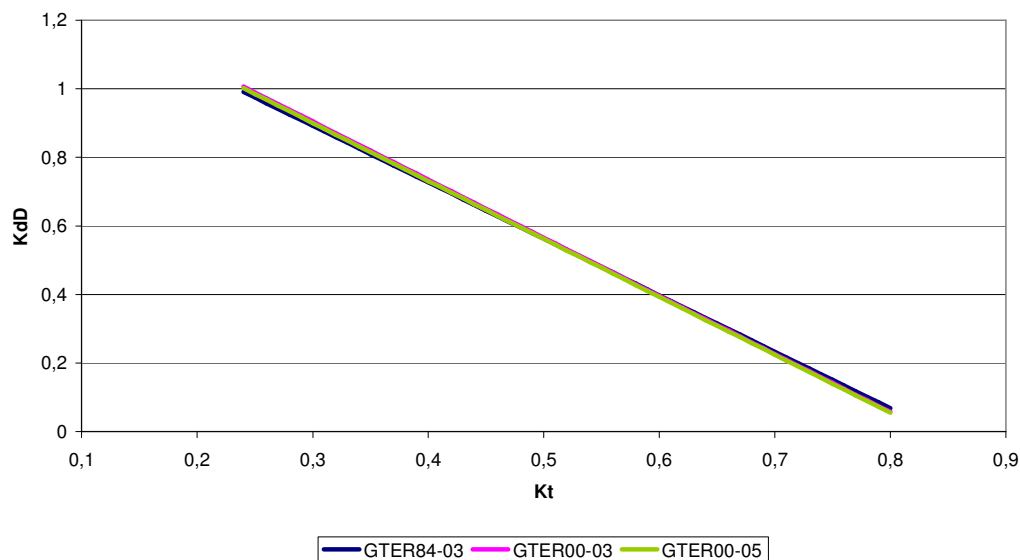


Figura 6.17 Representación de los modelos KdD-Kt diarios del GTER para diferentes períodos.

Vemos como las rectas en este caso también son muy parecidas, el máximo error entre sus pendientes es del 3%. La recta que tiene mayor pendiente, es la correspondiente al período 2000-03, aunque al ser menor el corte de la recta con el eje de ordenadas para el período 2000-05, éste proporciona valores de K_d menores. Con esto comprobamos la mejora que ha introducido en la estación el pirheliómetro con seguidor en dos ejes, alcanzando mayores medidas de radiación directa, y como consecuencia en la gráfica, menores de difusa.

$$\text{GTER00-05: } K_{dD} = 1.406708 - 1.689042 \cdot K_t \quad \text{si } 0.26 < K_t < 0.77$$

$$\text{GTER00-03: } K_{dD} = 1.412641 - 1.693894 \cdot K_t \quad \text{si } K_t > 0.22$$

$$\text{GTER84-03: } K_d = 1.385676 - 1.646186 \cdot K_t \quad \text{si } K_t > 0.22$$

[6.6]

El último modelo que está basado en datos de radiación de la ETSI es el modelo de Frutos-Ruiz, que al ser polinómico de tercer orden lo compararemos con el mejor modelo polinómico obtenido en el apartado anterior, el de cuarto orden. En este caso como podemos ver en la figura 6.18 que mostramos a continuación, no se parecen tanto como en el de los modelos lineales:

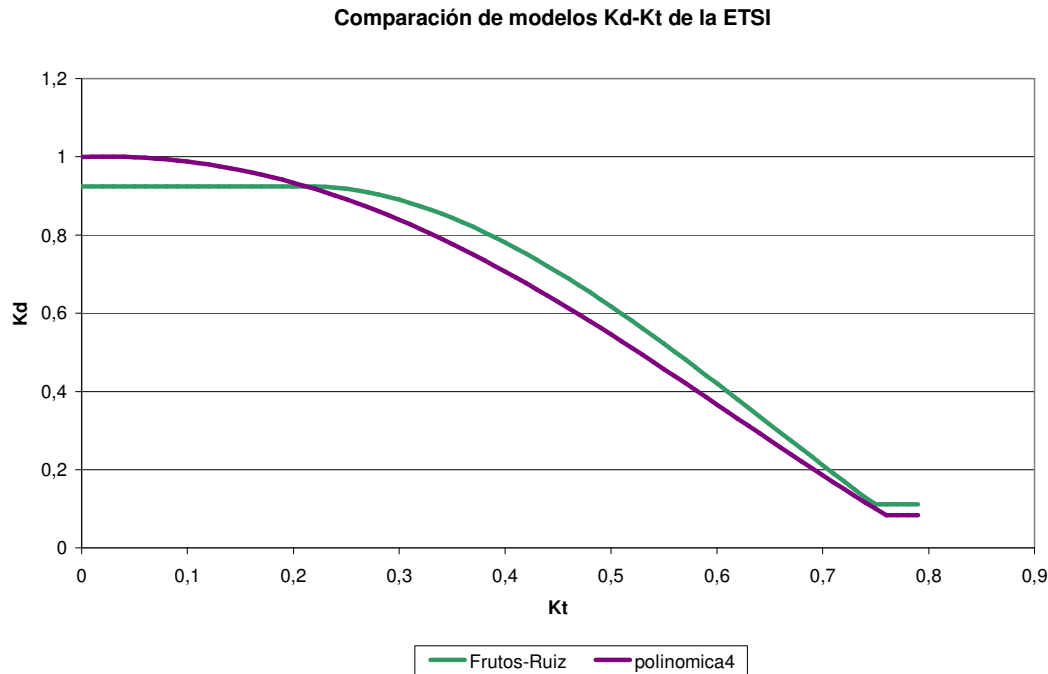


Figura 6.18 Representación de dos modelo Kd-Kt diarios obtenidos a partir de datos recogidos por el GTER00-05.

El modelo de Frutos Ruiz asocia valores mayores de Kd para un Kt dado que el GTER00-05. Es posible que el tipo de ajuste halla podido condicionar la forma del modelo, sobre todo para $K_t < 0,3$, aunque parece a simple vista que el modelo ha sido elaborado con valores de difusa superiores a los del presente proyecto. Sabemos que se han empleado medidas procedentes de la misma estación radiométrica durante un período de tiempo mucho menor que en esta ocasión. Esto y el tipo de filtrado aplicado a los datos podrían ser los motivos por los que los modelos difieren para $K_t > 0,3$.

Por último representaremos el modelo polinomial de cuarto orden del apartado anterior, ya que es el que mejor se ajusta a la nube de puntos, con otros modelos desarrollados en lugares y períodos diferentes:

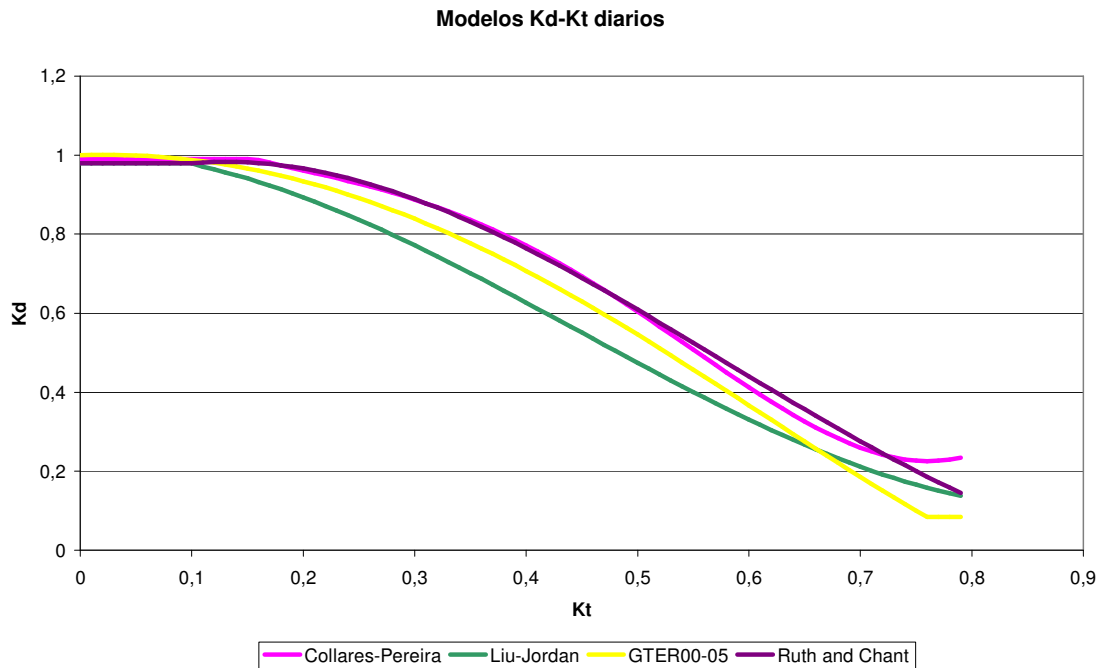


Figura 6.19 Representación de modelos Kd-Kt diarios.

El primer modelo desarrollado de todos los representados, fue el de Liu y Jordan [9]. En su estudio utilizaron medidas de radiación difusa que fueron tomadas mediante un piranómetro con banda de sombra. Los modelos presentados por Ruth- Chant y por Collares-Pereira y Rabl [5] no concuerdan con estos resultados. Ambos estudios concluyen que la correlación de Liu y Jordan subestima los valores de difusa y atribuyen la diferencia de radiación sin ninguna duda al efecto “banda de sombra”. Ruth y Chant utilizaron datos de radiación para varios años procedentes de cuatro estaciones diferentes de Canadá. La radiación difusa en este caso fue medida con un piranómetro con banda de sombra y corregida para compensar los posibles errores que, según su estudio, introduce la banda. Collares-Pereira y Rabl utilizaron datos de radiación directa medidos durante pequeños períodos de tiempo de cinco estaciones de Estados Unidos. Al representar estos modelos en la misma gráfica que el modelo del presente proyecto desarrollado con los valores de difusa, se observa que la correlación de Liu Jordan, en efecto, subestima los valores de radiación, pero también se observa que nuestro modelo subestima los valores de difusa respecto a los otros representados. Los modelos de Ruth-Chant y Collares-Pereira son muy similares, sólo difieren para $K_t > 0,7$. Collares-Pereira y Rabl en su artículo “The average distribution of solar radiation- correlations between diffuse and hemispherical and daily and hourly insolation values” [8], compara los resultados de su modelo con otros informes procedentes de la India e Israel que también incluyen la corrección por banda de sombra. Y en sus conclusiones afirma que el hecho de considerar la latitud como una variable independiente es una buena aproximación. Nuestro modelo difiere notablemente de el publicado por Collares-Pereira, y para los días claros alcanza valores de radiación difusa mucho menores que éste, incluso menores que los de Liu Jordan. Para comprobar si en nuestro caso, el culpable de esta diferencia es el no haber considerado el efecto “banda de sombra”, compararemos estos modelos con uno polinómico obtenido con los valores de directa de nuestro estudio:

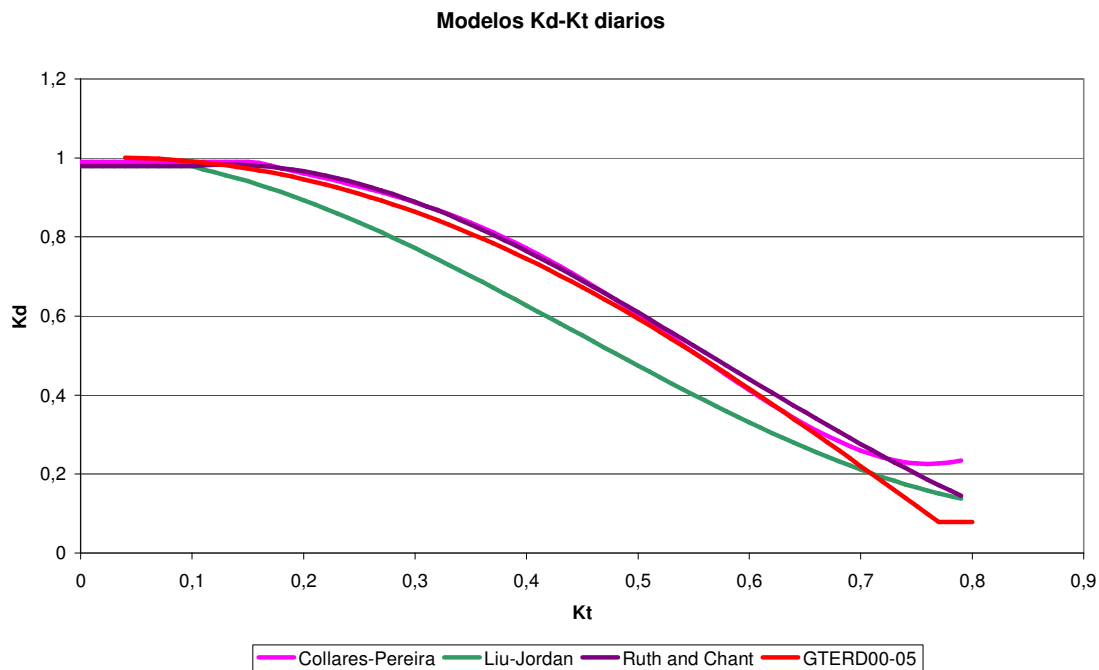


Figura 6.20 Representación de modelos Kd-Kt diarios.

Modelo polinómico de cuarto orden GTERD00-05:

$$KdD = 1 + 0.0816 Kt - 1.6436 Kt^2 - 0.7906 Kt^3 + 0.9995 Kt^4 \quad \text{si} \quad 0.09 < Kt < 0.77$$

$$KdD = 0.079 \quad \text{si} \quad Kt \geq 0.77$$

[6.7]

En la figura 6.20 vemos que el modelo obtenido con los datos de radiación directa se parece más a los de Ruth-Chant y Collares-Pereira que el elaborado a partir de los de difusa. Aunque la diferencia entre ellos aumenta a medida que nos acercamos a $Kt=0.8$. El parecido para el resto de valores de Kt , nos hace dudar sobre la validez de los modelos desarrollados a partir de los datos de difusa sin considerar el efecto de banda de sombra. Pero necesitaríamos hacer un estudio comparativo de datos de radiación difusa medidos con otro instrumento de medida diferente para poder confirmarlo. Lo que sí podemos afirmar es que para $Kt < 0.6$ nuestro $KdD-Kt$ se asemeja bastante a otros modelos representados con datos procedentes de estaciones con diferente latitud, aunque no ocurre igual para el resto de valores de Kt . En los días claros, el clima, la polución de la atmósfera, la geografía del lugar..., influye en los niveles de difusa demasiado como para poder hacer esta afirmación.