

**CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS
PARÁMETROS ESTRUCTURALES DEL
TEJIDO EN EL FACTOR DE
PROTECCIÓN A LA RADIACIÓN
ULTRAVIOLETA**

2.1. INTRODUCCIÓN

Según la información bibliográfica, el factor que a priori tiene más influencia sobre la protección proporcionada por los artículos textiles, junto con el tipo de fibra utilizada, es la propia estructura del tejido, ya que determinará la mayor o menor apertura del mismo y, por tanto, la dificultad física que éste opondrá al paso de la radiación ultravioleta.

Al hablar de estructura, se incluyen los diversos factores que intervienen en la fabricación de los tejidos crudos.

El primero de estos factores es el sistema de fabricación de los tejidos, punto o calada. Bajo el punto de vista técnico textil, con el nombre de tejido se conoce el género obtenido en forma de lámina más o menos resistente, elástica y flexible, mediante el cruzamiento y enlace de hilos. Hay tejidos que están formados por un solo hilo que se enlaza consigo mismo, como el género de punto por trama. Otros están formados por una serie de hilos que se enlazan entre ellos como el género de punto por urdimbre. Y los hay compuestos por dos series de hilos, una serie longitudinal o urdimbre que se cruza y enlaza perpendicularmente con los de otra serie transversal o trama, como es el caso de los tejidos de calada ⁽⁴⁰⁾.

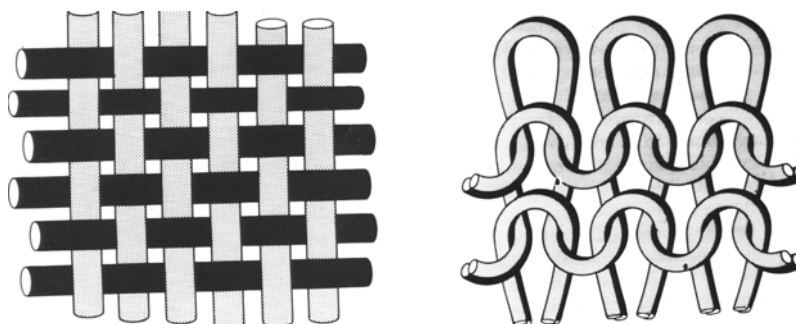


Figura 2.1. Tejido de calada y tejido de punto por trama

Dentro de cada uno de estos sistemas de fabricación se dispone de numerosas formas de enlace de los hilos en los tejidos de punto llamadas estructuras de malla (jersey, interlock, acanalado, etc.), o bien numerosas posibilidades de ligamento (tafetán, sarga, crêpe, etc.), es decir, de formas en que pueden entrecruzarse los hilos de la urdimbre con las pasadas de la trama en el caso de los tejidos de calada.

En la Tabla 2.1 se expone como ejemplo una clasificación de los tejidos de calada en función de su ligamento.

En la estructura también interviene la densidad de hilos y pasadas (número de hilos por cm de tejido), en el caso de tejidos de calada, o la densidad de columnas y mallas, en el caso de tejidos de punto. Y, por supuesto, en todos los casos el título del hilo que nos proporciona una medida del grosor del mismo.



La combinación de todos estos factores determinará indirectamente el peso por unidad de superficie, el espesor y la porosidad de las estructuras textiles.

Ligamentos	Simples	Fundamentales	Tafetán Sarga Raso
		Derivados	Del Tafetán De la sarga Del raso
	Compuestos	Derivados mixtos Derivados por transposición Ligamentos amalgamados Ligamentos cruzados Ligamentos discordantes Ligamentos esfumados Ligamentos radiados Ligamentos listados Ligamentos a cuadros Ligamentos de relieve Ligamentos a capricho	

Tabla 2.1. Clasificación de los tejidos de calada en función de su ligamento

Es evidente que el número de combinaciones de todos estos factores que determinan la estructura de un tejido es muy elevado, por lo que deberán acotarse para realizar el estudio de la influencia de la estructura en el factor de protección a la radiación ultravioleta, dentro del presente trabajo de investigación. Por ello se han estudiado únicamente tejidos de calada simples (formados por una urdimbre y una trama) de ligamento tafetán, que es el ligamento simple fundamental de curso más pequeño y más sencillo. Con este ligamento se pueden obtener desde tejidos muy finos y transparentes, cuando se emplean densidades pequeñas e hilos muy finos, hasta tejidos muy gruesos y opacos, si se emplean densidades altas e hilos muy gruesos. Por ello, se presenta muy adecuado para el estudio que se lleva a cabo en esta tesis, ya que nos permite obtener tejidos con una gama amplia de tupidez ⁽⁴⁰⁾.

Una vez fijados el sistema de fabricación y el ligamento, el estudio se ha centrado en la variación de la protección proporcionada por los tejidos cuando varía el resto de parámetros estructurales. Para ello se han fabricado tejidos de calada combinando tres títulos del hilo de la urdimbre, tres títulos del hilo de la trama y tres densidades de pasadas. Los valores de estas variables se han escogido para que su combinación permita obtener una gama de tejidos ligeros o ligeros-medios, adecuados para su uso como prendas de la temporada primavera/verano, es decir, con pesos teóricos comprendidos entre 100 y 200 g/m² aproximadamente. En función del peso por unidad de superficie, los tejidos de fibras celulósicas se clasificarían de la siguiente manera ⁽⁴¹⁾:



Clasificación	Peso por unidad de superficie	Aplicación
Muy finos o muy ligeros	Hasta 50 g/m ²	Gasas
Finos o ligeros	De 50 a 150 g/m ²	Organdí, batista, cretona, popelín, vichy, satén, percal, pañuelos, gofrado, crep georget, forrería
Medios	De 150 a 250 g/m ²	Piqué, camisas, gabardina, franela, dril, cretona, pantalón, mantelería
Gruesos o pesados	De 250 a 400 g/m ²	Sargas, dril pantalón, mantas, sidú, sidulina
Muy gruesos o muy pesados	Más de 400 g/m ²	Lonas

Tabla 2.2. Clasificación de los tejidos en función de su peso por unidad de superficie

Este tipo de tejidos abiertos y ligeros hacen a las prendas de verano muy confortables. Pero cuanto más abierta es la estructura proporcionará una menor protección en una época del año en la que, en cambio, se necesita que la protección sea elevada, ya que los niveles de radiación ultravioleta que llegan a la superficie de la Tierra son extremos. Por ello, el estudio de la relación entre la estructura del tejido y el UPF ayuda al establecimiento de las condiciones mínimas de estructura para obtener el UPF deseado con el máximo confort posible.

El objetivo de esta primera parte de la tesis doctoral es el establecimiento de modelos matemáticos que relacionen el valor de UPF con las variables más representativas de la estructura del tejido. Se pretende establecer un modelo matemático para cada fibra estudiada, que permita la predicción del UPF en función de algunas variables de fabricación de los tejidos (título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama y densidad de pasadas), fácilmente controlables en la práctica industrial.

Como complemento al estudio anterior se ha buscado también relacionar el UPF con otros parámetros estructurales del tejido ampliamente utilizados en la definición técnica de productos, como son el peso por unidad de superficie, el espesor y el factor de cobertura.

El estudio se ha repetido para tres fibras celulósicas diferentes que por sus características son muy adecuadas para su uso en prendas de la temporada primavera/verano. Como ya se ha indicado anteriormente, una de las fibras es el Algodón, la fibra celulósica natural de más amplio consumo mundial. Como fibra de celulosa regenerada se ha escogido la fibra de Modal. La decisión de escoger esta fibra (y no una viscosa o triacetato) es debida a la elección de la tercera fibra en estudio, la fibra de Modal Sun. Esta última fibra está especialmente diseñada para su utilización en prendas protectoras contra la radiación ultravioleta. Es complementamente igual a la fibra de Modal, excepto en que lleva incorporado un producto absorbente de radiación ultravioleta, añadido en el fluido de hilatura, lo que permite una fácil comparación entre las dos fibras.



2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.2.1. Materia

Se han fabricado tejidos partiendo de tres fibras diferentes: Algodón, Modal y Modal Sun. Todas ellas son fibras celulósicas que se utilizan muy ampliamente en la fabricación de prendas de la temporada de primavera/verano. Como fibras celulósicas, son polisacáridos cuya unidad estructural es la 1,4-β-anhidroglucosa y su unidad repetida la celobiosa.

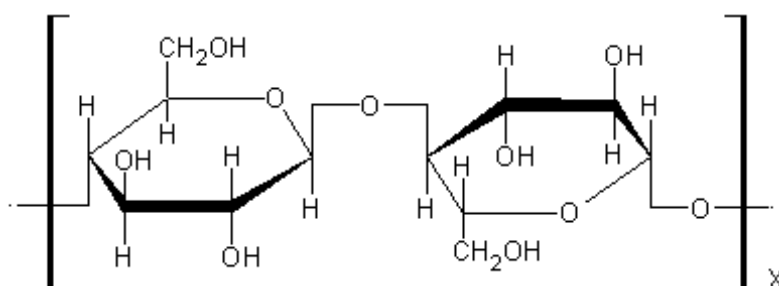


Figura 2.2. Celulosa (Algodón, Modal y Modal Sun)

En las sucesivas unidades de anhidroglucosa existen tres grupos hidroxilo que pueden interaccionar con los de las unidades de una cadena vecina a través de fuertes puentes de hidrógeno. La intensidad de estas interacciones entre cadenas vecinas y la gran linealidad de la cadena celulósica explican la naturaleza cristalina de las fibras celulósicas. El número, tamaño, agrupamiento y disposición de las regiones cristalinas en las diferentes fibras celulósicas determina las propiedades de cada una de ellas ⁽⁴²⁾.

2.2.1.2. Algodón

El Algodón es la fibra de mayor producción y consumo mundial. Se clasifica como fibra natural, de origen vegetal, que procede de las semillas del algodónero (*Gossypium*), del género de las malváceas.

El grado de polimerización del algodón es del orden de 2500. La cristalinidad está alrededor del 70% y las microfibrillas se disponen helicoidalmente según el eje longitudinal de la fibra. Longitudinalmente la fibra tiene una forma de cinta aplastada en sus bordes y con repliegues. Transversalmente la fibra tiene una sección de riñón o judía y se distinguen tres componentes morfológicos: la pared primaria (que envuelve la fibra y la protege), pared secundaria (la más abundante e importante) y lumen (espacio hueco de la fibra colapsada).

El título de la fibra oscila entre 1 y 4 dtex y su longitud entre 10 y 60 mm. Es una fibra relativamente rígida con baja recuperación elástica, pero más suave y plegable en mojado. Se arruga fácilmente y no conserva bien el plisado. Tiene moderada resistencia a la abrasión y baja formación de pilling.



El algodón posee un tacto excelente y un cayente bastante aceptable. Su gran absorción de humedad y su capacidad para desorberla, hacen que esta fibra sea muy confortable para el usuario.

Esta fibra se tiñe fácilmente con varias familias de colorantes: directos, tina, sulfurosos, naftoles y reactivos. Resiste a los disolventes orgánicos corrientes y también a los álcalis, aunque se hidroliza por acción de ácidos diluidos en caliente o ácidos concentrados en frío, formándose hidrocélulosa. Las disoluciones diluidas de agentes oxidantes y reductores atacan poco al algodón. Pero las soluciones concentradas de los agentes utilizados habitualmente en el blanqueo (hipoclorito sódico, peróxido de hidrógeno y clorito sódico) pueden dañar apreciablemente a la fibra.

La fibra de algodón sólo es ligeramente atacada por la luz solar, puesto que la celulosa carece de la mayor parte de los grupos que absorben la radiación ultravioleta entre 300 y 400 nm ⁽⁴²⁾.

2.2.1.3. Modal

La fibra de Modal se clasifica dentro del grupo de fibras químicas de polímero natural, fabricadas a partir de celulosa regenerada. La CEE describe las fibras modal como “fibras de celulosa regenerada obtenidas por procedimientos que les confieren simultáneamente una gran tenacidad y un alto módulo de elasticidad en estado mojado. Estas fibras deben poder soportar una carga de 22 cN/tex sin que bajo ella su alargamiento sea superior al 15%”.

Las fibras de viscosa y modal se fabrican según el proceso viscosa. La concentración y tipos de aditivos presentes en el baño de coagulación y la naturaleza y calidad de la celulosa original influyen mucho en la microestructura y las propiedades físicas de las fibras, pudiéndose obtener fibras tan diferentes como para tener diferente denominación genérica.

El grado de polimerización de las fibras de Modal es del orden de 500-700. Las fibras de Modal tienen una estructura más fibrilar y una cristalinidad más elevada que las fibras de viscosa convencionales (55% frente al 25-30% de la viscosa). Ello las hace tener un mayor módulo en húmedo, mayor tenacidad, mayor resistencia al hinchamiento por álcalis, mayor grado de polimerización y una estructura microfibrilar. Al ser menos deformables en húmedo y más resistentes a los álcalis, las fibras de modal son menos sensibles a los procesos de lavado que las de viscosa. Su sección transversal presenta una forma casi redonda y una forma longitudinal como de tubo.

La fibra de Modal puede encontrarse en forma comercial como multifilamento o como fibra discontinua. Como el algodón, es una fibra relativamente rígida con baja recuperación elástica, por lo que se arruga fácilmente, aunque su comportamiento



elástico es mejor que el del algodón, cuando se trata de bajas deformaciones. Tiene aceptable resistencia a la abrasión y baja formación de pilling.

El tacto de los tejidos es frío y sólo aceptable, al igual que su aspecto, siendo muy confortables al uso. Absorben mayor porcentaje de humedad que el algodón (por el mayor contenido de material amorfo).

Las propiedades químicas de esta fibra son prácticamente las mismas que las de algodón, aunque, en general, son algo más sensibles a la acción de los diferentes reactivos, aunque más resistentes que las fibras de viscosa. Se tiñen con las mismas familias de colorantes.

La exposición prolongada de estas fibras a la acción de la luz produce una pérdida gradual de resistencia ⁽⁴⁰⁾.

La fibra de Modal utilizada en este trabajo de investigación presenta un aspecto brillante, con un título de 1,3 dtex y en forma de fibra cortada a longitud algodонера.

2.2.1.4. Modal Sun

La fibra de Modal Sun es una fibra especialmente producida para su uso en prendas protectoras contra la radiación solar. Esta nueva funcionalidad se consigue mediante la incorporación de un bloqueador de radiación ultravioleta (dióxido de titanio) en la masa de hilatura de la fibra Modal. De esta forma, se obtiene una fibra con las mismas características que la fibra de Modal, pero con propiedades protectoras de las que carecen todas las fibras celulósicas, siempre que se aplique en tejidos con construcciones adecuadas. Al ser incorporado el producto absorbente de radiación ultravioleta en la masa de hilatura, el efecto protector integrado permanece estable, incluso después de muchos lavados ^(43, 44).

La fibra de Modal Sun utilizada en esta tesis presenta un aspecto mate, probablemente debido a la adición del dióxido de titanio que se utiliza normalmente en la industria textil como agente mateante. Las fibras tienen un título de 1,3 dtex y se presentan en forma de fibra cortada a longitud algodонера.

2.2.2. Planificación experimental y preparación de las muestras de tejido

Las principales variables de fabricación de los tejidos de calada que influyen en la obtención de diferentes estructuras son: ligamento, título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama, densidad de hilos y densidad de pasadas.

Es evidente que el número de variables y la gran cantidad de variaciones que se pueden obtener en la industria textil hace imposible el estudio de todas las combinaciones posibles. Por ello ha sido necesario acotar justificadamente el número de estructuras en



el estudio, reduciendo a 3 el número de variables de fabricación que intervienen en el estudio.

Por consideraciones prácticas, ya que facilita la producción de las muestras, se ha considerado el mantener constantes los siguientes parámetros de fabricación:

- Ligamento: se mantiene constante el ligamento tafetán para todas las muestras de tejidos. Se ha escogido este ligamento porque proporciona la estructura simple más abierta y que tiene un factor de protección a la radiación ultravioleta menor, es decir, se ha estudiado el ligamento simple más desfavorable respecto al UPF.
- Densidad de hilos de urdimbre: se ha mantenido constante con un valor de 40 hilos/cm. Manteniendo constante este parámetro se simplifica el urdido previo al tisaje. Con una única urdimbre, compuesta por 3 franjas de hilos de diferente título, se pueden fabricar todos los tejidos de cada serie. El valor fijado, 40 hilos/cm, se ha escogido por ser el número máximo de hilos que se pueden urdir con el hilo más grueso utilizado.

De esta forma, quedan tres variables cuya combinación permite la obtención de tejidos con diferentes estructuras y que serán las variables del sistema:

X1: Título del hilo de urdimbre (tex)

X2: Título del hilo de trama (tex)

X3: Densidad de pasadas (hilos/cm)

Los niveles de cada una de las variables son también tres: nivel bajo, medio y alto. Se han escogido los valores de cada nivel que son adecuados para la fabricación de tejidos ligeros apropiados para su uso en prendas de la temporada de verano. Para ello se ha partido de hilos finos que, en combinación con diferentes densidades de trama, proporcionen tejidos con pesos teóricos comprendidos entre aproximadamente 100 y 200 g/m². Los niveles escogidos de cada variable son los que se exponen en la Tabla 2.3.

Variable Nivel	ALGODÓN - MODAL			MODAL SUN		
	X1 Título hilo urdimbre (tex)	X2 Título hilo trama (tex)	X3 Densidad pasadas (h/cm)	X1 Título hilo urdimbre (tex)	X2 Título hilo trama (tex)	X3 Densidad pasadas (h/cm)
Bajo	14,3	14,3	23	14,3	14,3	23
Medio	20	20	25	20	20	25
Alto	25	25	27	29,4	29,4	27

Tabla 2.3. Variables y niveles de las variables en el plan experimental

Los hilos de Algodón, Modal y Modal Sun utilizados en este estudio fueron producidos por una empresa dedicada a la hilatura. Por razones de planificación de la producción en



dicha empresa, ha sido imposible tener exactamente los mismos niveles en las variables título del hilo para todas las fibras. El nivel alto para los hilos de Modal Sun tiene un valor de 29,4 tex, mientras que para los hilos de Algodón y Modal es de 25 tex. Todos los demás niveles de las variables son iguales para todas las fibras.

Siendo el sistema de 3 variables con 3 niveles diferentes, el diseño experimental adecuado es un factorial de 3 factores a 3 niveles, factorial 3^3 . En total, este diseño se compone de 27 puntos experimentales cada uno de los cuales corresponde a un tejido diferente en cuanto a sus características estructurales ⁽⁴⁵⁾. Sin embargo, debido a las dificultades en conseguir 3 niveles equidistantes en algunas de las variables, no ha sido posible la utilización de un diseño factorial propiamente dicho. La solución ha sido realizar experiencias lo más similares a dicho plan factorial, siendo necesario, en este caso, realizar el análisis estadístico de los resultados para la modelización de la respuesta por modelo lineal. Este diseño “pseudofactorial” se ha aplicado para cada serie separadamente. Es decir, se han construido 3 series de tejidos, cada una de ellas formada por 27 tejidos fabricados con las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun. Cada una de las experiencias corresponde a la combinación de las 3 variables a los 3 niveles, según se expone en la Tabla 2.4.

Los 27 tejidos correspondientes a cada serie descrita en la Tabla 2.4 se han fabricado en una empresa especializada en la fabricación de muestras de tejidos. También se han realizado 3 repeticiones del punto central (punto 14) para comprobar la homogeneidad de las variancias.

Después de su fabricación, los tejidos han sido sometidos a un tratamiento de descolado enzimático para eliminar la cola adicionada en el tisaje. El proceso se ha realizado a 70°C durante 30 minutos con la fórmula siguiente:

- Bactosol TC: 0,5 g/l
- Sandozina NIA: 1 g/l
- Sal (NaCl): 3 g/l
- Relación de baño: 1/20

Además, en los tejidos fabricados con Algodón ha sido necesaria la realización de un tratamiento de descrudado y blanqueo químico para eliminar las partículas y pigmentos propios de esta fibra natural. Las condiciones de dichos tratamientos son las siguientes:

- Descrudado: durante 90 minutos a 100°C
 - NaOH: 3 g/l
 - Sandopan DTC: 1g/l
 - Relación de baño: 1/20
- Blanqueo químico: durante 30 minutos a 100°C



- H₂O₂ 30%: 7 cc/l
- NaOH 38°Bé: 3 cc/l
- Estabilizador SIFA: 1 g/l
- Sandopan DTC: 1 g/l
- Relación de baño: 1/20

Muestra	ALGODÓN			MODAL			MODAL SUN		
	X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3
1	14,3	14,3	23	14,3	14,3	23	14,3	14,3	23
2	20	14,3	23	20	14,3	23	20	14,3	23
3	25	14,3	23	25	14,3	23	29,4	14,3	23
4	14,3	20	23	14,3	20	23	14,3	20	23
5	20	20	23	20	20	23	20	20	23
6	25	20	23	25	20	23	29,4	20	23
7	14,3	25	23	14,3	25	23	14,3	29,4	23
8	20	25	23	20	25	23	20	29,4	23
9	25	25	23	25	25	23	29,4	29,4	23
10	14,3	14,3	25	14,3	14,3	25	14,3	14,3	25
11	20	14,3	25	20	14,3	25	20	14,3	25
12	25	14,3	25	25	14,3	25	29,4	14,3	25
13	14,3	20	25	14,3	20	25	14,3	20	25
14	20	20	25	20	20	25	20	20	25
15	25	20	25	25	20	25	29,4	20	25
16	14,3	25	25	14,3	25	25	14,3	29,4	25
17	20	25	25	20	25	25	20	29,4	25
18	25	25	25	25	25	25	29,4	29,4	25
19	14,3	14,3	27	14,3	14,3	27	14,3	14,3	27
20	20	14,3	27	20	14,3	27	20	14,3	27
21	25	14,3	27	25	14,3	27	29,4	14,3	27
22	14,3	20	27	14,3	20	27	14,3	20	27
23	20	20	27	20	20	27	20	20	27
24	25	20	27	25	20	27	29,4	20	27
25	14,3	25	27	14,3	25	27	14,3	29,4	27
26	20	25	27	20	25	27	20	29,4	27
27	25	25	27	25	25	27	29,4	29,4	27

Tabla 2.4. Diseño experimental (Influencia de parámetros estructurales)

2.2.3. Parámetros determinados

Se han analizado estadísticamente dos tipos de relaciones entre los parámetros estructurales de los tejidos y el factor de protección a la radiación ultravioleta UPF. Para



cada análisis ha sido necesario determinar diferentes parámetros en los 27 tejidos de cada una de las tres series (tejidos de Algodón, de Modal y de Modal Sun):

A. Relación entre los parámetros de fabricación (título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama y densidad de trama) y el UPF de los tejidos: son parámetros que intervienen directamente como variables en la fabricación de los tejidos y, por tanto, los más fácilmente controlables en la práctica industrial. Los parámetros determinados para llevar a cabo dicho análisis son:

1. Espectros de transmisión de radiación en la región del ultravioleta
2. Factor de Protección a la Radiación Ultravioleta de los tejidos o UPF

B. Relación entre otros parámetros estructurales (peso por unidad de superficie, espesor, o cobertura) y el UPF de los tejidos: son parámetros que no intervienen como variables en la fabricación de los tejidos, pero que están estrechamente relacionados con la estructura de los mismos. Se han determinado con el objetivo de establecer modelos matemáticos que los relacionen con el UPF ya que se trata de parámetros de amplio uso en la industria textil. Junto con los ya descritos en el apartado A, para llevar a cabo el estudio se determinan también los parámetros siguientes:

3. Peso por unidad de superficie del tejido, g/m^2
4. Espesor del tejido, mm
5. Cobertura por análisis de imagen, %

Como complemento al estudio estadístico y, habiéndose observado diferencias muy notables en la protección proporcionada por los tejidos, causadas por el tipo de fibra empleada en la fabricación de cada una de las series, se ha decidido realizar un análisis mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) para tratar de determinar diferencias en la estructura química de las fibras, que pudieran explicar esas diferencias en su comportamiento. Para ello se han determinado:

6. Espectros FT-IR de muestras de las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun, extraídas de los tejidos
7. Espectros FT-IR de muestras calcinadas de las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun

La descripción de las normas empleadas y métodos operativos para la evaluación de los parámetros determinados puede consultarse en el Capítulo 8 de la tesis.



2.3. RESULTADOS

En este apartado se exponen los resultados obtenidos en la parte de la tesis dedicada al estudio de la influencia de los parámetros estructurales del tejido sobre la protección que proporcionan contra el paso de la radiación ultravioleta.

En el subapartado 2.3.1 se analiza la relación entre los parámetros de fabricación y el UPF de los tejidos. Dentro de este apartado se exponen en primer lugar los resultados obtenidos en la medida de los parámetros determinados (apartado 2.3.1.1). Se analizan los espectros de transmisión en el ultravioleta y el UPF de los tejidos, relacionándolos con los parámetros de fabricación de los tejidos (título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama y densidad de pasadas), así como las diferencias producidas por el uso de las diferentes fibras. En el apartado 2.3.1.2 se procede al análisis estadístico de los resultados y la modelización de la respuesta UPF del tejido en función de las tres variables del sistema, que conduce a la obtención de modelos matemáticos predictivos.

En el subapartado 2.3.2 se estudia la relación entre otros parámetros estructurales (peso por unidad de superficie, espesor, o cobertura) y el UPF de los tejidos. Se exponen primero los resultados obtenidos en la medida de los parámetros determinados, que actuarán como variables del sistema en el análisis estadístico de los resultados. Se analiza el UPF de los tejidos, relacionándolo con dichos parámetros estructurales de los tejidos, así como las diferencias producidas por el uso de las diferentes fibras (apartado 2.3.2.1). En el apartado 2.3.2.2 se procede al análisis estadístico de los resultados y la modelización de la respuesta UPF del tejido en función de cada uno de los parámetros estructurales determinados.

En el apartado 2.3.3 se presentan resultados del estudio complementario mediante la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR).

2.3.1. Relación entre los parámetros de fabricación (título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama y densidad de hilos de trama) y el UPF de los tejidos

2.3.1.1. Resultados en la determinación de los parámetros

2.3.1.1.1. Espectros de transmisión de radiación en la región del ultravioleta

2.3.1.1.1.1. Tejidos de Algodón

La Figura 2.3 muestra los espectros de transmisión difusa de la radiación ultravioleta a través de los tejidos de Algodón.



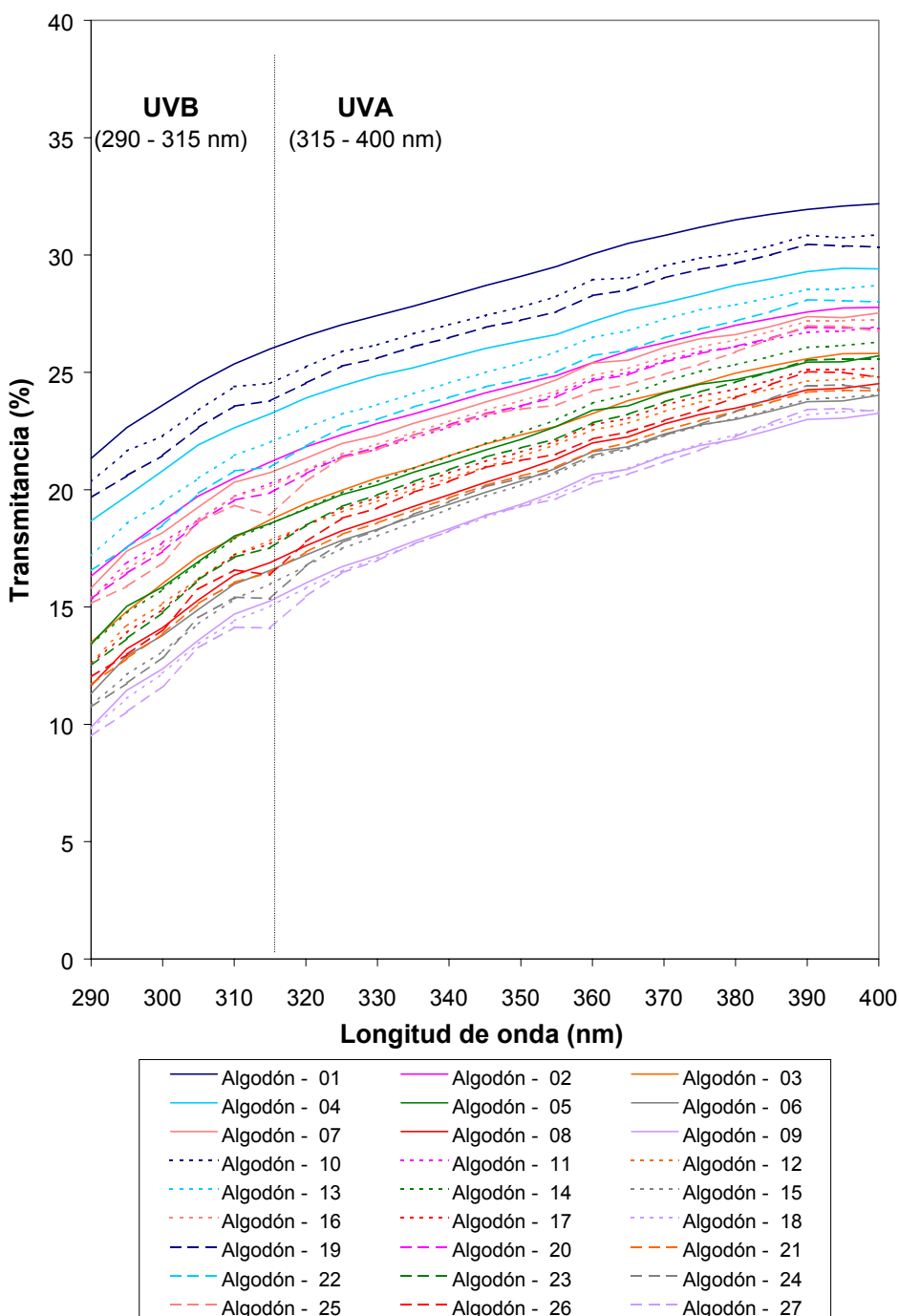


Figura 2.3. Espectros de transmisión en el ultravioleta de los tejidos de Algodón

En la figura se puede observar una forma de curva ascendente. La transmisión es menor en las longitudes más bajas correspondientes al inicio del espectro UVB (290 – 315 nm) y va aumentando al aumentar la longitud de onda hacia la zona del espectro UVA (315 – 400 nm).

Si se calculan las transmisiones medias en el UVA, en el UVB y en el total del espectro ultravioleta UVR, se obtienen los resultados expuestos en la Tabla 2.5.



Muestra n°	Título hilo urdimbre (tex)	Título hilo trama (tex)	Densidad de pasadas (hilos/cm)	T _{UVA} media (315 - 400 nm)	T _{UVB} media (290 - 315 nm)	T _{UVR} media (290 - 400 nm)
1	14,3	14,3	23	29,57	23,91	28,25
2	20	14,3	23	25,01	18,99	23,60
3	25	14,3	23	22,84	16,36	21,33
4	14,3	20	23	26,84	21,17	25,52
5	20	20	23	22,67	16,30	21,19
6	25	20	23	20,88	14,24	19,33
7	14,3	25	23	24,68	18,61	23,27
8	20	25	23	21,31	14,59	19,75
9	25	25	23	19,91	12,87	18,27
10	14,3	14,3	25	28,28	22,76	27,01
11	20	14,3	25	24,10	18,11	22,70
12	25	14,3	25	21,92	15,54	20,43
13	14,3	20	25	25,91	19,86	24,50
14	20	20	25	23,03	16,20	21,44
15	25	20	25	20,72	13,61	19,07
16	14,3	25	25	24,32	18,02	22,85
17	20	25	25	22,14	15,41	20,58
18	25	25	25	19,89	12,66	18,21
19	14,3	14,3	27	27,75	21,95	26,41
20	20	14,3	27	24,09	17,86	22,65
21	25	14,3	27	21,10	14,34	19,54
22	14,3	20	27	25,22	19,03	23,79
23	20	20	27	22,32	15,29	20,70
24	25	20	27	20,93	13,45	19,22
25	14,3	25	27	23,86	17,47	22,41
26	20	25	27	21,68	14,62	20,07
27	25	25	27	19,77	12,19	18,04

Tabla 2.5. Transmisiones medias de los tejidos de Algodón

En la tabla se observa que la transmitancia media en el UVA se sitúa entre un 29,57% para el tejido más ligero y un 19,77% para el tejido más compacto, la transmitancia media en el UVB entre un 23,91% y un 12,19%, dando un total de transmitancia en todo el espectro ultravioleta que va entre el 28,25% y el 18,04%. Por lo tanto, todos los tejidos de Algodón bloquean parte de la radiación ultravioleta, pero transmiten una cantidad de radiación de valor muy elevado, muy por encima del 6,7% que, según, la norma AS/NZ 4339:1996, es la transmisión mínima para que el tejido se pueda considerar protector. El bloqueo de radiación ultravioleta por parte de los tejidos de Algodón es insuficiente para proporcionar protección, como se comprobará cuando se presenten los resultados del apartado siguiente 2.3.1.1.2.



Una primera apreciación visual de los resultados permite observar que a medida que aumenta el título del hilo de urdimbre o el título del hilo de trama o la densidad de pasadas va disminuyendo la cantidad de radiación ultravioleta UVR, UVA y UVB transmitida a través del tejido. Teniendo en cuenta la fórmula de cálculo del UPF, la disminución de la transmisión de radiación producirá un aumento del UPF al aumentar el valor de cualquiera de las variables. En apartados posteriores, se analizará si la aparente influencia de cada una de las variables del sistema sobre el valor del UPF es significativa y dicha influencia se cuantificará estadísticamente.

2.3.1.1.1.2. Tejidos de Modal

La Figura 2.4 muestra los espectros de transmisión en el ultravioleta obtenidos en la medida de los tejidos de Modal.

De igual forma que los espectros obtenidos para los tejidos de Algodón, se puede observar que la transmisión en función de la longitud de onda presenta una curva de forma ascendente. Es decir, la transmisión es menor en las longitudes más bajas correspondientes al inicio del espectro UVB (290 – 315 nm) y va aumentando al aumentar la longitud de onda hacia la zona del espectro UVA (315 – 400 nm).

Si se calculan las transmisiones medias en el UVA, en el UVB y en el total del espectro ultravioleta UVR, se obtienen los resultados expuestos en la Tabla 2.6.

En la tabla se observa que la transmitancia media en el UVA se sitúa entre un 28,84% para el tejido más ligero y un 12,85% para el tejido más compacto, la transmitancia media en el UVB entre un 20,63% y un 5,18%, dando un total de transmitancia en todo el espectro ultravioleta que va entre el 26,98% y el 11,14%. El bloqueo de la radiación ultravioleta ejercido por los tejidos de Modal es, por lo tanto, mayor que el proporcionado por los tejidos de Algodón. Pero tampoco en este caso los valores de transmisión obtenidos son suficientemente bajos, en general, para proporcionar protección a los tejidos fabricados con esta fibra y dentro de los intervalos en los valores de las variables estudiados en este estudio.

También se aprecia visualmente en esta serie que un aumento en el número de los hilos de urdimbre o de trama o un aumento en la densidad de pasadas, provoca un mayor bloqueo de la radiación UVR por parte del tejido y, por lo tanto, un aumento en su factor de protección UPF. Posteriormente, se cuantificará estadísticamente la influencia de cada una de las variables del sistema en el valor del UPF.



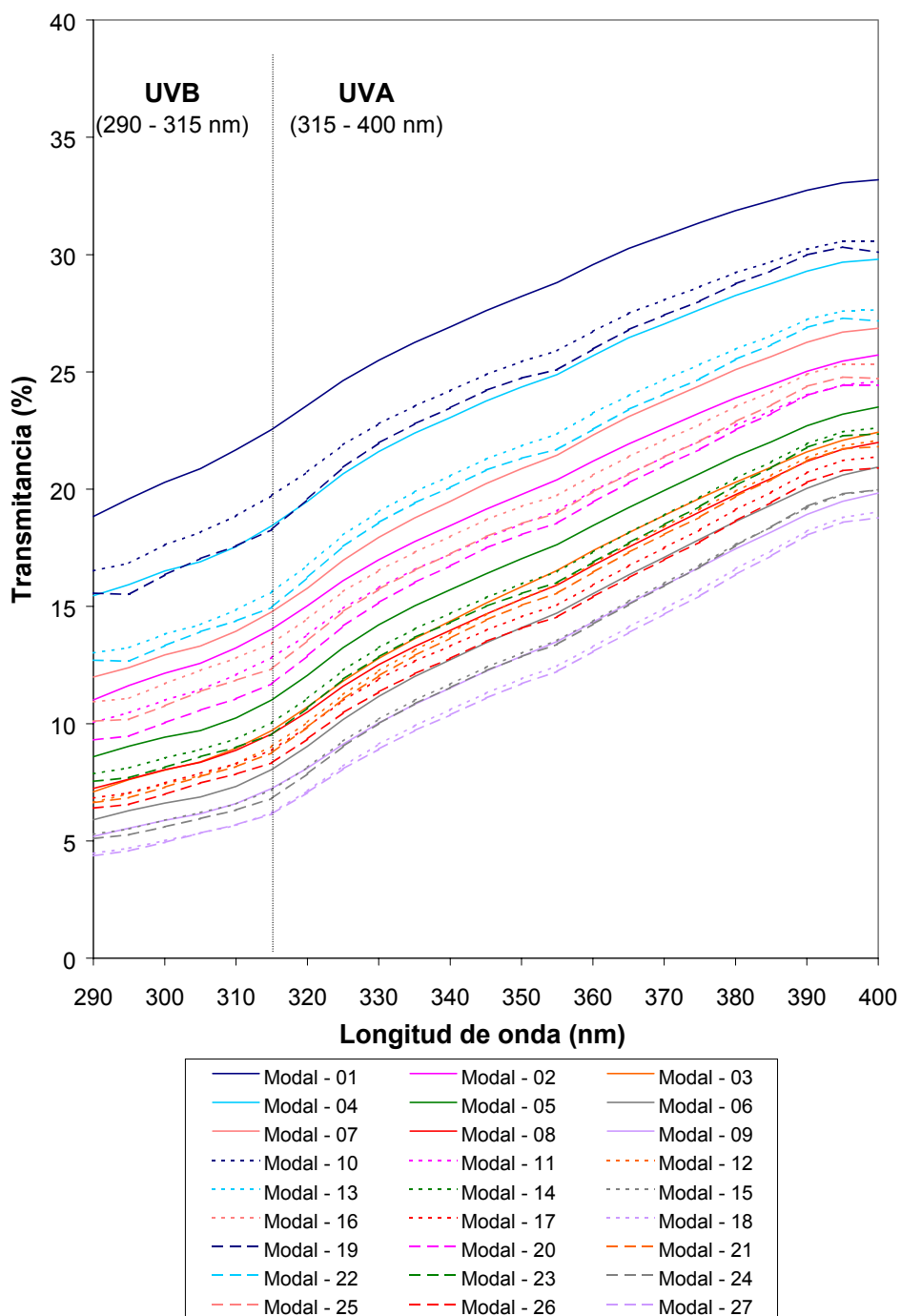


Figura 2.4. Espectros de transmisión en el ultravioleta de los tejidos de Modal



Muestra nº	Título hilo urdimbre (tex)	Título hilo trama (tex)	Densidad de pasadas (hilos/cm)	T(UVA) media (315 - 400 nm)	T(UVB) media (290 - 315 nm)	T(UVR) media (290 - 400 nm)
1	14,3	14,3	23	28,84	20,63	26,98
2	20	14,3	23	20,62	12,44	18,77
3	25	14,3	23	16,77	8,29	14,86
4	14,3	20	23	25,07	16,80	23,20
5	20	20	23	17,96	9,67	16,10
6	25	20	23	15,10	6,84	13,25
7	14,3	25	23	21,69	13,22	19,78
8	20	25	23	16,33	8,28	14,53
9	25	25	23	13,96	6,10	12,20
10	14,3	14,3	25	26,12	17,95	24,27
11	20	14,3	25	19,43	11,31	17,60
12	25	14,3	25	16,29	7,70	14,37
13	14,3	20	25	22,64	14,13	20,72
14	20	20	25	16,99	8,80	15,15
15	25	20	25	14,09	6,11	12,31
16	14,3	25	25	20,17	12,03	18,34
17	20	25	25	15,66	7,73	13,89
18	25	25	25	13,05	5,23	11,30
19	14,3	14,3	27	25,43	16,72	23,47
20	20	14,3	27	18,99	10,36	17,05
21	25	14,3	27	16,04	7,57	14,15
22	14,3	20	27	22,13	13,66	20,23
23	20	20	27	16,63	8,42	14,79
24	25	20	27	13,97	5,84	12,16
25	14,3	25	27	19,44	11,10	17,57
26	20	25	27	15,16	7,26	13,40
27	25	25	27	12,85	5,18	11,14

Tabla 2.6. Transmisiones medias de los tejidos de Modal

2.3.1.1.1.3. Tejidos de Modal Sun

La Figura 2.5 muestra los espectros de transmisión en el ultravioleta obtenidos en la medida de los tejidos de Modal Sun.



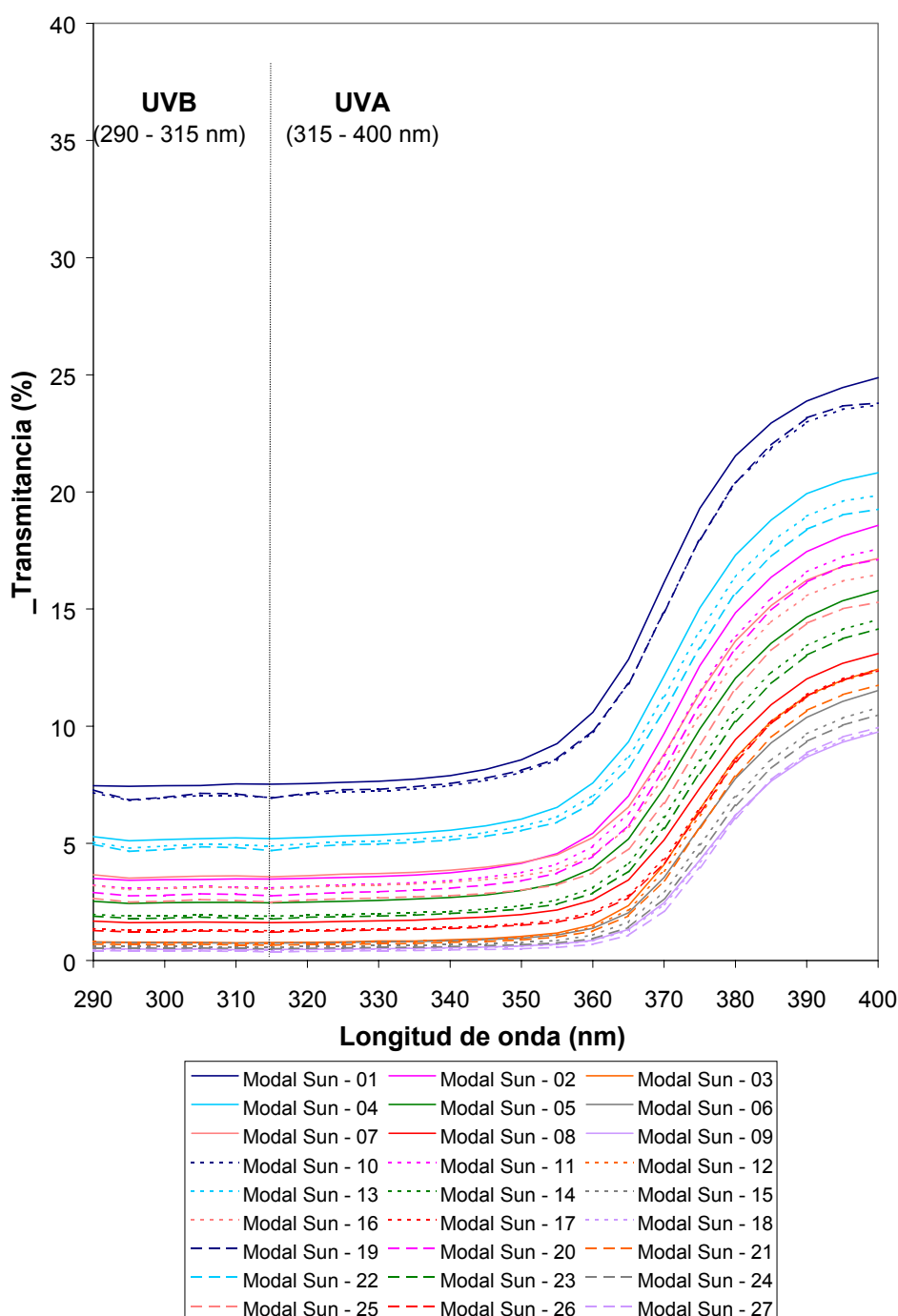


Figura 2.5. Espectros de transmisión en el ultravioleta de los tejidos de Modal Sun

En el caso de la serie de tejidos fabricados con Modal Sun, se observa una variación importante en la forma de las curvas de transmitancia en el ultravioleta. La transmisión es notablemente más baja en la zona del UVB y en la parte de longitudes de onda más bajas del UVA, aunque luego aumenta abruptamente en las zonas de longitudes altas del ultravioleta. Esta forma de la curva característica de esta fibra, es muy interesante cuando se habla de la protección proporcionada por los tejidos. La fórmula del UPF da un peso mucho mayor a las transmisiones en las zonas de longitudes bajas del ultravioleta



debido a que son las más perjudiciales para la piel humana, y considera en un grado mucho menor las de longitudes altas. Por lo tanto, esta fibra tendrá muy buenas características protectoras ya que bloquea en mayor proporción la radiación de las zonas más perjudiciales, no teniendo tanta importancia el que permita un mayor paso de la radiación en las zonas de longitudes altas.

Si se calculan las transmisiones medias en el UVA, en el UVB y en el total del espectro ultravioleta UVR, se obtienen los resultados expuestos en la Tabla 2.7.

Muestra nº	Título hilo urdimbre (tex)	Título hilo trama (tex)	Densidad de pasadas (hilos/cm)	T(UVA) media (315 - 400 nm)	T(UVB) media (290 - 315 nm)	T(UVR) media (290 - 400 nm)
1	14,3	14,3	23	13,80	7,48	12,43
2	20	14,3	23	8,56	3,46	7,45
3	29,4	14,3	23	4,28	0,78	3,52
4	14,3	20	23	10,66	5,20	9,47
5	20	20	23	6,79	2,48	5,85
6	29,4	20	23	3,90	0,76	3,22
7	14,3	29,4	23	8,11	3,59	7,12
8	20	29,4	23	5,15	1,63	4,39
9	29,4	29,4	23	3,08	0,48	2,52
10	14,3	14,3	25	13,02	6,99	11,71
11	20	14,3	25	7,94	3,13	6,90
12	29,4	14,3	25	4,19	0,76	3,45
13	14,3	20	25	10,08	4,92	8,96
14	20	20	25	5,89	1,92	5,03
15	29,4	20	25	3,50	0,60	2,87
16	14,3	29,4	25	7,45	3,10	6,51
17	20	29,4	25	4,62	1,30	3,90
18	29,4	29,4	25	3,07	0,47	2,51
19	14,3	14,3	27	13,09	7,05	11,78
20	20	14,3	27	7,53	2,81	6,50
21	29,4	14,3	27	3,90	0,68	3,20
22	14,3	20	27	9,72	4,79	8,65
23	20	20	27	5,63	1,82	4,80
24	29,4	20	27	3,31	0,53	2,70
25	14,3	29,4	27	6,61	2,55	5,73
26	20	29,4	27	4,53	1,24	3,82
27	29,4	29,4	27	3,00	0,40	2,43

Tabla 2.7. Transmisiones medias de los tejidos de Modal Sun

En la tabla se puede observar que los niveles de transmitancia obtenidos para la serie de tejidos de Modal Sun son considerablemente más bajos que para los tejidos de Algodón y Modal. Se observa que la transmitancia media en el UVA se sitúa entre un 13,80% para



el tejido más ligero y un 3,00% para el tejido más compacto, la transmitancia media en el UVB entre un 7,48% y un 0,40%, dando un total de transmitancia en todo el espectro ultravioleta entre el 12,43% y el 2,43%. El bloqueo de la radiación ultravioleta ejercido por los tejidos de Modal Sun es, por lo tanto, muy alto en general y la mayoría de los valores de transmisión obtenidos son suficientes para proporcionar protección a los tejidos. En la mayoría de los casos se consiguen transmisiones T_{UVR} medias inferiores al 6,7% (buena protección), en muchos casos transmisiones inferiores al 4,1% (muy buena protección) y alguna transmisión inferior al 2,5% (excelente protección), siempre según los valores orientativos de transmisión media para cada nivel de protección proporcionados por la norma AS/NZ 4339:1996.

También se observa en esta serie que, en general, las transmisiones disminuyen al aumentar el nivel de cualquiera de las variables del sistema. A medida que aumentan el título de los hilos y la densidad de pasadas y, por lo tanto, a medida que el tejido se va haciendo más compacto, disminuye la transmitancia espectral en el ultravioleta y aumentará, por lo tanto, su factor de protección UPF. El análisis estadístico de los resultados que se expondrá en apartados posteriores, permitirá cuantificar la influencia de cada una de las variables en el valor del UPF.

2.3.1.1.1.4. Comparación de los resultados obtenidos para las tres fibras

Para facilitar la comparación entre los resultados obtenidos para cada una de tres fibras (Algodón, Modal y Modal Sun), la Figura 2.6 muestra las curvas de transmitancia de 3 tejidos de cada una de las series, correspondientes a los niveles mínimo (tejido 1), medio (tejido 14) y máximo (tejido 27) del plan experimental. Asimismo, en la Tabla 2.8 se presentan los resultados del cálculo de las transmisiones medias en el UVA, en el UVB y en el total del espectro ultravioleta UVR, de estos tejidos.

En la figura se observa la gran diferencia que existe entre la forma de las curvas de los tejidos de Modal Sun y la de los tejidos de Algodón y Modal. La transmisión de los tejidos de Modal Sun es más baja en todas las longitudes de onda, pero es necesario destacar la importancia de que sea mucho más baja en las longitudes de onda del UVB, ya que este bloqueo es el que marcará las diferencias en el UPF. También se puede observar que los tejidos de Modal presentan en general un mayor bloqueo de la radiación que los tejidos de Algodón.

Las diferencias observadas se ven confirmadas por los resultados numéricos. En la tabla se puede observar la diferencia en las transmisiones entre las tres fibras, especialmente entre los tejidos de Modal Sun y el resto de tejidos.



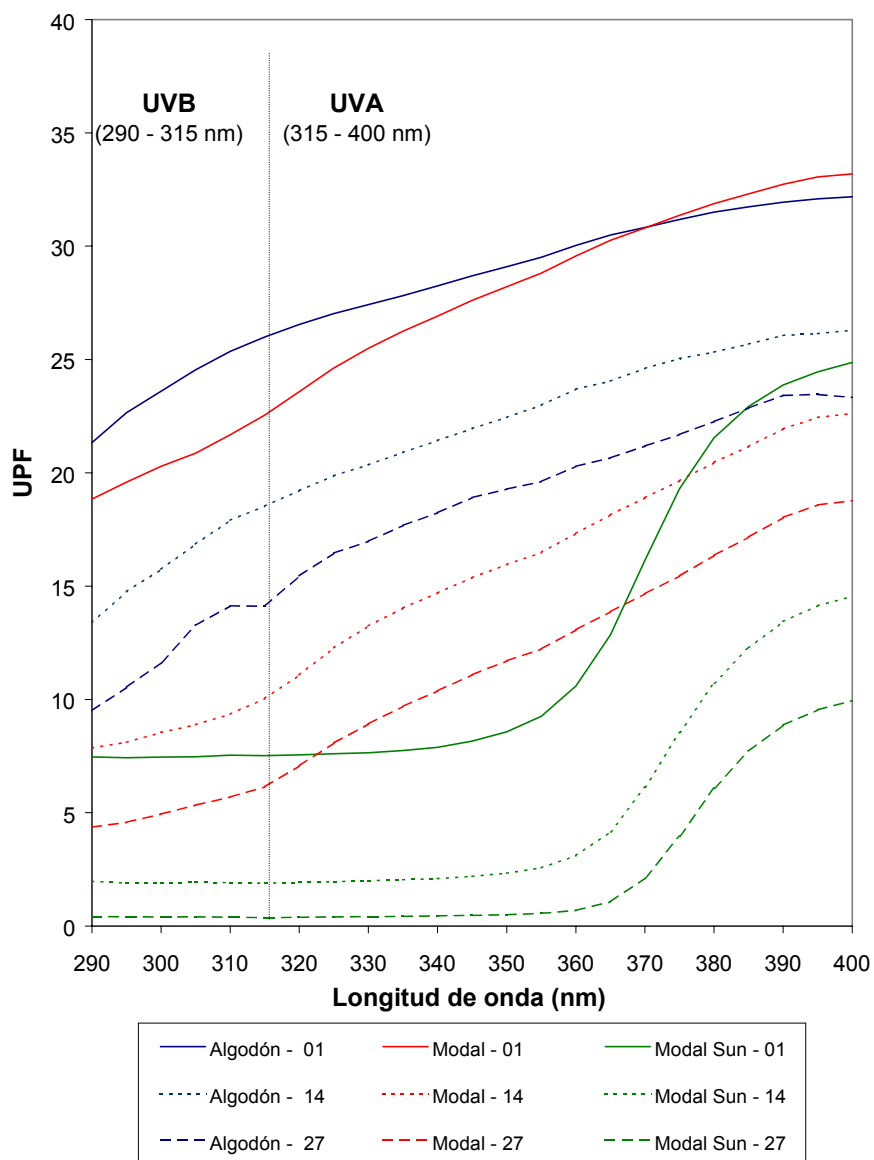


Figura 2.6. Espectros de transmisión en el ultravioleta: comparación entre Algodón, Modal y Modal Sun

Muestra nº	Título hilo urdimbre (tex)	Título hilo trama (tex)	Densidad de pasadas (hilos/cm)	T(UVA) media (315 - 400 nm)	T(UVB) media (290 - 315 nm)	T(UVR) media (290 - 400 nm)
Algodón	1	14,3	23,0	29,57	23,91	28,25
	14	20,0	25,0	23,03	16,20	21,44
	27	25,0	27,0	19,77	12,19	18,04
Modal	1	14,3	23,0	28,84	20,63	26,98
	14	20,0	25,0	16,99	8,80	15,15
	27	25,0	27,0	12,85	5,18	11,14
Modal Sun	1	14,3	23,0	13,80	7,48	12,43
	14	20,0	25,0	5,89	1,92	5,03
	27	29,4	29,4	3,00	0,40	2,43

Tabla 2.8. Transmisiones medias: comparación entre Algodón, Modal y Modal Sun



2.3.1.1.2. Factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos (UPF)

2.3.1.1.2.1. Tejidos de Algodón

Los resultados obtenidos en la medida del Factor de Protección a la Radiación Ultravioleta de los tejidos fabricados con la fibra de Algodón se exponen en la Tabla 2.9. En la tabla se muestra el UPF de cada muestra calculado según la media aritmética de 10 medidas y tras aplicar la corrección estadística especificada en la norma aplicada. En la última columna se muestra el valor del índice UPF que debería ser el utilizado en un posible etiquetado de los tejidos.

Muestra nº	Título hilo urdimbre (tex)	Título hilo trama (tex)	Densidad de pasadas (hilos/cm)	Factor de Protección Ultravioleta (UPF)	Índice UPF
1	14,3	14,3	23	3,80	1
2	20	14,3	23	4,75	1
3	25	14,3	23	5,33	5
4	14,3	20	23	4,36	1
5	20	20	23	5,43	5
6	25	20	23	6,13	5
7	14,3	25	23	4,89	5
8	20	25	23	5,98	5
9	25	25	23	6,57	5
10	14,3	14,3	25	4,06	1
11	20	14,3	25	4,86	1
12	25	14,3	25	5,74	5
13	14,3	20	25	4,54	1
14	20	20	25	5,43	5
15	25	20	25	6,35	5
16	14,3	25	25	4,96	1
17	20	25	25	5,74	5
18	25	25	25	6,66	5
19	14,3	14,3	27	4,16	1
20	20	14,3	27	5,03	5
21	25	14,3	27	6,15	5
22	14,3	20	27	4,78	1
23	20	20	27	5,67	5
24	25	20	27	6,32	5
25	14,3	25	27	5,12	5
26	20	25	27	6,00	5
27	25	25	27	6,92	5

Tabla 2.9. UPF de los tejidos de Algodón



Los resultados muestran que todos los tejidos de la serie fabricada con Algodón son muy transparentes a la radiación ultravioleta. A pesar de que algunos tejidos de la serie son de estructura bastante compacta, no se ha conseguido que ninguna de las muestras obtenga un valor de UPF suficiente como para considerar al tejido protector contra la radiación ultravioleta (mínimo valor 15). Se observa una ligera mejora del UPF de los tejidos al aumentar la compacidad de los mismos, si bien no se han producido diferencias remarcables en los niveles de protección alcanzados por las diferentes muestras utilizadas en este trabajo de investigación.

Se puede observar una tendencia del UPF de los tejidos a crecer cuando lo hacen cualquiera de las variables de fabricación que intervienen en el sistema (título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama y densidad de trama). El análisis estadístico de los resultados permitirá dilucidar si la aparente influencia de cada variable sobre el valor del UPF es significativa o no, y cuantificar dicha influencia.

2.3.1.1.2.2. Tejidos de Modal

Los resultados obtenidos en la medida del Factor de Protección a la Radiación Ultravioleta de los tejidos fabricados con la fibra de Modal se exponen en la Tabla 2.10.

Los resultados muestran que únicamente los dos tejidos más compactos de la serie fabricada con Modal pueden clasificarse como tejidos protectores contra la radiación ultravioleta, al haber obtenido valores mayores, aunque muy cercanos, al valor mínimo de 15 a partir del cual se considera que el tejido proporciona cierta protección. Se produce un aumento en el factor de protección a medida que aumenta la compacidad de los tejidos, tal como se produce para los tejidos de Algodón, aunque en los tejidos de Modal es más notoria la influencia de la estructura sobre el nivel de protección proporcionado por los tejidos. El mismo cambio en los niveles de los parámetros estructurales produce un mayor aumento en la protección proporcionada por los tejidos de Modal que en la proporcionada por los tejidos de Algodón.

También para los tejidos de Modal se puede observar una aparente tendencia del UPF de los tejidos a crecer cuando lo hacen cualquiera de las variables de fabricación que intervienen en el sistema (título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama y densidad de trama). El análisis estadístico de los resultados permitirá dilucidar si la influencia de cada variable sobre el valor del UPF es significativa o no, y cuantificar dicha influencia.



Muestra nº	Título hilo urdimbre (tex)	Título hilo trama (tex)	Densidad de pasadas (hilos/cm)	Factor de Protección Ultravioleta (UPF)	Índice UPF
1	14,3	14,3	23	4,72	1
2	20	14,3	23	7,15	5
3	25	14,3	23	10,06	10
4	14,3	20	23	5,28	5
5	20	20	23	8,91	5
6	25	20	23	12,34	10
7	14,3	25	23	6,65	5
8	20	25	23	10,20	10
9	25	25	23	13,44	10
10	14,3	14,3	25	5,12	5
11	20	14,3	25	7,72	5
12	25	14,3	25	10,73	10
13	14,3	20	25	6,34	5
14	20	20	25	9,73	5
15	25	20	25	13,21	10
16	14,3	25	25	7,38	5
17	20	25	25	11,03	10
18	25	25	25	15,53	15
19	14,3	14,3	27	5,28	5
20	20	14,3	27	8,34	5
21	25	14,3	27	10,95	10
22	14,3	20	27	6,52	5
23	20	20	27	10,03	10
24	25	20	27	14,06	10
25	14,3	25	27	7,86	5
26	20	25	27	11,39	10
27	25	25	27	15,76	15

Tabla 2.10. UPF de los tejidos de Modal

2.3.1.1.2.3. Tejidos de Modal Sun

Los resultados obtenidos en la medida del Factor de Protección a la Radiación Ultravioleta de los tejidos fabricados con la fibra de Modal Sun se exponen en la Tabla 2.11.



Muestra n°	Título hilo urdimbre (tex)	Título hilo trama (tex)	Densidad de pasadas (hilos/cm)	Factor de Protección Ultravioleta (UPF)	Índice UPF
1	14,3	14,3	23	11,48	10
2	20	14,3	23	24,88	20
3	29,4	14,3	23	93,47	50+
4	14,3	20	23	16,63	15
5	20	20	23	31,89	30
6	29,4	20	23	98,96	50+
7	14,3	29,4	23	24,09	20
8	20	29,4	23	47,48	45
9	29,4	29,4	23	155,64	50+
10	14,3	14,3	25	12,66	10
11	20	14,3	25	26,72	25
12	29,4	14,3	25	99,08	50+
13	14,3	20	25	18,01	15
14	20	20	25	43,11	40
15	29,4	20	25	113,31	50+
16	14,3	29,4	25	27,54	25
17	20	29,4	25	57,06	50+
18	29,4	29,4	25	153,10	50+
19	14,3	14,3	27	12,38	10
20	20	14,3	27	28,22	25
21	29,4	14,3	27	107,80	50+
22	14,3	20	27	17,61	15
23	20	20	27	42,16	40
24	29,4	20	27	133,41	50+
25	14,3	29,4	27	32,16	30
26	20	29,4	27	64,04	50+
27	29,4	29,4	27	179,85	50+

Tabla 2.11. UPF de los tejidos de Modal Sun

Al contrario de lo que ocurre con las series de Algodón y Modal, casi todos los tejidos de la serie fabricada con Modal Sun han resultado ser protectores contra la radiación ultravioleta. Únicamente los 3 tejidos fabricados con los hilos de urdimbre y de trama de título inferior no proporcionan suficiente protección (valor mínimo de UPF de 15). Incluso hay un considerable número de tejidos fabricados con esta fibra que llegan a alcanzar un nivel de protección excelente (con valores de UPF superiores a 40). Un pequeño aumento en la compacidad de los tejidos fabricados con la fibra de Modal Sun puede producir un aumento muy notable en la protección contra la radiación ultravioleta proporcionada por los mismos.



De igual forma que para los tejidos de Algodón y Modal, se observa una tendencia en los tejidos de Modal Sun a que aumente el UPF de los tejidos cuando aumenta el nivel de las variables del sistema. La influencia de cada variable se cuantificará posteriormente mediante el análisis estadístico de los resultados.

2.3.1.1.2.4. Comparación de los resultados obtenidos para las tres fibras

Considerando los resultados expuestos anteriormente, se puede resumir que los tejidos crudos fabricados con la fibra de Algodón son los más transparentes al paso de la radiación ultravioleta. Los tejidos fabricados con la fibra de Modal presentan un mejor comportamiento que los de Algodón, si bien la mayoría de ellos tampoco proporciona una protección suficiente. En cambio, la fibra Modal Sun ha resultado ser muy efectiva como protectora de la radiación ultravioleta, como era de esperar habiendo sido esta fibra diseñada especialmente para este fin.

Con respecto a la relación entre el UPF y los parámetros de fabricación de los tejidos todas las fibras siguen el mismo comportamiento. Aparentemente, todas las variables del sistema tienen influencia sobre el valor del UPF, de forma que al aumentar el nivel de cualquiera de ellas se consigue una mejor protección. Sin embargo, se debe recurrir al análisis estadístico de los resultados para corroborar si la influencia de las variables es significativa o no. Asimismo, permitirá cuantificar la influencia de cada una de ellas sobre el valor del UPF.

2.3.1.2. Análisis estadístico de los resultados

2.3.1.2.1. Diseño experimental: variables y niveles de las variables

Para cada serie de tejidos de diferente fibra y para cada colorante utilizado, el sistema consta de una primera variable X1 (título del hilo de urdimbre), una segunda variable X2 (título del hilo de trama) y una tercera variable X3 (densidad de trama), todas ellas con 3 niveles diferentes.

Las variables y niveles de las variables que se utilizarán en el análisis estadístico, corresponden al diseño experimental que se presentó anteriormente en la Tabla 2.4. Para facilitar el seguimiento del texto, se recuerdan ahora en la Tabla 2.12.



Muestra	ALGODÓN			MODAL			MODAL SUN		
	X1	X2	X3	X1	X2	X3	X1	X2	X3
1	14,3	14,3	23	14,3	14,3	23	14,3	14,3	23
2	20	14,3	23	20	14,3	23	20	14,3	23
3	25	14,3	23	25	14,3	23	29,4	14,3	23
4	14,3	20	23	14,3	20	23	14,3	20	23
5	20	20	23	20	20	23	20	20	23
6	25	20	23	25	20	23	29,4	20	23
7	14,3	25	23	14,3	25	23	14,3	29,4	23
8	20	25	23	20	25	23	20	29,4	23
9	25	25	23	25	25	23	29,4	29,4	23
10	14,3	14,3	25	14,3	14,3	25	14,3	14,3	25
11	20	14,3	25	20	14,3	25	20	14,3	25
12	25	14,3	25	25	14,3	25	29,4	14,3	25
13	14,3	20	25	14,3	20	25	14,3	20	25
14	20	20	25	20	20	25	20	20	25
15	25	20	25	25	20	25	29,4	20	25
16	14,3	25	25	14,3	25	25	14,3	29,4	25
17	20	25	25	20	25	25	20	29,4	25
18	25	25	25	25	25	25	29,4	29,4	25
19	14,3	14,3	27	14,3	14,3	27	14,3	14,3	27
20	20	14,3	27	20	14,3	27	20	14,3	27
21	25	14,3	27	25	14,3	27	29,4	14,3	27
22	14,3	20	27	14,3	20	27	14,3	20	27
23	20	20	27	20	20	27	20	20	27
24	25	20	27	25	20	27	29,4	20	27
25	14,3	25	27	14,3	25	27	14,3	29,4	27
26	20	25	27	20	25	27	20	29,4	27
27	25	25	27	25	25	27	29,4	29,4	27

Tabla 2.12. Variables y niveles de las variables en el análisis estadístico (Influencia de parámetros estructurales)

2.3.1.2.2. Codificación de las variables

Para llevar a cabo el análisis estadístico de unos resultados experimentales que conduzcan a la obtención de un modelo que relacione las variables del proceso (factores de control) con la respuesta, se utilizan técnicas de regresión. Cuando los modelos, además de incluir los efectos de los factores, incorporan también efectos cuadráticos e interacciones dobles o triples es casi seguro que se pueden presentar problemas, en el cálculo matricial inherente, debidos a la envergadura de los valores y/o a su disparidad. La envergadura de los valores puede dar lugar a problemas de cálculo debidos al mal condicionamiento de la matriz del modelo. La disparidad de los valores pueden afectar al



modelo resultante, pudiéndose obtener modelos que, aunque perfectamente válidos para describir el valor de la respuesta, pueden engrandecer la significación de efectos dobles e interacciones y a la vez enmascarar la significación de los efectos simples, lo que desde el punto de vista técnico es poco útil a la hora de buscar la optimización de los sistemas.

Para evitar estos problemas es por lo que siempre es deseable que los niveles de los factores de control sean equidistantes, como ocurre, por ejemplo, en todos los diseños de la familia de los factoriales. En esta situación, el primer paso es codificar los factores mediante un cambio de origen y un cambio de escala, que dé lugar a otros, los codificados, cuyos valores sean enteros, equidistantes y lo más pequeños posible (-1, 0 y 1 si se dispone de tres niveles). Con esta codificación se consigue que todos los factores y todas las interacciones tengan el mismo intervalo de valores con lo que, además de ciertas propiedades estadísticas debidas a la ortogonalidad, los coeficientes de los términos del modelo serán directamente comparables, es decir, el mayor efecto se corresponderá con el mayor coeficiente (en valor absoluto).

Utilizando variables codificadas se puede observar perfectamente el efecto de cada variable y sus interacciones en el valor de la respuesta, y dilucidar cuales de esos efectos e interacciones tienen una influencia mayor en el mismo.

El requisito para poder realizar la codificación de las variables del plan experimental es que los niveles de cada variable sean equidistantes. Los niveles de la variable X3 (densidad de trama) no presentan ningún problema para su codificación ya que lo son. Sin embargo, los niveles de las variables X1 (título del hilo de urdimbre) y X2 (título del hilo de trama) no nos permiten una codificación, al no ser valores equidistantes. La dificultad en la obtención de hilados de los títulos requeridos no ha permitido utilizar niveles equidistantes de estas variables y se han tenido que utilizar hilos de títulos comerciales, aunque se ha intentado que fueran lo más equidistantes posible.

Debido a esta dificultad, en principio se intentó modelizar las respuestas a partir de las variables no codificadas. En el análisis el elevado valor de sus niveles hizo que las interacciones dobles y triples obtuvieran un peso mucho más elevado que los efectos simples, es decir, las interacciones ocultaron la influencia aportada por los efectos simples. Los modelos obtenidos de esta forma son perfectamente aceptables si se analizan desde el punto de vista matemático. Sin embargo, bajo la perspectiva de la tecnología textil, los modelos no resultan válidos ni útiles para su aplicación en la práctica industrial.

Teniendo en cuenta la utilidad de la codificación para evitar este problema, se ha debido buscar una forma de realizar el análisis teniendo los niveles de todas las variables lo más cercanos a -1, 0 y +1 que sea posible. La solución adoptada ha sido realizar una pseudocodificación de las variables, en la que se ha aplicado a cada nivel de cada variable las fórmulas que se muestran a continuación.



2.3.1.2.2.1. Algodón

Se han utilizado las siguientes fórmulas de codificación:

$$\text{Variable codificada título del hilo de urdimbre } A = \frac{X1 - \overline{X1}}{5}$$

$$\text{Variable codificada título del hilo de trama } B = \frac{X2 - \overline{X2}}{5}$$

$$\text{Variable codificada densidad de trama } C = \frac{X3 - \overline{X3}}{2}$$

Aplicando las fórmulas anteriores se obtienen los niveles codificados de las variables para los tejidos de Algodón que se exponen en la tabla siguiente:

ALGODÓN			
Variable	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
A	-1,09333	0,04667	1,04667
B	-1,09333	0,04667	1,04667
C	-1	0	1

Tabla 2.13. Variables codificadas para los tejidos de Algodón

2.3.1.2.2.2. Modal

Se han utilizado las siguientes fórmulas de codificación:

$$\text{Variable codificada título del hilo de urdimbre } A = \frac{X1 - \overline{X1}}{5}$$

$$\text{Variable codificada título del hilo de trama } B = \frac{X2 - \overline{X2}}{5}$$

$$\text{Variable codificada densidad de trama } C = \frac{X3 - \overline{X3}}{2}$$

Aplicando las fórmulas de codificación anteriores se obtienen los niveles codificados de las variables para los tejidos de Modal que se exponen en la tabla siguiente:

MODAL			
Variable	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
A	-1,09333	0,04667	1,04667
B	-1,09333	0,04667	1,04667
C	-1	0	+1

Tabla 2.14. Variables codificadas para los tejidos de Modal



2.3.1.2.2.3. Modal Sun

Se han utilizado las siguientes fórmulas de codificación:

$$\text{Variable codificada título del hilo de urdimbre } A = \frac{X1 - \overline{X1}}{7}$$

$$\text{Variable codificada título del hilo de trama } B = \frac{X2 - \overline{X2}}{7}$$

$$\text{Variable codificada densidad de trama } C = \frac{X3 - \overline{X3}}{2}$$

Aplicando las fórmulas de codificación anteriores se obtienen los niveles codificados de las variables para los tejidos de Algodón que se exponen en la tabla siguiente:

MODAL SUN			
Variable	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
A	-0,99048	-0,17619	1,16667
B	-0,99048	-0,17619	1,16667
C	-1	0	+1

Tabla 2.15. Variables codificadas para los tejidos de Modal Sun

2.3.1.2.3. Modelo inicial

La dificultad para obtener valores equidistantes de algunas de las variables, no ha permitido utilizar un diseño factorial propiamente dicho, por lo que el análisis estadístico de los resultados para la modelización de la respuesta, se debe realizar por modelo lineal. El modelo lineal estima la dependencia entre la respuesta UPF y el vector de variables X_i , no aleatorias, denominadas regresores o factores de control del proceso.

Para aplicar el modelo lineal se trabaja con una hipótesis de trabajo: se supone que el término aleatorio u oscilación aleatoria de la respuesta UPF alrededor de su valor medio, que se representa por ε , sigue una ley normal de media 0 y variancia σ^2 , y que este error para cada nivel de cualquier regresor ε_i es independiente y de variancia constante. Esta hipótesis debe corroborarse una vez obtenido el modelo definitivo.

Los requisitos para construir el modelo son los siguientes:

- el modelo lo define el usuario
- el número máximo de parámetros β_i es el número de experiencias distintas realizadas
- el máximo grado o exponente de un factor es el número de niveles diferentes del factor menos uno

En la presente experimentación se han obtenido 27 puntos experimentales distintos, por lo que el modelo puede tener hasta 27 sumandos. Cada variable tiene 3 niveles distintos,



por lo que se pueden utilizar hasta términos cuadráticos. Con ello se puede construir el modelo inicial, que es el siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot A + \beta_2 \cdot B + \beta_3 \cdot C + \beta_{12} \cdot A \cdot B + \beta_{13} \cdot A \cdot C + \beta_{23} \cdot B \cdot C + \beta_{11} \cdot A^2 + \beta_{22} \cdot B^2 + \beta_{33} \cdot C^2 + \beta_{123} \cdot A \cdot B \cdot C + \varepsilon$$

2.3.1.2.4. Procedimiento de análisis para la estimación del modelo significativo y coeficiente de determinación del ajuste

La estimación de los coeficientes significativos del modelo para cada respuesta se realiza mediante el método denominado regresión paso a paso (Stepwise Regression). Este procedimiento obtiene directamente la regresión significativa a partir del modelo inicial. Puede realizarse según dos modalidades:

- Hacia delante o Forward: en cada paso del procedimiento la modalidad Forward calcula los estadísticos F (cuadrados de las T de Student) que asociaría a los términos de la función, ajustada hasta aquel paso, incrementada en cada uno de los regresores que aún no se han incorporado, y escoge, para incorporarlos, aquel que presente una F más grande. Es decir, partiendo de una función sin ningún término en cada paso incorpora el regresor más significativo. El procedimiento continúa hasta que todos los regresores aún no introducidos dan una F más pequeña que la prefijada.
- Hacia atrás o Backward: en esta modalidad se parte de la estimación de una función completa, con todos los términos del modelo inicial. En cada paso del procedimiento se elimina aquel regresor que presenta la F más pequeña y menor que la prefijada. La función se reestima sin el término eliminado y se analiza si conviene eliminar otro regresor, reiterando el análisis hasta que todas las F son más grandes que la prefijada.

Se ha decidido utilizar la modalidad Forward en la regresión paso a paso. Como valor de F crítico para decidir si un regresor se introduce o no en el modelo se ha utilizado un valor de 4,00 que es el valor por defecto, asociados a un riesgo no muy distinto del 5%.

El procedimiento de regresión paso a paso proporciona una estimación final de los regresores significativos y el valor estimado de los coeficientes correspondientes a los regresores significativos y al término independiente del modelo.

La significación de cada uno de los coeficientes se comprueba obteniendo su nivel de significación (o p-value), mediante el uso del estadístico t de Student. Se considera que el coeficiente es significativo si su nivel de significación es menor que el error α , que se ha fijado como predeterminado en un valor del 5% y que representa el riesgo de que se incluya el regresor en el modelo no siendo en realidad significativo.



De igual forma se comprueba a continuación la significación del ajuste del modelo completo, que se obtiene mediante el cálculo del ANOVA de la regresión. Para ello se utiliza el estadístico F de Snedecor y se obtiene mediante tablas el nivel de significación (p-value) correspondiente al valor F obtenido para el modelo completo. Una vez más, se considera que el modelo es significativo si su nivel de significación es menor que el error α , que se ha fijado como predeterminado en un valor del 5%.

El ANOVA de la regresión también proporciona el valor de σ^2 que se considera el mejor estimador de la variancia del componente aleatorio. Asimismo proporciona el valor del coeficiente de determinación del ajuste R^2 , que permite analizar qué porcentaje de la variabilidad total de la respuesta es explicado por el modelo.

Para la validación final del modelo es necesario analizar a continuación los gráficos de residuos del modelo definitivo. Cualquier irregularidad en la forma de los gráficos de residuos proporciona determinada información que debe tenerse en cuenta para admitir o no el modelo.

- Gráficos de residuos en función de la respuesta UPF: proporciona una comprobación de la hipótesis de variabilidad es constante. Si los residuos forman una nube sin ninguna forma determinada se confirma que la variabilidad es constante. Si tienen forma de trompeta, mariposa o barril indican que la variabilidad no es constante y se deben realizar réplicas de los experimentos para modelizar dicha variabilidad e incorporarla al modelo definitivo.
- Gráfico de residuos en función del índice: indica si la variabilidad ha cambiado en función del orden de realización de los ensayos, caso en el que se podría afirmar que la experimentación no se ha realizado de forma correcta o ha aparecido una fuente de variabilidad incontrolada durante la experimentación.
- Gráficos de residuos en función de los regresores: indican si la variabilidad no es constante y si depende de los niveles de algún regresor (forma de trompeta, mariposa o barril) o bien si falta algún término cuadrático en el modelo (los residuos se pueden unir según una parábola).
- Gráfico probabilístico normal de los residuos: si los gráficos anteriores no han evidenciado ningún problema, éste gráfico confirma o no la hipótesis de la normalidad del componente aleatorio. Si esta hipótesis es correcta, los valores de los residuos deben envolver una línea recta, mientras que en caso contrario se observan 2 o más pendientes diferentes.



2.3.1.2.5. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Algodón

2.3.1.2.5.1. Regresión paso a paso

El análisis se ha llevado a cabo mediante el software estadístico Statgraphics 7.0. A modo de ejemplo, en este primer análisis se exponen todas las etapas de la regresión paso a paso obtenidas en el análisis por modelo lineal de los resultados. En cada uno de los pasos se introduce en el modelo el término con mayor significación, es decir, con un valor de F mayor, siempre que dicho valor sea mayor que 4. Este apartado se suprimirá en posteriores modelizaciones, indicándose únicamente la estimación final, ya que no aporta información importante.

```
Stepwise Selection for UPFa
-----
Selection: Forward          Maximum steps: 500          F-to-enter: 4.00
Control: Manual             Step: 0                     F-to-remove: 4.00
R-squared: .00000          Adjusted: .00000           MSE: 0.711965       d.f.: 26
Variables in Model         Coeff.  F-Remove  Variables Not in Model P.Corr.  F-Enter
-----
```

Variables in Model	Coeff.	F-Remove	Variables Not in Model	P.Corr.	F-Enter
1. A	.8504	65.3289			
2. B	.4859	7.7270			
3. C	.1589	.6473			
4. A*A	.0997	.2512			
5. A*B	.0014	.0000			
6. A*C	.0223	.0124			
7. B*B	.0741	.1380			
8. B*C	.0575	.0829			
9. C*C	.0164	.0068			
10. A*B*C	.0304	.0232			

```
Stepwise Selection for UPFa
-----
Selection: Forward          Maximum steps: 500          F-to-enter: 4.00
Control: Manual             Step: 1                     F-to-remove: 4.00
R-squared: .72323          Adjusted: .71216           MSE: 0.20493       d.f.: 25
Variables in Model         Coeff.  F-Remove  Variables Not in Model P.Corr.  F-Enter
-----
```

Variables in Model	Coeff.	F-Remove	Variables Not in Model	P.Corr.	F-Enter
1. A	0.80543	65.3289	2. B	.9236	139.3610
			3. C	.3020	2.4083
			4. A*A	.0069	.0012
			5. A*B	.0027	.0002
			6. A*C	.0423	.0431
			7. B*B	.1409	.4858
			8. B*C	.1093	.2902
			9. C*C	.0313	.0235
			10. A*B*C	.0579	.0806

```
Stepwise Selection for UPFa
-----
Selection: Forward          Maximum steps: 500          F-to-enter: 4.00
Control: Manual             Step: 2                     F-to-remove: 4.00
R-squared: .95934          Adjusted: .95595           MSE: 0.0313615     d.f.: 24
Variables in Model         Coeff.  F-Remove  Variables Not in Model P.Corr.  F-Enter
-----
```

Variables in Model	Coeff.	F-Remove	Variables Not in Model	P.Corr.	F-Enter
1. A	0.80543	426.8881	3. C	.7879	37.6457
2. B	0.46019	139.3610	4. A*A	.0181	.0075
			5. A*B	.0070	.0011
			6. A*C	.1104	.2839
			7. B*B	.0958	.2129
			8. B*C	.2852	2.0359
			9. C*C	.0816	.1540
			10. A*B*C	.1510	.5363



variancia, con la variancia obtenida mediante la repetición tres veces de la experiencia en el centro del plan.

Analysis of Variance for the Full Regression					
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	18.2868	4	4.57171	448.514	.0000
Error	0.224247	22	0.0101930		
Total (Corr.)	18.5111	26			
R-squared = 0.987886			Std. error of est. = 0.100961		

Se obtiene un coeficiente de determinación (R^2) del modelo de valor bastante alto (98,79%). También se obtiene, la estimación de la variancia σ^2

$$\hat{\sigma}^2 = 0,0102 \quad \nu = 22$$

Para calcular la media y la variancia de las repeticiones en el centro se utilizan los valores obtenidos mediante las tres repeticiones del punto experimental central, que se exponen en la tabla siguiente:

Orden	A	B	C	UPF _a
14 (R1)	0,04667	0,04667	0	5,40
14 (R2)	0,04667	0,04667	0	5,46
14 (R3)	0,04667	0,04667	0	5,58

Tabla 2.16. Valores de la respuesta UPF de las repeticiones en el punto central

La media y variancia de las repeticiones en el centro serán las siguientes:

$$\bar{Y}_C = \frac{\sum_{i=1}^3 Y_{iC}}{3} = \frac{5,40 + 5,46 + 5,58}{3} = 5,48$$

$$S_C^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_{iC} - \bar{Y}_C)^2}{3 - 1} = \frac{(5,40 - 5,48)^2 + (5,46 - 5,48)^2 + (5,58 - 5,48)^2}{2} = 0,0084$$

Las variancias se deben comparar dividiendo la variancia obtenida mediante la realización de las tres repeticiones en el punto central del plan experimental, por el valor estimado obtenido mediante el ANOVA de la regresión.

$$F = \frac{S_C^2}{\hat{\sigma}^2} = \frac{0,0084}{0,0102} = 0,8235$$

Para $\nu = 22$, 3 repeticiones en el centro y un riesgo $\alpha = 0,05$ los valores de F deben estar comprendidos entre $F_i = 0,0253$ y $F_s = 4,3828$, según tablas estadísticas. El valor de F obtenido está comprendido en este intervalo, por lo que no se manifiesta heterogeneidad de variancias.



Sin embargo, esta prueba no es muy potente y puede ser confirmada mediante los gráficos de residuos de la respuesta.

2.3.1.2.5.4. Gráficos de residuos de la respuesta y gráfico probabilístico normal

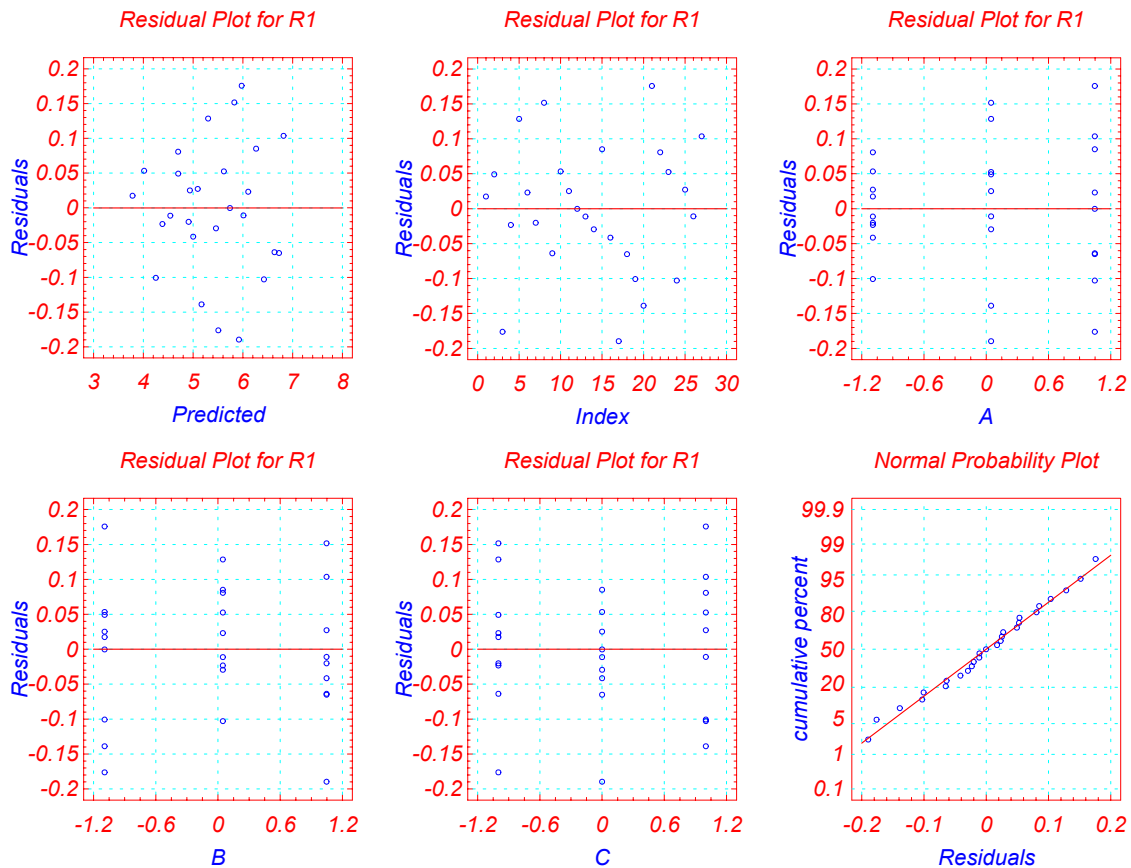


Figura 2.7. Gráficos de residuos y probabilístico normal de la respuesta UPF, tejidos de Algodón

No se observa ninguna anomalía en los gráficos de residuos por lo que la hipótesis inicial de variancia constante es admisible. Los coeficientes del modelo estimado son correctos.

2.3.1.2.5.5. Modelo definitivo

El modelo definitivo que estima el valor de la respuesta UPF en función de los parámetros de fabricación de los tejidos es el siguiente, en variables codificadas:

$$UPFa = 5,4004 + 0,8054 \cdot A + 0,4602 \cdot B + 0,1611 \cdot C - 0,0667 \cdot B \cdot C$$

Con un coeficiente de determinación del modelo de $R^2 = 98,79\%$.

Al descodificar, se obtiene el siguiente modelo en variables originales:

$$UPFa = -4,9128 + 0,1611 \cdot X1 + 0,2588 \cdot X2 + 0,2124 \cdot X3 - 0,0067 \cdot X2 \cdot X3$$

La discusión de los resultados se referirá siempre al modelo en variables codificadas, ya que, en este caso, los niveles de las variables son similares para todas ellas y el peso de



esos niveles es el mismo en efectos e interacciones. Con ello se puede observar fácilmente el efecto de cada variable y sus interacciones en el valor de la respuesta, y comparar cuales de esos efectos e interacciones tiene una influencia mayor en el mismo.

Así pues, el modelo en variables codificadas indica que todas las variables del sistema tienen influencia en el UPF de los tejidos, al tener todas ellas coeficientes significativos. Estos coeficientes son, además, de signo positivo, lo que indica que al aumentar el nivel de las variables, aumentará también el valor de la respuesta.

El efecto simple y, por lo tanto la variable, que tiene una mayor influencia sobre la respuesta es el título del hilo de urdimbre (variable codificada A, con un coeficiente de 0,8054), seguida del título del hilo de trama (variable codificada B, con un coeficiente de 0,4602) y, por último la densidad de pasadas (variable codificada C, con un coeficiente de 0,1611). Además, la interacción de las variables B y C, presenta una influencia de signo negativo, aunque su coeficiente es el de valor más pequeño (-0,0667). Si se consideran los niveles de significación expuestos en el apartado 2.3.1.2.5.2 este coeficiente es también el de menor nivel de significación (sig. level 0,0227 frente a 0,0000 de las demás variables). El coeficiente negativo de esta interacción produce una ralentización en el aumento del valor de la respuesta UPF al aumentar cualquiera de las variables que intervienen en la interacción (título del hilo de trama y densidad de trama).

2.3.1.2.5.6. Superficies de respuesta y curvas de nivel

Las superficies de respuesta proporcionan una imagen tridimensional de los valores de la respuesta, según el modelo estimado.

Mediante la representación gráfica de las curvas de nivel se pueden dilucidar fácilmente los niveles de las variables que proporcionarán un determinado valor de la respuesta UPF. Por ejemplo, si se requiere obtener un nivel de UPF de valor 5 las curvas de nivel muestran todas las posibilidades de combinación que dan un valor de la respuesta de 5, por ejemplo: $X_1 = 23$, $X_2 = 14,3$ y $X_3 = 22$ (ver Figura 2.8)

Tanto las superficies de respuesta como las curvas de nivel, sólo permiten la representación de la respuesta en función de dos variables, por lo que se han representado las dos que tienen una mayor influencia (título del hilo de urdimbre y título del hilo de trama). En la figura se han dibujado tres superficies correspondientes a los valores mínimo, medio y máximo de la variable que se omite (densidad de trama).

La Figura 2.8 muestra las superficies de respuesta y las curvas de nivel del modelo obtenido para los tejidos de Algodón en función de las variables codificadas de fabricación de los tejidos: título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama y densidad de trama. Cabe señalar que las superficies de respuesta y las curvas de nivel presentarían exactamente la misma forma si se representan en función de las variables originales (no codificadas), cambiando únicamente los valores numéricos en los ejes de las variables.



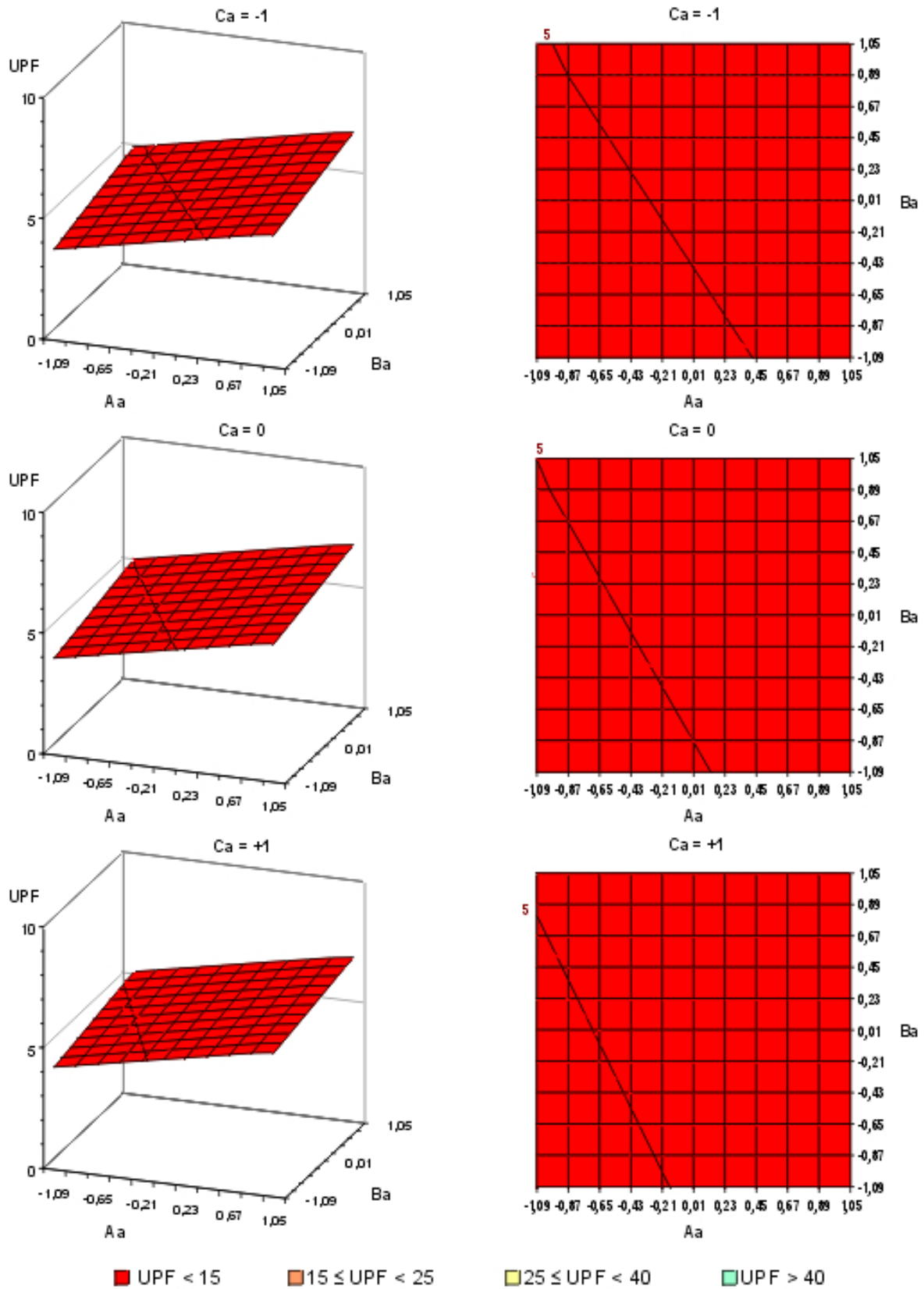


Figura 2.8. Superficies de respuesta UPF y curvas de nivel, tejidos de Algodón



En ésta y en posteriores superficies de respuesta y curvas de nivel, se han dibujado las curvas correspondientes a valores de UPF múltiplos de 5, según los intervalos de UPF a efectos de clasificación y etiquetado contemplados en la norma AS/NZ 4339:1996. Los colores en las gráficas distinguen entre las zonas de UPF en que se divide el nivel de protección contra la radiación ultravioleta que proporcionan los artículos textiles. Siguiendo las directrices de la norma AS/NZ 4339:1996, se han representado en color rojo las zonas que no proporcionan protección ($UPF < 15$), en color naranja las de buena protección ($15 \leq UPF < 25$), en color amarillo las de muy buena protección ($25 \leq UPF < 40$) y en color verde las de protección excelente ($UPF \geq 40$).

En la figura se aprecia el bajo nivel de protección alcanzado por todos los tejidos fabricados en este estudio a partir de la fibra de Algodón. El color totalmente rojo de las superficies de respuesta y de las curvas de nivel indica que ninguno de los tejidos analizados llega a alcanzar un nivel mínimo de protección.

Al tener todas las variables un coeficiente positivo en el modelo estimado, no existir interacción entre A y B y no ser significativo ningún término cuadrático, las curvas de nivel son rectas paralelas y en diagonal creciente. La respuesta UPF aumentará al aumentar el nivel de cualquiera de las variables.

La tendencia de las curvas de nivel a presentar una acusada verticalidad es indicativa de la mayor influencia de la variable X1 título del hilo de urdimbre que de la variable X2 título del hilo de trama. El aumento de la respuesta UPF es más rápido al desplazarnos por el eje de la variable título del hilo de urdimbre, como corresponde al ser esta variable la que tiene un coeficiente más alto en el modelo estimado y no ser frenado su efecto por la interacción negativa con cualquiera de las otras variables.

Si se observan las tres superficies o curvas correspondientes a los niveles mínimo, medio y máximo de la variable X3 se puede apreciar que son bastante similares, aunque un aumento en esta variable también produce un ligero aumento en el valor de la respuesta UPF.

2.3.1.2.6. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal

2.3.1.2.6.1. Estimación final

El análisis estadístico de los resultados mediante regresión paso a paso proporciona la siguiente estimación final de los coeficientes significativos del modelo que relaciona la respuesta UPF de los tejidos de Modal en función de las variables del sistema:



Model fitting results for: UPFm

Independent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level
CONSTANT	9.411789	0.10874	86.5527	0.0000
A	3.177688	0.055838	56.9092	0.0000
B	1.516371	0.05548	27.3318	0.0000
C	0.635556	0.059406	10.6985	0.0000
A*A	0.302928	0.090323	3.3538	0.0035
A*B	0.455498	0.063459	7.1779	0.0000
A*C	0.147726	0.067949	2.1741	0.0433
B*C	0.16312	0.067949	2.4006	0.0274
C*C	-0.257778	0.102894	-2.5053	0.0221

2.3.1.2.6.2. Estudio de la heterogeneidad de variancias

El ANOVA de la regresión correspondiente al modelo estimado es el que se presenta a continuación:

Analysis of Variance for the Full Regression

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-value
Model	265.403	8	33.1753	522.252	.0000
Error	1.14342	18	0.0635235		
Total (Corr.)	266.546	26			

R-squared = 0.99571 Std. error of est. = 0.252039

Se obtiene un coeficiente de determinación del modelo R^2 de valor muy alto (99,57%). Asimismo se obtiene la estimación de la variancia σ^2

$$\sigma^2 = 0,0635 \quad \nu = 18$$

Para calcular la media y la variancia de las repeticiones en el centro se utilizan los valores obtenidos añadiendo las tres repeticiones del punto experimental central, que se exponen en la tabla siguiente:

Orden	A	B	C	UPF _m
14 (R1)	0,04667	0,04667	0	9,34
14 (R2)	0,04667	0,04667	0	9,05
14 (R3)	0,04667	0,04667	0	9,20

Tabla 2.17. Valores de la respuesta UPF de las repeticiones en el punto central

A partir de estos valores se calculan media y la variancia de las repeticiones en el centro:

$$\bar{Y}_C = \frac{\sum_{i=1}^3 Y_{iC}}{3} = \frac{9,34 + 9,05 + 9,20}{3} = 9,20$$

$$S_C^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (Y_{iC} - \bar{Y}_C)^2}{3-1} = \frac{(9,34 - 9,20)^2 + (9,05 - 9,20)^2 + (9,20 - 9,20)^2}{2} = 0,0211$$



La variancia estimada y la variancia calculada a partir de las repeticiones de la experiencia central del plan se comparan mediante el siguiente estadístico:

$$F = \frac{S_C^2}{\sigma^2} = \frac{0,0211}{0,0635} = 0,3323$$

Para $v = 18$, 3 repeticiones en el centro y un riesgo $\alpha = 0,05$, los límites superior e inferior son $F_i = 0,0254$ y $F_s = 4,5597$, por lo que no se manifiesta heterogeneidad de variancias al ser $F_i < F < F_s$.

2.3.1.2.6.3. Gráficos de residuos de la respuesta y gráfico probabilístico normal

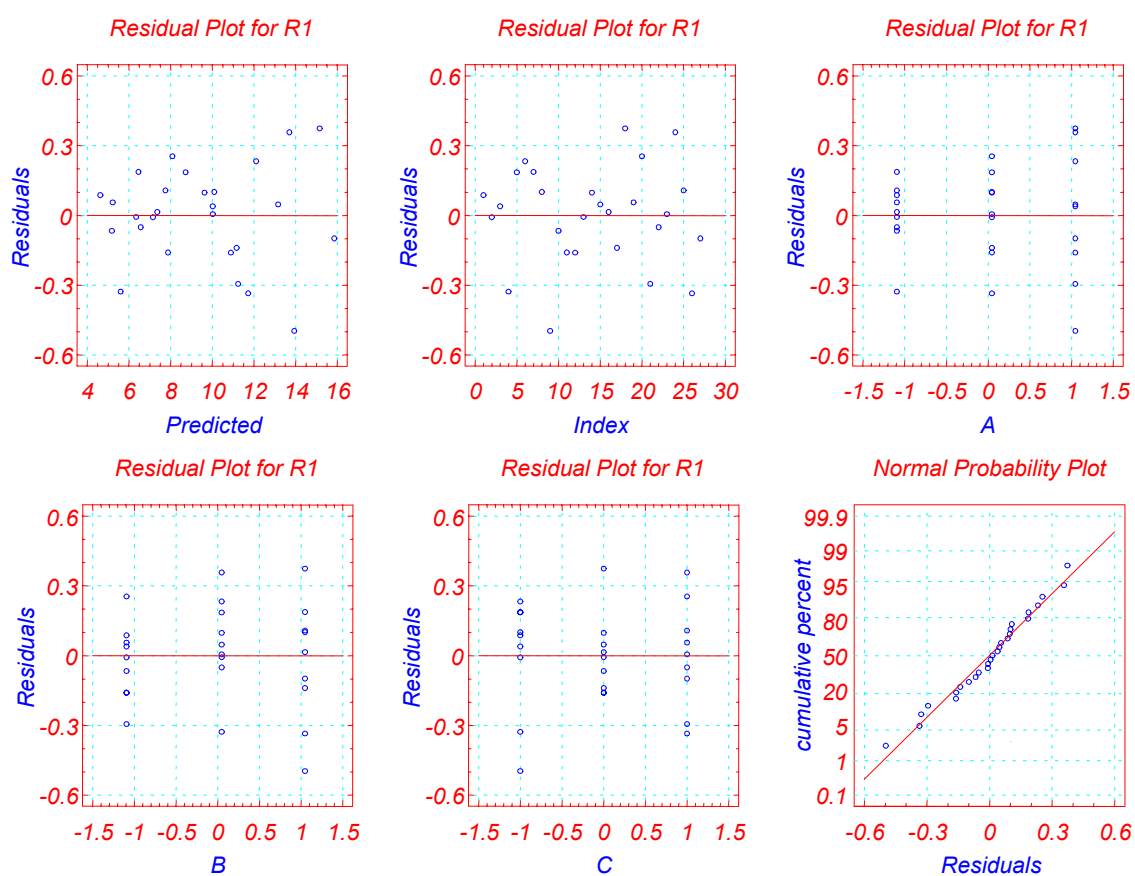


Figura 2.9. Gráficos de residuos y probabilístico normal de la respuesta UPF, tejidos de Modal

No se observa ninguna anomalía en los gráficos de residuos por lo que la hipótesis inicial de variancia constante es admisible. Los coeficientes del modelo estimado son correctos.

2.3.1.2.6.4. Modelo definitivo

El modelo definitivo en que estima el valor de la respuesta UPF en función de los parámetros de fabricación de los tejidos producidos en este estudio con la fibra de Modal es el siguiente, en variables codificadas:



$$UPFm = 9,4118 + 3,1777 \cdot A + 1,5164 \cdot B + 0,6356 \cdot C + 0,4555 \cdot A \cdot B + 0,1477 \cdot A \cdot C + 0,1631 \cdot B \cdot C + 0,3029 \cdot A^2 - 0,2578 \cdot C^2$$

Con una significación del ajuste del modelo de $R^2 = 99,57\%$.

El modelo en variables codificadas nos indica que todas las variables del sistema tienen influencia en el UPF de los tejidos, al tener todas ellas coeficientes significativos. Los coeficientes de los términos lineales (factores simples) y de las interacciones dobles son, además, de signo positivo, lo que indica que al aumentar el nivel de las variables, aumentará también el valor de la respuesta.

El efecto simple que tiene una mayor influencia sobre la respuesta es el título del hilo de urdimbre (variable codificada A, con un coeficiente de 3,1777), seguida del título del hilo de trama (variable codificada B, con un coeficiente de 1,5164) y, por último la densidad de pasadas (variable codificada C, con un coeficiente de 0,6356).

La interacción de las variables A y B, presenta una influencia de signo positivo (0,4555), que producirá una aceleración en el aumento del valor de la respuesta UPF al aumentar cualquiera de las variables que intervienen en la interacción (título del hilo de urdimbre y título del hilo de trama). Con coeficientes de menor valor y que, por lo tanto, tendrán influencia pero menor que los anteriores, han resultado significativas también las interacciones de las variables A y C (0,1477) y de las variables B y C (0,1631). Todas estas interacciones producirán una aceleración en el aumento del valor de la respuesta UPF al aumentar cualquiera de las variables que intervienen en cada interacción. Asimismo, el efecto cuadrático de la variable codificada A, con un coeficiente de signo positivo, produce una pequeña curvatura que provocará también una aceleración en el aumento del valor de la respuesta UPF a medida que el nivel de dicha variable es mayor. Mientras que el efecto cuadrático de la variable codificada C, con un coeficiente de signo negativo, producirá una deceleración en el aumento del valor de la respuesta UPF a medida que aumenta el valor de la variable.

Al descodificar, se obtiene el modelo siguiente en variables originales:

$$UPFm = -30,1602 - 0,5728 \cdot X1 - 0,4646 \cdot X2 + 2,9260 \cdot X3 + 0,0182 \cdot X1 \cdot X2 + 0,0148 \cdot X1 \cdot X3 + 0,0163 \cdot X2 \cdot X3 + 0,0121 \cdot X1^2 - 0,0645 \cdot X3^2$$



2.3.1.2.6.5. Superficies de respuesta y curvas de nivel

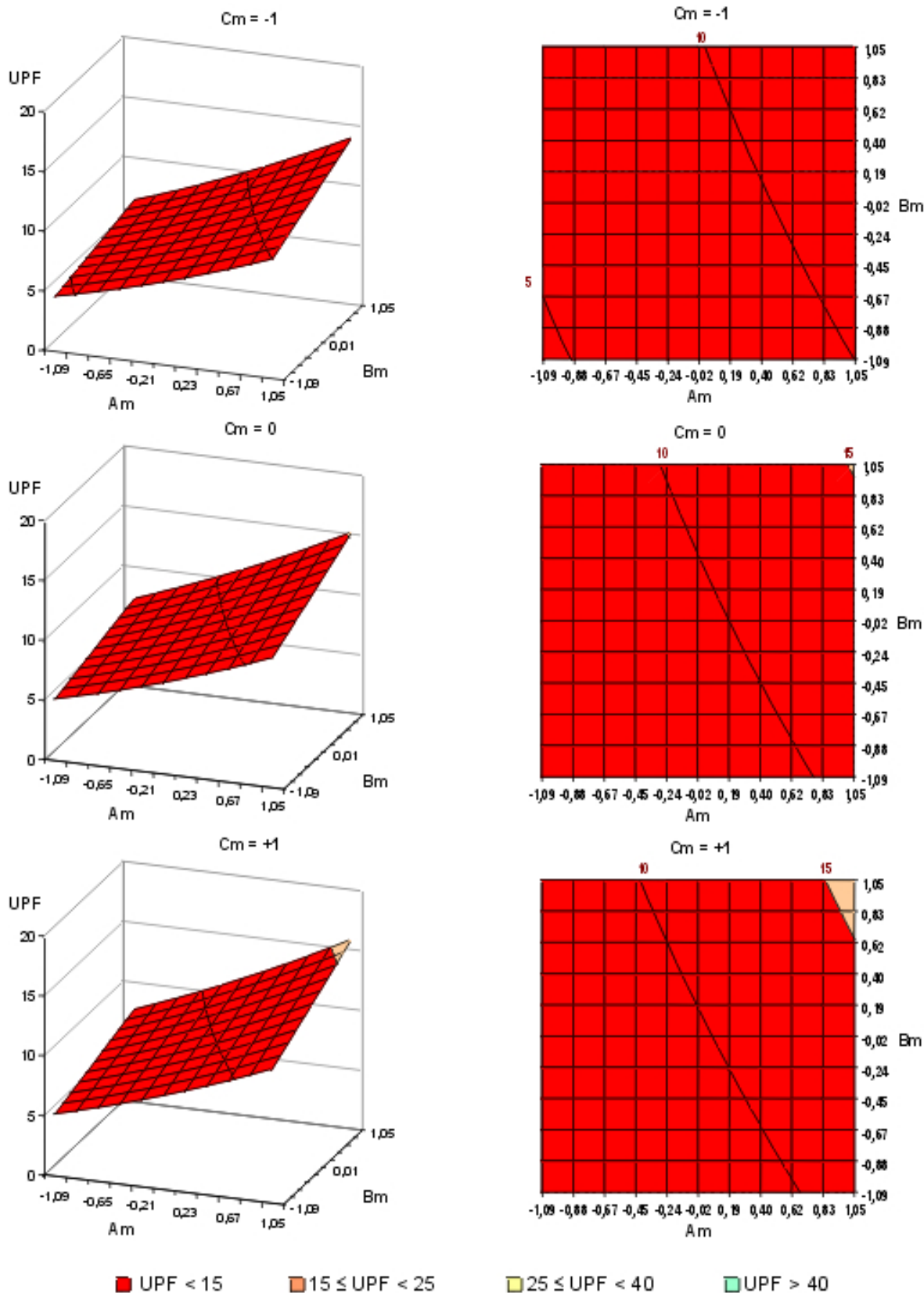


Figura 2.10. Superficies de respuesta UPF y curvas de nivel, tejidos de Modal



La Figura 2.10 muestra las superficies de respuesta y las curvas de nivel en función de las variables originales, del modelo obtenido para la serie de tejidos de Modal.

En la figura se aprecia que se requiere un nivel muy elevado de todas las variables, dentro de los intervalos que se han utilizado en este trabajo de investigación, para poder conseguir un nivel de protección suficiente para considerar a los tejidos protectores contra la radiación ultravioleta.

Para las curvas de nivel de los tejidos de Modal se obtiene una forma ligeramente curvada (causada por el efecto doble de la variable título del hilo de urdimbre), con líneas casi paralelas entre sí y que se sitúan en diagonal creciente. A medida que aumenta el nivel de las variables las curvas se desplazan hacia arriba y hacia la derecha, lo que significa que al aumentar el nivel de las variables también lo hace el valor de la respuesta UPF. La tendencia a la verticalidad de las curvas de nivel indica que el aumento de la respuesta es más rápido al desplazarnos por el eje de la variable X1 título del hilo de urdimbre, como corresponde al hecho de que esta variable es la que tiene un coeficiente positivo más alto como efecto simple en el modelo estimado, viéndose acelerado además por los coeficientes positivos de su efecto doble y su interacción con las variables título del hilo de trama y densidad de trama.

Si se observan las tres superficies o curvas correspondientes a los niveles mínimo, medio y máximo de la variable X3 se puede apreciar que un aumento en esta variable también produce un aumento en el valor de la respuesta UPF. Ello es consecuencia del coeficiente positivo de la variable X3 en el modelo, así como del efecto de su interacción positiva con las variables X1 y X2. Por las limitaciones de la representación gráfica, en la figura no es posible apreciar la curvatura que produciría el coeficiente negativo de su efecto doble.

2.3.1.2.7. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal Sun

2.3.1.2.7.1. Estimación final

El análisis estadístico de los resultados mediante regresión paso a paso proporciona la siguiente estimación final de los coeficientes significativos del modelo que relaciona la respuesta UPF de los tejidos de Modal Sun en función de las variables del sistema:



$$F = \frac{S_C^2}{\sigma^2} = \frac{3,5807}{22,5560} = 0,1585$$

Para $v = 20$, 3 repeticiones en el centro y un riesgo $\alpha = 0,05$, los límites inferior y superior de F son $F_i = 0,0253$ y $F_s = 4,4613$, por lo que no se manifiesta heterogeneidad de variancias al ser $F_i < F < F_s$.

2.3.1.2.7.3. Gráficos de residuos de la respuesta y gráfico probabilístico normal

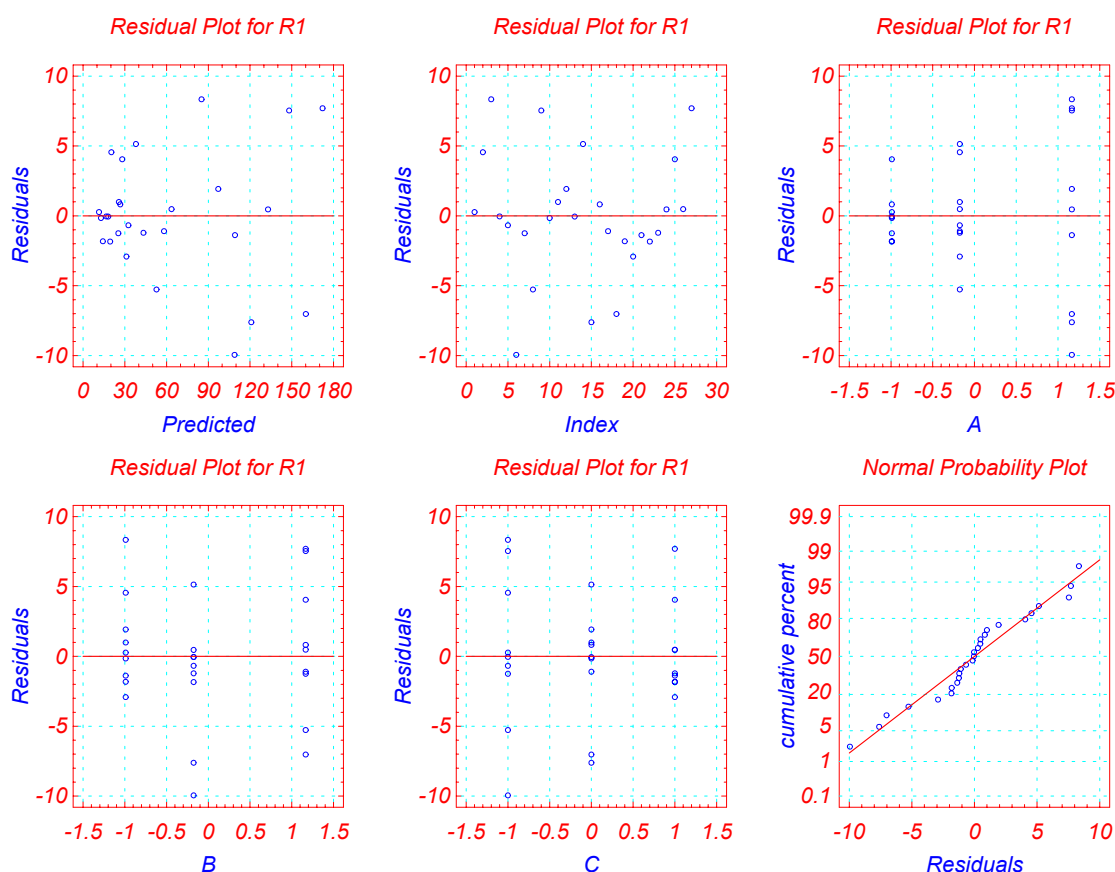


Figura 2.11. Gráficos de residuos y probabilístico normal de la respuesta UPF, tejidos Modal Sun

En el gráfico de residuos frente al regresor A se puede observar una forma algo atrompetada. El gráfico probabilístico normal tampoco presenta una línea muy recta. Sin embargo, estas anomalías no son extraordinarias. Por otra parte, la prueba de homocedasticidad de la variancia, cuyos resultados se han presentado en el apartado anterior, indica que no se produce heterogeneidad de variancias. A la vista de los resultados se concluye que no se produce variabilidad no constante y que las hipótesis de partida se cumplen, con lo que el modelo obtenido es válido.

2.3.1.2.7.4. Modelo definitivo

El modelo definitivo que estima el valor de la respuesta UPF en función de los parámetros de fabricación de los tejidos es el siguiente, en variables codificadas:



$$UPFms = 48,2726 + 46,4948 \cdot A + 16,8905 \cdot B + 6,2733 \cdot C + \\ + 10,5440 \cdot A \cdot B + 4,9296 \cdot A \cdot C + 17,3030 \cdot A^2$$

Con un coeficiente de determinación del modelo de $R^2 = 99,24\%$.

El modelo en variables codificadas nos indica que todas las variables del sistema tienen influencia en el UPF de los tejidos, al tener todas ellas coeficientes significativos. Estos coeficientes son, además, de signo positivo, lo que indica que al aumentar el nivel de las variables, aumentará también el valor de la respuesta.

El efecto simple que tiene una mayor influencia sobre la respuesta es el título del hilo de urdimbre (variable codificada A, con un coeficiente de 46,4948), seguida del título del hilo de trama (variable codificada B, con un coeficiente de 16,8905) y, por último la densidad de pasadas (variable codificada C, con un coeficiente de 6,2733).

La interacción de las variables A y B, presenta una influencia de signo positivo (10,5440), que produce una aceleración en el aumento del valor de la respuesta UPF al aumentar cualquiera de las variables que intervienen en la interacción (título del hilo de urdimbre y título del hilo de trama).

También la interacción de las variables A y C, presenta una influencia de signo positivo, aunque de menor valor (4,9296), que produce una aceleración en el aumento del valor de la respuesta UPF al aumentar cualquiera de las variables que intervienen en la interacción (título del hilo de urdimbre y densidad trama). Asimismo, el efecto cuadrático de la variable codificada A, con un coeficiente de signo positivo y valor bastante alto (17,3030), produce una notable curvatura que provocará también una aceleración en el aumento del valor de la respuesta UPF al aumentar el nivel de dicha variable.

A la vista de los resultados, es claramente notable que la variable A es la que tiene una mayor influencia sobre el valor de la respuesta UPF, ya que presenta el mayor coeficiente en el término del efecto simple, es significativo su efecto doble y su interacción con las otras variables A y C y todos ellos con coeficiente de valores positivos. También es perfectamente apreciable que la variable C es la que presenta una menor influencia sobre el valor de la respuesta. Esta variable tiene el menor coeficiente en el término de su efecto simple y también en su interacción, ambos términos con valores menores que el coeficiente de la interacción A·B y el del efecto cuadrático A^2 .

Al descodificar, se obtiene el siguiente modelo en variables originales:

$$UPFms = 220,7249 - 21,7257 \cdot X1 - 2,1561 \cdot X2 - 4,3399 \cdot X3 + \\ + 0,2152 \cdot X1 \cdot X2 + 0,3521 \cdot X1 \cdot X3 + 0,3531 \cdot X1^2$$



2.3.1.2.7.5. Superficies de respuesta y curvas de nivel

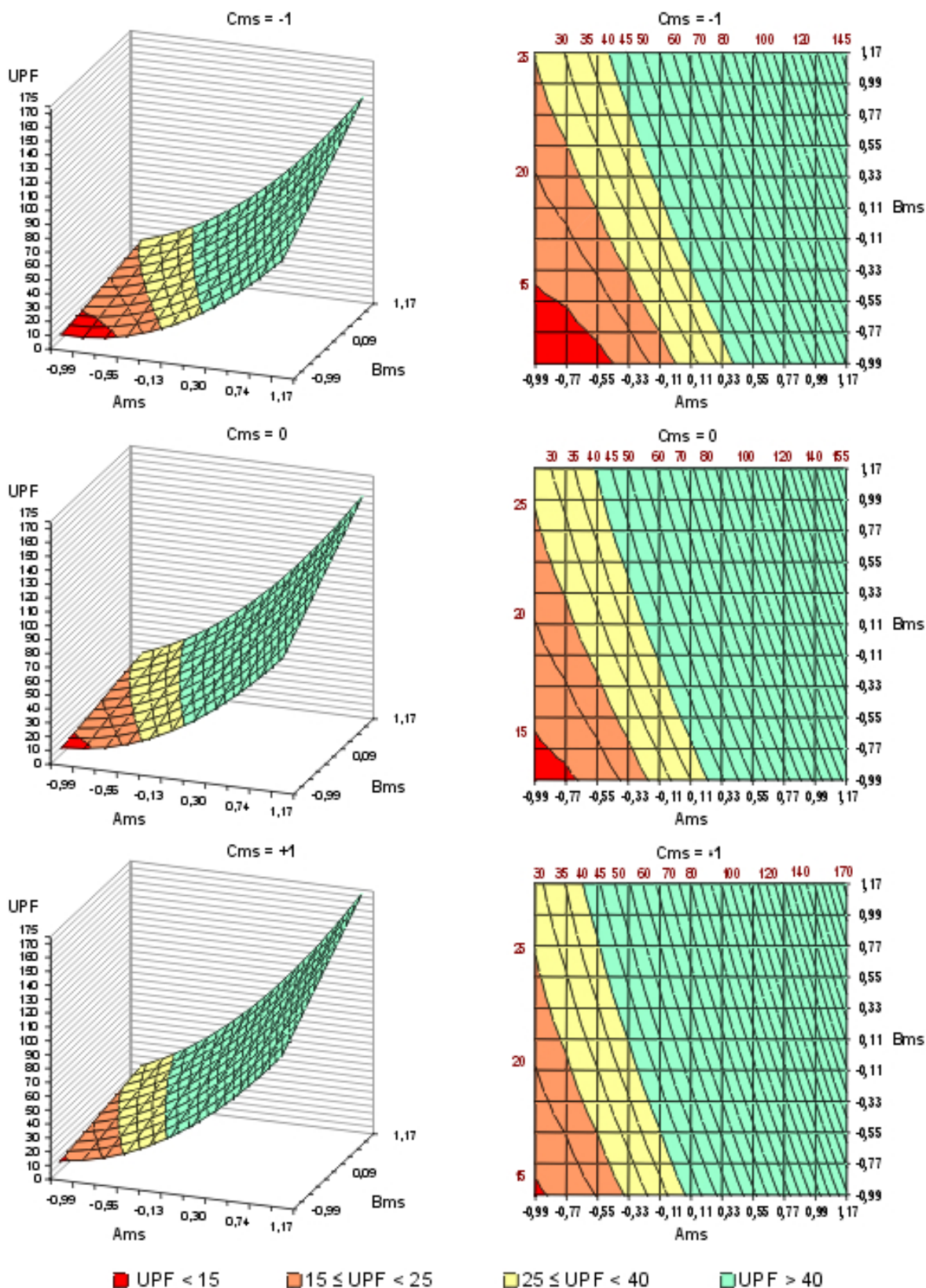


Figura 2.12. Superficies de respuesta UPF, tejidos de Modal Sun



La Figura 2.12 muestra las superficies de respuesta y las curvas de nivel correspondientes al modelo obtenido para las fibras de Modal Sun.

En la figura se aprecia que, en el caso de esta serie de tejidos de Modal Sun y con los niveles de las variables entre los intervalos de valores escogidos para este estudio, sí que se han conseguido obtener tejidos con niveles de protección buena, muy buena y excelente. Con niveles relativamente bajos de las variables de fabricación se pueden conseguir tejidos protectores fabricados contra la radiación ultravioleta con esta fibra.

Las curvas de nivel de los tejidos de Modal Sun son parábolas ya que existe efecto cuadrático de la variable título del hilo de urdimbre. Dichas curvas no son paralelas entre sí, debido al gran coeficiente de la interacción, y se sitúan en diagonal creciente, de forma que a medida que aumenta el nivel de las variables las curvas se desplazan hacia arriba y hacia la derecha, lo que significa que al aumentar el nivel de las variables también lo hace el valor de la respuesta UPF.

Otra característica a destacar en las curvas de nivel obtenidas es que el espacio entre cada incremento de 5 puntos en el valor del UPF es cada vez más pequeño a medida que aumenta el valor de las variables X_1 y X_2 , es decir, se van necesitando incrementos cada vez más pequeños en los valores de las variables para obtener el mismo incremento en el valor de la respuesta UPF. Esto es debido al coeficiente positivo de X_1^2 y a las interacciones positivas $X_1 \cdot X_2$ y $X_1 \cdot X_3$.

La tendencia de las curvas de nivel a presentar una cierta verticalidad es indicativa de la mayor influencia de la variable X_1 título del hilo de urdimbre que de la variable X_2 título del hilo de trama. El aumento de la respuesta UPF es más rápido al desplazarnos por el eje de la variable X_1 título del hilo de urdimbre, como corresponde al hecho de que esta variable es la que tiene un coeficiente positivo más alto como efecto simple en el modelo estimado, viéndose acelerado además por los coeficientes positivos de su efecto doble y su interacción tanto con la variable título del hilo de trama como con la variable densidad de trama.

Si se observan las tres superficies o curvas correspondientes a los niveles mínimo, medio y máximo de la variable X_3 se puede apreciar que son bastante similares, aunque un aumento en esta variable también produce un ligero aumento en el valor de la respuesta UPF.

2.3.1.2.8. Comparación entre los modelos obtenidos para las diferentes fibras

Para comparar el efecto del tipo de fibra sobre el Factor de Protección a la Radiación Ultravioleta de los tejidos, en este apartado se resumen los modelos obtenidos para las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun.



Algodón: $R^2 = 98,79\%$

$$UPFa = 5,4004 + 0,8054 \cdot A + 0,4602 \cdot B + 0,1611 \cdot C - 0,0667 \cdot B \cdot C$$

Modal: $R^2 = 99,57\%$

$$UPFm = 9,4118 + 3,1777 \cdot A + 1,5164 \cdot B + 0,6356 \cdot C + 0,4555 \cdot A \cdot B + \\ + 0,1477 \cdot A \cdot C + 0,1631 \cdot B \cdot C + 0,3029 \cdot A^2 - 0,2578 \cdot C^2$$

Modal Sun: $R^2 = 99,24\%$

$$UPFms = 48,2726 + 46,4948 \cdot A + 16,8905 \cdot B + 6,2733 \cdot C + \\ + 10,5440 \cdot A \cdot B + 4,9296 \cdot A \cdot C + 17,3030 \cdot A^2$$

La primera conclusión que se puede extraer de los modelos obtenidos es que todas variables de fabricación estudiadas en este trabajo de investigación tienen una influencia significativa sobre el valor del factor de protección proporcionada por los tejidos, independientemente del tipo de fibra utilizada en su producción. También es común a todas las fibras que la variable que ejerce una mayor influencia sobre el UPF es el título del hilo de urdimbre, seguido por la variable título del hilo de trama. En todos los casos, la variable densidad de trama ejerce una menor influencia sobre el valor del UPF.

Sin embargo, junto a la estructura del tejido, el tipo de fibra también es un factor que debe ser tenido en cuenta a la hora de planificar la producción de un tejido protector. A pesar de que las tres series han sido fabricadas con estructuras similares, se puede observar que existe una gran diferencia entre los valores de los coeficientes obtenidos, sobretodo cuando se compara el modelo estimado para la fibra de Modal Sun con el estimado para el resto de las fibras. Todos los coeficientes para esta serie tienen valores notablemente más altos. Por lo tanto, para el mismo nivel de las variables del sistema se estimarán valores de UPF también notablemente más altos en los tejidos fabricados con Modal Sun que en los fabricados con Modal o Algodón. Entre los modelos estimados para estas dos últimas fibras, los coeficientes de la serie de Modal han resultado ligeramente más altos que los obtenidos para la serie de Algodón.

Los modelos obtenidos nos permiten estimar el UPF a priori según los parámetros de fabricación, aunque siempre dentro del rango experimental, es decir, con valores de las variables entre los niveles mínimo y máximo que se han utilizado para hallar el modelo. El modelo no es válido fuera de dichos intervalos.

Los modelos también permiten el ajuste de las variables, con numerosas posibilidades de distintas combinaciones, para obtener un UPF determinado.

A modo de ejemplo, en la Tabla 2.19, la Tabla 2.20 y Tabla 2.21 se han representado valores de UPF, estimados según el modelo obtenido para cada una de las fibras. Por razones de extensión, se han escogido varios valores de las variables dentro del rango



experimental, aunque las posibilidades de combinación son mucho más numerosas que las representadas. Se ha utilizado un código de colores, que se expone a continuación, para facilitar el encontrar las condiciones necesarias para obtener un mínimo de protección, o bien una buena protección o una protección excelente.

- UPF < 15: tejido no protector
- 15 ≤ UPF < 25: tejido que proporciona buena protección
- 25 ≤ UPF < 40: tejido que proporciona muy buena protección
- UPF ≥ 40: tejido que proporciona protección excelente

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		23	14,3	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9
	15,4	3,9	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,8	4,9	5,0	5,1
	16,4	4,1	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2
	17,5	4,3	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4
	18,6	4,5	4,6	4,7	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6
	19,7	4,6	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,7	5,8
	20,7	4,8	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9
	21,8	5,0	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1
	22,9	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3
	23,9	5,3	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4
	25,0	5,5	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		25	14,3	15,4	16,4	17,5	18,6	19,7	20,7	21,8	22,9	23,9
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0
	15,4	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2
	16,4	4,4	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3
	17,5	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5
	18,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7
	19,7	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,6	5,7	5,8
	20,7	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0
	21,8	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2
	22,9	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4
	23,9	5,6	5,7	5,8	5,9	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5
	25,0	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		27	14,3	15,4	16,4	17,5	18,6	19,7	20,7	21,8	22,9	23,9
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1
	15,4	4,4	4,5	4,6	4,7	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,2
	16,4	4,6	4,7	4,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,3	5,4
	17,5	4,8	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,3	5,4	5,5	5,6
	18,6	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
	19,7	5,1	5,2	5,3	5,4	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	5,9
	20,7	5,3	5,4	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	5,9	6,0	6,1
	21,8	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3
	22,9	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5
	23,9	5,8	5,9	6,0	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,5	6,6
	25,0	6,0	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,5	6,6	6,7	6,8

Tabla 2.19. Estimación del UPF según el modelo para los tejidos de Algodón



En el caso de los tejidos de Algodón, Tabla 2.19, se puede observar que, dentro del rango experimental ninguno de los valores estimados por el modelo proporciona protección contra la radiación ultravioleta. Como un posible estudio posterior a esta tesis doctoral se podría aumentar el nivel de las variables título del hilo de urdimbre y trama y densidad de trama, para estudiar los requisitos mínimos para que los tejidos de Algodón no teñido proporcionen protección, si bien se tendría que llegar a estructuras no adecuadas para su uso en prendas de verano.

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		23	14,3	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	4,6	4,9	5,1	5,2	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,3	6,4
	15,4	5,0	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,5	6,7	6,9	7,1
	16,4	5,5	5,8	6,0	6,2	6,4	6,7	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7
	17,5	5,9	6,3	6,6	6,8	7,0	7,2	7,5	7,7	7,9	8,2	8,4
	18,6	6,4	6,9	7,1	7,3	7,6	7,8	8,1	8,3	8,6	8,8	9,1
	19,7	7,0	7,4	7,7	7,9	8,2	8,5	8,7	9,0	9,3	9,6	9,8
	20,7	7,5	8,0	8,3	8,6	8,9	9,1	9,4	9,7	10,0	10,3	10,6
	21,8	8,1	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1	10,4	10,8	11,1	11,4
	22,9	8,7	9,2	9,6	9,9	10,2	10,6	10,9	11,2	11,5	11,9	12,2
	23,9	9,3	9,9	10,3	10,6	11,0	11,3	11,6	12,0	12,3	12,7	13,0
	25,0	10,0	10,6	11,0	11,3	11,7	12,1	12,4	12,8	13,2	13,5	13,9

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		25	14,3	15,4	16,4	17,5	18,6	19,7	20,7	21,8	22,9	23,9
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3
	15,4	5,6	5,8	6,1	6,3	6,6	6,8	7,0	7,3	7,5	7,7	8,0
	16,4	6,1	6,3	6,6	6,9	7,1	7,4	7,6	7,9	8,1	8,4	8,7
	17,5	6,6	6,9	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,5	8,8	9,1	9,4
	18,6	7,1	7,4	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,8	10,1
	19,7	7,7	8,0	8,3	8,6	8,9	9,3	9,6	9,9	10,2	10,6	10,9
	20,7	8,2	8,6	8,9	9,3	9,6	10,0	10,3	10,6	11,0	11,3	11,7
	21,8	8,9	9,2	9,6	9,9	10,3	10,7	11,0	11,4	11,8	12,1	12,5
	22,9	9,5	9,9	10,3	10,6	11,0	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,3
	23,9	10,2	10,6	11,0	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,2
	25,0	10,9	11,3	11,7	12,1	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,7	15,1

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		27	14,3	15,4	16,4	17,5	18,6	19,7	20,7	21,8	22,9	23,9
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	5,2	5,4	5,7	5,9	6,2	6,5	6,7	7,0	7,2	7,5	7,7
	15,4	5,7	5,9	6,2	6,5	6,8	7,0	7,3	7,6	7,9	8,1	8,4
	16,4	6,2	6,5	6,8	7,1	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1
	17,5	6,7	7,0	7,3	7,6	8,0	8,3	8,6	8,9	9,2	9,5	9,9
	18,6	7,3	7,6	7,9	8,3	8,6	8,9	9,3	9,6	10,0	10,3	10,6
	19,7	7,9	8,2	8,6	8,9	9,3	9,6	10,0	10,3	10,7	11,1	11,4
	20,7	8,5	8,8	9,2	9,6	10,0	10,4	10,7	11,1	11,5	11,9	12,2
	21,8	9,1	9,5	9,9	10,3	10,7	11,1	11,5	11,9	12,3	12,7	13,1
	22,9	9,8	10,2	10,6	11,0	11,5	11,9	12,3	12,7	13,1	13,6	14,0
	23,9	10,5	10,9	11,4	11,8	12,2	12,7	13,1	13,6	14,0	14,4	14,9
	25,0	11,2	11,7	12,1	12,6	13,1	13,5	14,0	14,4	14,9	15,4	15,8

Tabla 2.20. Estimación del UPF según el modelo para los tejidos de Modal



Para los tejidos de Modal, Tabla 2.20, según la estimación del modelo sí que se pueden obtener tejidos que proporcionan una buena protección (valor de $UPF \geq 15$, representados en color naranja), dentro de los intervalos de las variables estudiados en la presente tesis. También se podría plantear un posible estudio posterior a esta tesis doctoral en el que se tendría que aumentar el nivel de las variables título del hilo de urdimbre y trama y densidad de trama, para estudiar los requisitos mínimos para que los tejidos de Modal no teñidos proporcionen niveles más altos de protección, aunque este aumento en los valores de las variables iría en detrimento de la confortabilidad de los tejidos para su uso en prendas de verano.

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		23	14,3	15,8	17,3	18,8	20,3	21,9	23,4	24,9	26,4	27,9
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	11,4	12,8	14,2	15,6	17,0	18,4	19,8	21,2	22,5	23,9	25,3
	15,8	11,5	13,4	15,3	17,2	19,1	20,9	22,8	24,7	26,6	28,5	30,4
	17,3	13,3	15,6	18,0	20,4	22,8	25,1	27,5	29,9	32,3	34,6	37,0
	18,8	16,6	19,5	22,3	25,2	28,1	30,9	33,8	36,7	39,5	42,4	45,2
	20,3	21,6	24,9	28,3	31,6	35,0	38,3	41,7	45,0	48,4	51,8	55,1
	21,9	28,1	32,0	35,8	39,7	43,5	47,4	51,2	55,0	58,9	62,7	66,6
	23,4	36,3	40,6	45,0	49,3	53,6	58,0	62,3	66,7	71,0	75,3	79,7
	24,9	46,1	50,9	55,7	60,6	65,4	70,2	75,0	79,9	84,7	89,5	94,4
	26,4	57,5	62,8	68,1	73,4	78,8	84,1	89,4	94,7	100,0	105,3	110,7
	27,9	70,5	76,3	82,1	87,9	93,7	99,5	105,3	111,1	117,0	122,8	128,6
29,4	85,1	91,4	97,7	104,0	110,3	116,6	122,9	129,2	135,5	141,8	148,1	

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		25	14,3	15,8	17,3	18,8	20,3	21,9	23,4	24,9	26,4	27,9
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	12,8	14,2	15,6	17,0	18,4	19,8	21,2	22,5	23,9	25,3	26,7
	15,8	14,0	15,9	17,8	19,6	21,5	23,4	25,3	27,2	29,0	30,9	32,8
	17,3	16,8	19,2	21,5	23,9	26,3	28,7	31,0	33,4	35,8	38,1	40,5
	18,8	21,2	24,1	26,9	29,8	32,6	35,5	38,4	41,2	44,1	47,0	49,8
	20,3	27,2	30,6	33,9	37,3	40,6	44,0	47,3	50,7	54,0	57,4	60,8
	21,9	34,8	38,7	42,5	46,4	50,2	54,1	57,9	61,8	65,6	69,4	73,3
	23,4	44,1	48,4	52,7	57,1	61,4	65,8	70,1	74,4	78,8	83,1	87,4
	24,9	54,9	59,8	64,6	69,4	74,2	79,1	83,9	88,7	93,5	98,4	103,2
	26,4	67,4	72,7	78,0	83,3	88,7	94,0	99,3	104,6	109,9	115,2	120,6
	27,9	81,5	87,3	93,1	98,9	104,7	110,5	116,3	122,1	127,9	133,7	139,5
29,4	97,1	103,4	109,7	116,0	122,3	128,6	134,9	141,2	147,5	153,8	160,1	

Densidad trama		Título del hilo de trama (tex)										
		27	14,3	15,8	17,3	18,8	20,3	21,9	23,4	24,9	26,4	27,9
Título del hilo de urdimbre (tex)	14,3	14,2	15,6	17,0	18,4	19,8	21,2	22,5	23,9	25,3	26,7	28,1
	15,8	16,4	18,3	20,2	22,1	24,0	25,9	27,7	29,6	31,5	33,4	35,3
	17,3	20,3	22,7	25,1	27,4	29,8	32,2	34,5	36,9	39,3	41,7	44,0
	18,8	25,8	28,6	31,5	34,4	37,2	40,1	43,0	45,8	48,7	51,5	54,4
	20,3	32,9	36,2	39,6	42,9	46,3	49,6	53,0	56,3	59,7	63,0	66,4
	21,9	41,5	45,4	49,2	53,1	56,9	60,8	64,6	68,5	72,3	76,1	80,0
	23,4	51,8	56,2	60,5	64,9	69,2	73,5	77,9	82,2	86,5	90,9	95,2
	24,9	63,8	68,6	73,4	78,2	83,1	87,9	92,7	97,5	102,4	107,2	112,0
	26,4	77,3	82,6	87,9	93,2	98,5	103,9	109,2	114,5	119,8	125,1	130,4
	27,9	92,4	98,2	104,0	109,8	115,6	121,5	127,3	133,1	138,9	144,7	150,5
29,4	109,2	115,5	121,8	128,1	134,3	140,6	146,9	153,2	159,5	165,8	172,1	

Tabla 2.21. Estimación del UPF según el modelo para los tejidos de Modal Sun



Para los tejidos de Modal Sun, Tabla 2.21, la estimación proporcionada por el modelo presenta resultados más interesantes. Dentro de los intervalos en los valores de las variables del sistema estudiados, se pueden obtener tejidos con UPF estimados que permitirían clasificarlos en todos los niveles de protección contemplados en la norma (tejidos no protectores, tejidos con buena protección, con muy buena protección y con protección excelente), y que a la vez serían tejidos ligeros muy adecuados para su uso en prendas de verano. Las tablas en este caso se muestran muy útiles en la elección de las múltiples posibilidades de combinación de los niveles de las variables para obtener una determinada protección.

2.3.2. Relación entre otros parámetros estructurales (peso por unidad de superficie, espesor y cobertura) y el UPF de los tejidos

2.3.2.1. Resultados en la determinación de los parámetros

A continuación se exponen los resultados obtenidos en la determinación de varios parámetros estructurales que, aunque no intervienen directamente como variables de fabricación de los tejidos, se consideran de amplio uso en la industria textil, por lo que su relación con el factor de protección a la radiación ultravioleta puede ser de interés práctico. Dichos parámetros son:

- Peso por unidad de superficie del tejido, g/m^2
- Espesor del tejido, mm
- Cobertura del tejido, determinada por técnicas de análisis de imagen, %

En este apartado se determinará cual de estos parámetros tiene una mejor correlación con la respuesta UPF y si dicha correlación es suficiente para poder utilizarlo para predecir el valor de la respuesta.

2.3.2.1.1. Peso, espesor y cobertura de los tejidos de Algodón

En la Figura 2.13 se exponen las microfotografías obtenidas mediante una cámara acoplada a un microscopio óptico, correspondientes a la observación de las muestras de tejidos de la serie de Algodón.

Las microfotografías muestran visualmente la cobertura de los tejidos de la serie de Algodón, entendida como el espacio ocupado por los hilos en el tejido. Se puede observar que se ha conseguido fabricar tejidos con una amplia gama de porosidades que abarca desde tejidos muy abiertos (1, 10, 19) a tejidos con una tupidez muy alta (9, 18, 27). Asimismo, se observa el creciente aumento del porcentaje de cobertura de los tejidos a medida que aumentan las variables de fabricación de los tejidos X1 título del hilo de urdimbre, X2 título del hilo de la trama y X3 densidad de trama.



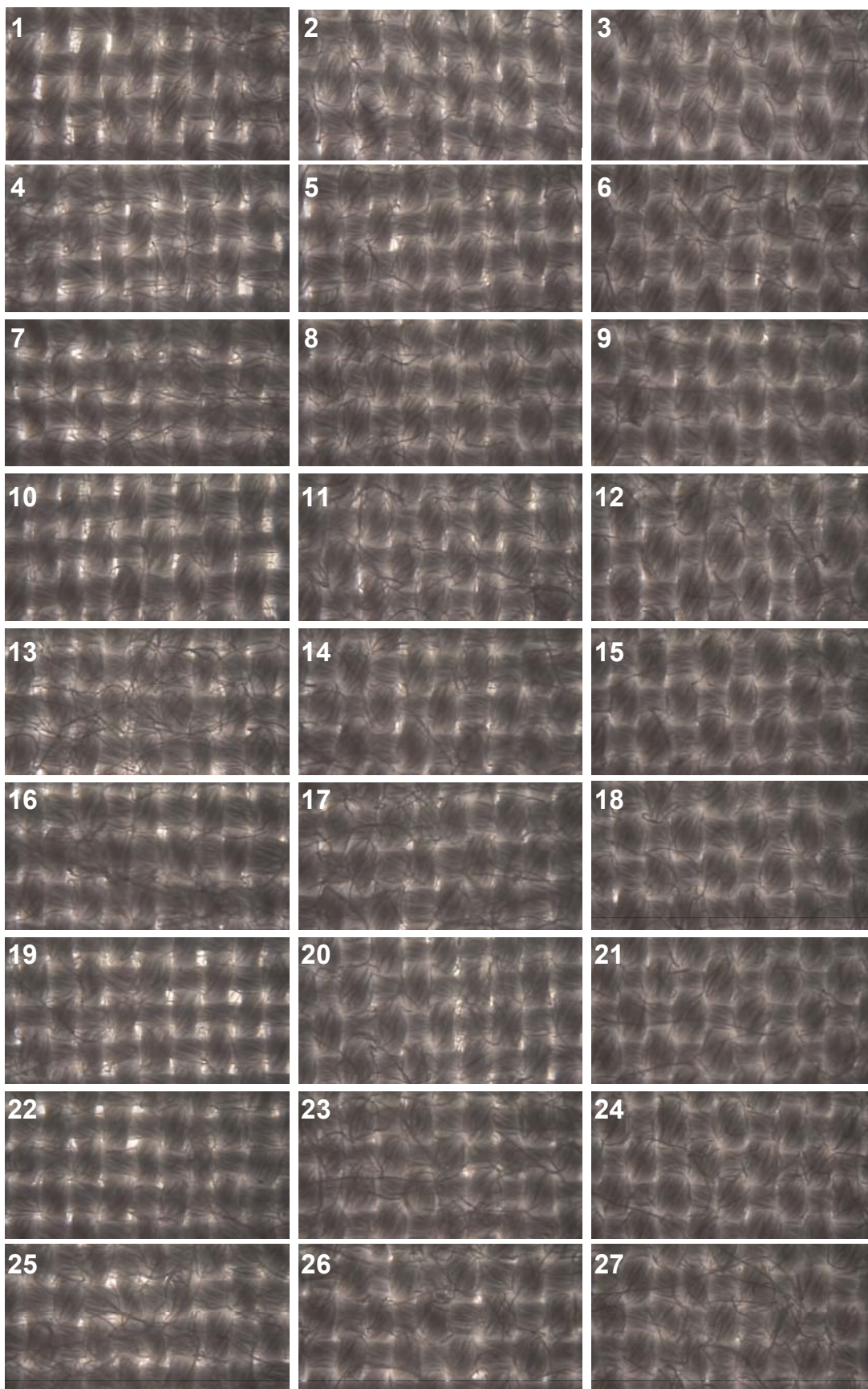


Figura 2.13. Microfotografías de los tejidos de Algodón



El peso por unidad de superficie, el espesor y el porcentaje de cobertura determinado por técnicas de análisis imagen de cada uno de los tejidos de la serie de Algodón, así como su UPF, se presentan en la Tabla 2.22.

Muestra n°	Peso unidad de superficie (g/m ²)	Espesor (mm)	Cobertura análisis de imagen (%)	UPF
1	91,12	0,320	86,05	3,80
2	114,38	0,357	89,36	4,75
3	138,43	0,390	94,18	5,33
4	109,58	0,338	88,57	4,36
5	134,93	0,377	94,46	5,43
6	160,41	0,407	97,19	6,13
7	125,44	0,359	91,99	4,89
8	152,34	0,390	94,75	5,98
9	177,99	0,418	97,72	6,57
10	94,93	0,318	89,42	4,06
11	118,94	0,355	93,98	4,86
12	142,99	0,380	97,31	5,74
13	113,79	0,344	90,83	4,54
14	137,36	0,372	95,07	5,43
15	162,70	0,392	97,42	6,35
16	129,05	0,369	94,37	4,96
17	153,83	0,393	95,85	5,74
18	178,11	0,410	97,34	6,66
19	99,44	0,297	90,38	4,16
20	123,10	0,337	93,71	5,03
21	149,03	0,361	97,74	6,15
22	122,09	0,339	93,96	4,78
23	148,95	0,372	95,46	5,67
24	172,53	0,387	97,47	6,32
25	128,97	0,360	93,40	5,12
26	154,57	0,385	96,25	6,00
27	180,04	0,400	97,86	6,92

Tabla 2.22. Peso por unidad de superficie, Espesor y Cobertura de los tejidos de Algodón

Representando gráficamente el UPF de los tejidos en función de cada uno de los parámetros estructurales estudiados se obtienen los gráficos de la Figura 2.14.



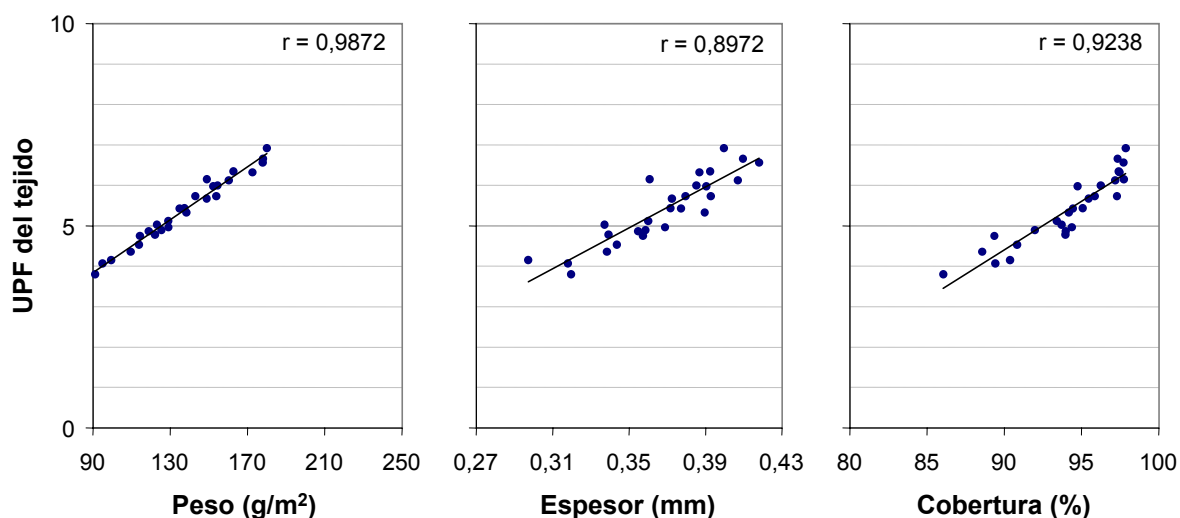


Figura 2.14. Relación entre UPF y peso por unidad de superficie, espesor y cobertura, tejidos de Algodón

Según se puede observar en la figura, el factor de protección a la radiación ultravioleta se ve influenciado por los diferentes parámetros estructurales de los tejidos de Algodón. Como era de esperar, el UPF aumenta cuando lo hacen el peso del tejido, su espesor o su factor de cobertura.

El UPF está fuertemente correlacionado con el peso, el espesor y la cobertura de los tejidos de Algodón utilizados en este estudio, siguiendo en todos los casos una regresión lineal. La mayor correlación se da con el parámetro peso, con un coeficiente de correlación $r = 0,9872$, y es menor para los parámetros espesor ($r = 0,8972$) y cobertura ($r = 0,9238$), en los que se observa una mayor dispersión de los puntos respecto a la línea de regresión

Así pues, en el caso de los tejidos de Algodón, el mejor parámetro que se podrá utilizar para predecir el UPF será el peso del tejido. Este resultado, además, es muy conveniente, ya que este parámetro es el que se puede determinar más fácilmente y el que requiere un equipamiento más sencillo. En el siguiente apartado, el 2.3.2.2, se analizan estadísticamente los resultados y se propone un modelo de predicción que cuantifica el UPF en función del peso del tejido.

2.3.2.1.2. Peso, espesor y cobertura de los tejidos de Modal

En la Figura 2.15 se exponen las microfotografías obtenidas, correspondientes a la observación de las muestras de tejidos de la serie de Modal.



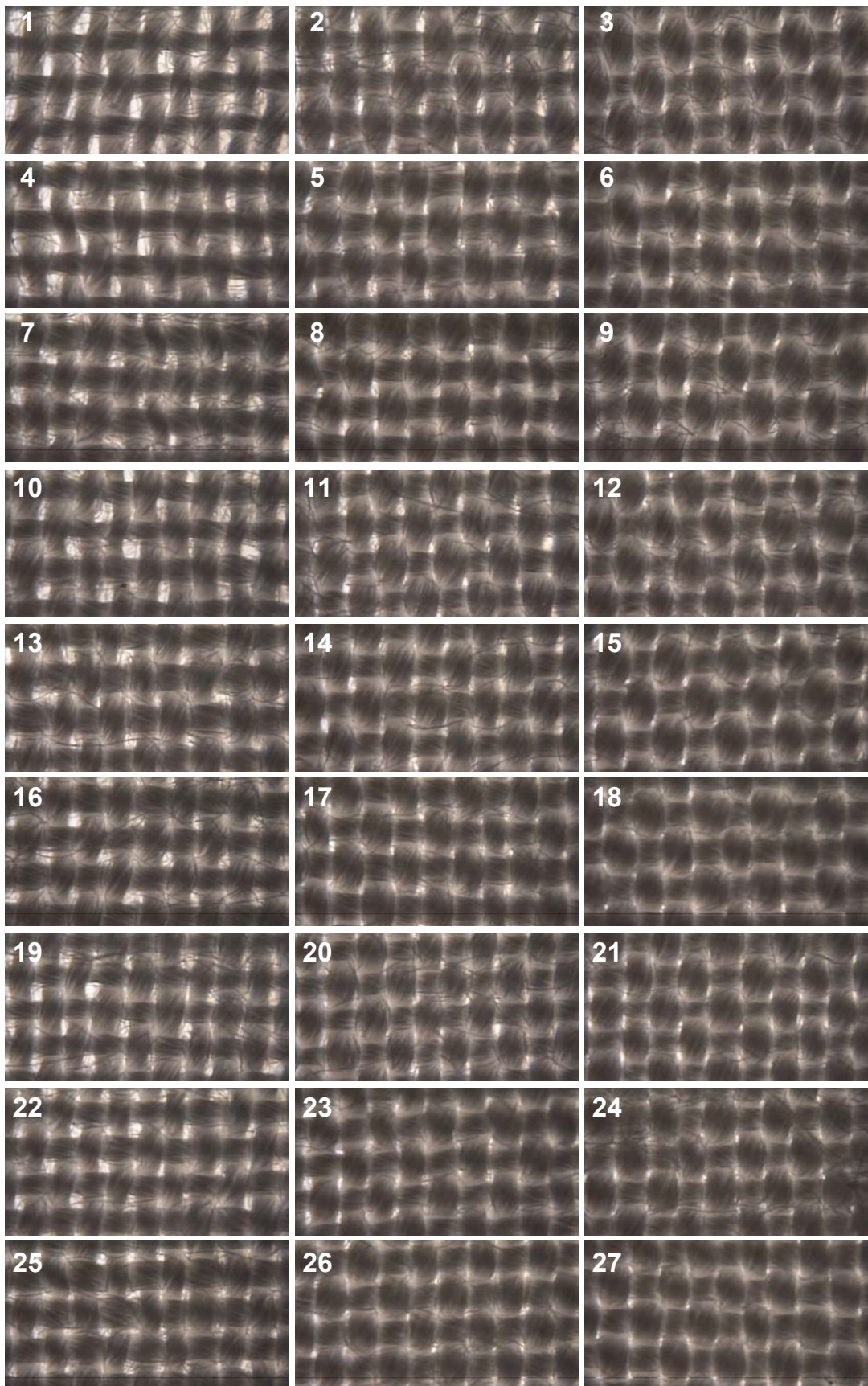


Figura 2.15. Microfotografías de los tejidos de Modal



El peso por unidad de superficie, el espesor y el porcentaje de cobertura determinado por técnicas de análisis de imagen de cada uno de los tejidos de la serie de Modal, se presentan en la Tabla 2.23.

Muestra nº	Peso unidad de superficie (g/m²)	Espesor (mm)	Cobertura análisis de imagen (%)	UPF
1	99,98	0,285	82,13	4,72
2	129,29	0,330	89,21	7,15
3	164,74	0,392	93,33	10,06
4	119,54	0,327	84,55	5,28
5	156,20	0,378	89,20	8,91
6	189,47	0,418	92,94	12,34
7	142,05	0,366	88,14	6,65
8	173,50	0,385	89,66	10,20
9	202,50	0,404	92,95	13,44
10	106,63	0,292	85,12	5,12
11	136,76	0,328	89,53	7,72
12	175,20	0,384	91,96	10,73
13	129,72	0,336	86,12	6,34
14	159,94	0,355	89,84	9,73
15	194,77	0,391	93,11	13,21
16	148,77	0,341	89,30	7,38
17	178,79	0,369	90,43	11,03
18	216,09	0,402	94,20	15,53
19	113,42	0,300	85,57	5,28
20	149,84	0,341	90,33	8,34
21	179,69	0,374	91,38	10,95
22	134,62	0,326	88,00	6,52
23	166,49	0,349	90,79	10,03
24	203,58	0,383	93,71	14,06
25	157,45	0,335	89,94	7,86
26	192,75	0,367	92,46	11,39
27	225,03	0,390	93,52	15,76

Tabla 2.23. *Peso por unidad de superficie, Espesor y Cobertura de los tejidos de Modal*

Representando gráficamente el UPF de los tejidos en función de cada uno de los parámetros estructurales estudiados se obtienen los gráficos de la Figura 2.16.



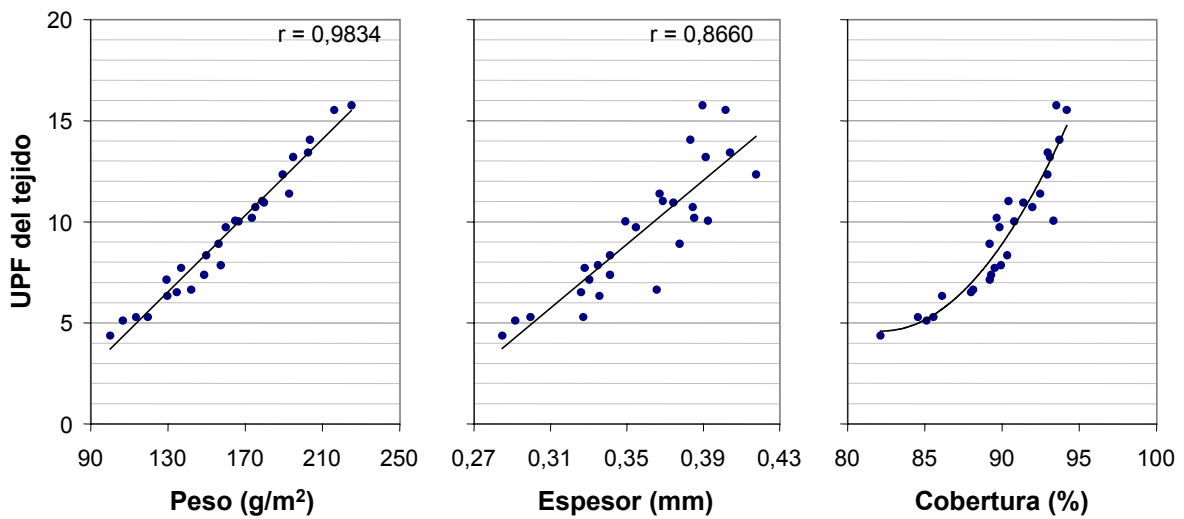


Figura 2.16. Relación entre UPF y peso por unidad de superficie, espesor y cobertura, tejidos de Modal

También para los tejidos de Modal el factor de protección a la radiación ultravioleta se ve influenciado por los diferentes parámetros estructurales, aumentando la respuesta UPF cuando lo hacen el peso del tejido, su espesor o el factor de cobertura de los mismos.

Pero mientras con el peso existe una fuerte correlación lineal ($r = 0,9834$), con el espesor y la cobertura la correlación lineal disminuye ($r = 0,8660$ y $r = 0,9114$, respectivamente). En el caso del espesor se puede apreciar que existe una mayor dispersión de los puntos en la curva. Para la cobertura, la curva sugiere que el UPF tendrá una cierta relación cuadrática con este parámetro.

A la vista de los resultados, en el caso de los tejidos de Modal, como en los de Algodón, el parámetro que mejor se podrá utilizar para predecir el UPF de los tejidos es el peso por unidad de superficie de los mismos. La correlación del UPF con el peso es mayor y lineal y, además, es el parámetro de determinación más sencilla.

2.3.2.1.3. Peso, espesor y cobertura de los tejidos de Modal Sun

En la Figura 2.17 se exponen las microfotografías obtenidas mediante una cámara acoplada a un microscopio óptico, correspondientes a la observación de las muestras de tejidos de la serie de Modal Sun.



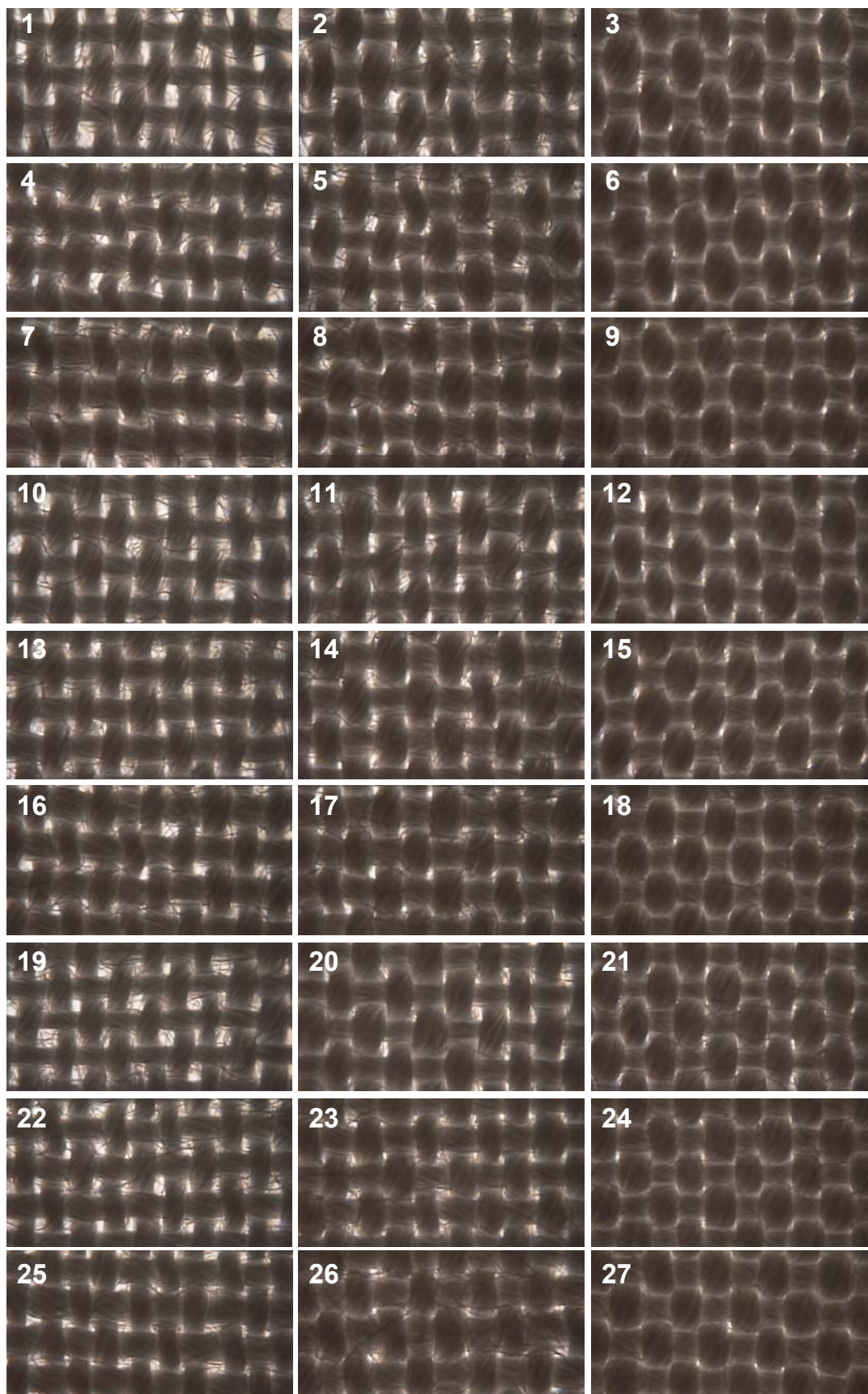


Figura 2.17. Microfotografías de los tejidos de Modal Sun



El peso por unidad de superficie, el espesor y el porcentaje de cobertura determinado por técnicas de imagen de cada uno de los tejidos de la serie de Modal Sun, se presentan en la Tabla 2.24.

Muestra nº	Peso unidad de superficie (g/m ²)	Espesor (mm)	Cobertura análisis de imagen (%)	UPF
1	101,03	0,281	88,44	11,48
2	130,27	0,326	93,31	24,88
3	177,72	0,370	98,13	93,47
4	121,04	0,309	90,70	16,63
5	149,46	0,332	94,75	31,89
6	197,95	0,390	98,35	98,96
7	149,53	0,348	93,65	24,09
8	183,49	0,361	96,35	47,48
9	232,09	0,406	98,94	155,64
10	102,43	0,273	87,75	12,66
11	132,79	0,305	93,30	26,72
12	185,74	0,368	97,88	99,08
13	122,85	0,300	91,23	18,01
14	155,99	0,334	95,02	43,11
15	208,04	0,379	98,54	113,31
16	156,24	0,346	94,75	27,54
17	191,62	0,367	96,90	57,06
18	232,87	0,387	98,87	153,10
19	105,71	0,273	88,39	12,38
20	135,66	0,305	94,32	28,22
21	188,42	0,355	97,88	107,80
22	129,02	0,290	91,29	17,61
23	165,50	0,323	95,78	42,16
24	212,49	0,362	98,78	133,41
25	165,00	0,313	95,19	32,16
26	194,16	0,344	97,21	64,04
27	242,65	0,372	98,96	179,85

Tabla 2.24. Peso por unidad de superficie, Espesor y Cobertura de los tejidos de Modal Sun

Representando gráficamente el UPF de los tejidos en función de cada uno de los parámetros estructurales estudiados se obtienen los gráficos de la Figura 2.18.



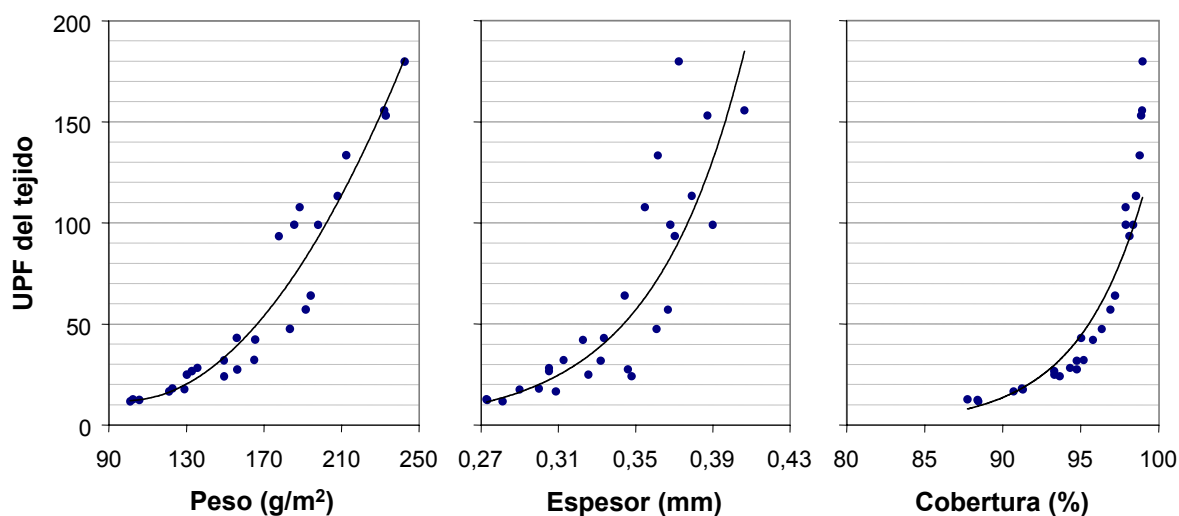


Figura 2.18. Relación entre UPF y peso por unidad de superficie, espesor y cobertura, tejidos de Modal Sun

De igual forma que para Algodón y Modal, en la serie de tejidos de Modal Sun el factor de protección a la radiación ultravioleta se ve influenciado por los diferentes parámetros estructurales, aumentando la respuesta UPF cuando lo hacen el peso del tejido, su espesor o el factor de cobertura de los mismos.

Como en la fibra de Modal, también existe entre el UPF y el peso una mayor correlación lineal ($r = 0,9235$), mientras que con el espesor y la cobertura la correlación lineal disminuye considerablemente ($r = 0,8264$ y $r = 0,8280$, respectivamente). En todos los casos la relación no es lineal, tal como muestra la Figura 2.18.

Teniendo en cuenta estos resultados, el análisis estadístico del apartado siguiente se realizará también utilizando el peso del tejido como parámetro más correlacionado con el UPF.

2.3.2.2. Análisis estadístico de los resultados

2.3.2.2.1. Modelo inicial

Para relacionar el peso por unidad de superficie con el factor de protección a la radiación ultravioleta UPF, se ha utilizado un modelo de regresión simple que relaciona la respuesta en función de una única variable. El modelo de regresión simple se ha aplicado a cada serie de tejidos fabricados con Algodón, Modal y Modal Sun.

El modelo utilizado es el de regresión lineal.

$$UPF = a + b \cdot X$$

Si con este modelo se aprecia que existe falta de linealidad entre el peso y el valor del UPF de algunos tejidos, se recurre a transformaciones para conseguir dicha linealidad.



2.3.2.2.2. Procedimiento de análisis para la estimación del modelo significativo y coeficiente de determinación del ajuste

La estimación de los coeficientes significativos de los modelos que relacionan el peso por unidad de superficie, el espesor y la cobertura con el UPF de las series de tejidos fabricados con las distintas fibras se realiza mediante regresión simple. El análisis se realiza con el programa Statgraphics 7.0, que proporciona una estimación de los coeficientes del modelo, así como el coeficiente de determinación del ajuste.

Asimismo se analizan los gráficos de residuos en función de la respuesta UPF, que proporcionan una comprobación de la hipótesis de variabilidad constante. Si los residuos forman una nube sin ninguna forma determinada se confirma que la variabilidad es constante. Si, por el contrario, se puede distinguir alguna forma determinada indican que el modelo estimado no es correcto.

2.3.2.2.3. Modelización de la respuesta UPF en función del peso por unidad de superficie

2.3.2.2.3.1. Algodón

El modelo estimado que relaciona el valor de la respuesta UPF en función del peso de los tejidos de Algodón, mediante regresión lineal, es el siguiente:

$$UPF = 0,9131 + 0,0326 \cdot \text{Peso}$$

Con un coeficiente de determinación del modelo de valor muy elevado $R^2 = 97,28\%$, que confirma la relación lineal entre la respuesta UPF y el parámetro peso.

Los gráficos de ajuste y de residuos frente a la respuesta se presentan en la Figura 2.19.

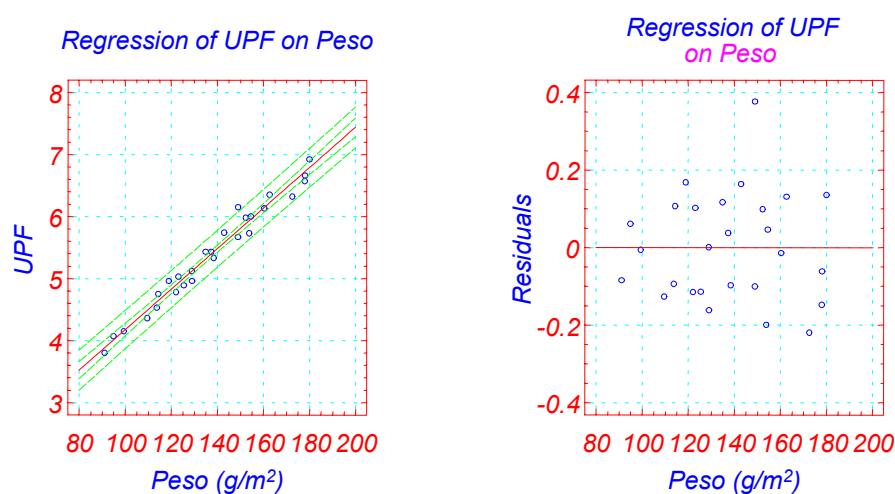


Figura 2.19. Gráficos de ajuste y de residuos frente a la respuesta UPF, tejidos de Algodón

El estudio del gráfico de ajuste y de los gráficos de residuos del modelo que estima el UPF en función del peso de los tejidos de Algodón, indica que el modelo estudiado es



válido para describir la relación entre dichos parámetros. Los puntos experimentales se ajustan bien a la recta estimada y dentro de unos intervalos de confianza y predicción bastante próximos a dicha recta. Los residuos en frente de la respuesta no presentan ninguna anomalía.

Cabe destacar el hecho de que el UPF y el peso de los tejidos de Algodón se relacionan mediante el modelo más simple, el lineal, siempre dentro del campo experimental, es decir, entre los valores que se han utilizado en el análisis. Estos resultados llevan a concluir que el UPF de los tejidos de Algodón aumenta en 0,0326 unidades al incrementarse el peso en 1 g/m².

2.3.2.2.3.2. Modal

El modelo estimado que relaciona el valor de la respuesta UPF en función del peso de los tejidos de Algodón, mediante regresión lineal, es el siguiente:

$$UPF = -5,6679 + 0,0939 \cdot Peso$$

Con un coeficiente de determinación del modelo de valor muy elevado $R^2 = 96,69\%$, que confirma la relación lineal entre la respuesta UPF y el parámetro peso.

Los gráficos de ajuste y de residuos frente a la respuesta se presentan en la Figura 2.20.

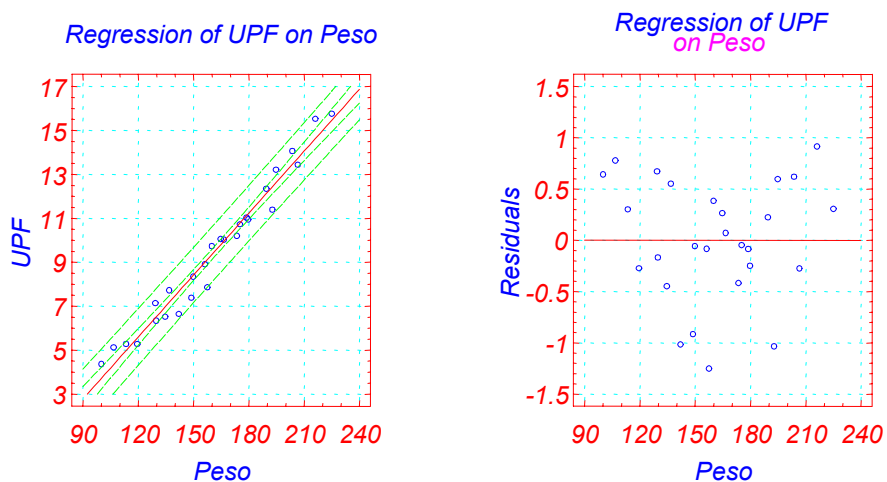


Figura 2.20. Gráficos de ajuste y de residuos frente a la respuesta UPF, tejidos de Modal

Para los tejidos de Modal, al igual que para los de Algodón, existe una gran correlación lineal entre el valor de la respuesta UPF y la variable peso. Los puntos se ajustan bien a la rcta estimada y dentro de unos intervalos de confianza y predicción muy próximos a dicha recta. Los residuos en frente de la respuesta tampoco presentan ninguna anomalía.

2.3.2.2.3.3. Modal Sun

El modelo estimado que relaciona el valor de la respuesta UPF en función del peso de los tejidos de Algodón, mediante regresión lineal, es el siguiente:



$$UPF = -127,5990 + 1,1451 \cdot Peso$$

Con un coeficiente de determinación del modelo de valor no tan elevado como para las anteriores fibras, $R^2 = 85,28\%$.

Los gráficos de ajuste y de residuos frente a la respuesta se presentan en la Figura 2.21.

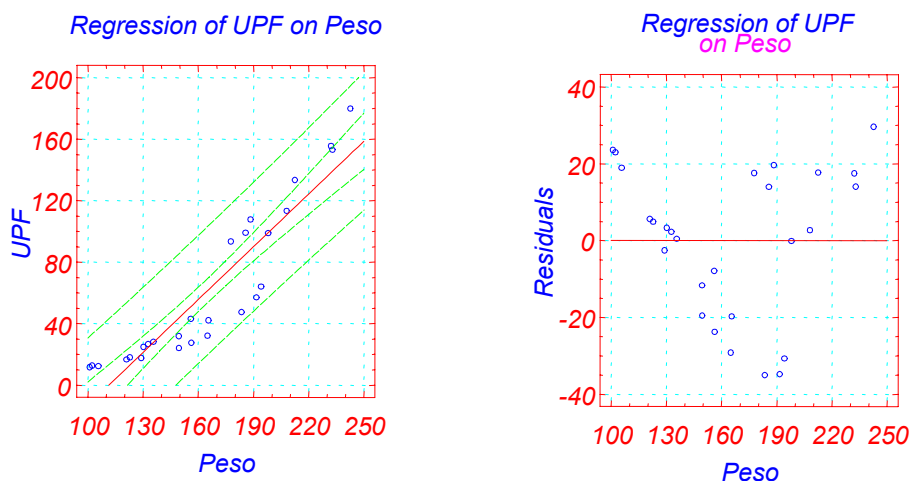


Figura 2.21. Gráficos de ajuste y de residuos frente a la respuesta UPF, tejidos de Modal Sun

La observación de los gráficos de ajuste y de residuos confirma que no existe una buena correlación lineal entre el UPF y el peso de los tejidos de Modal Sun, dentro del campo experimental. Los puntos experimentales no se ajustan bien a la recta de regresión, haciendo que los intervalos de predicción estén muy separados de ésta. El bajo coeficiente de determinación del ajuste indica que la variabilidad interna de la respuesta UPF para un peso fijo es considerable. En el gráfico de residuos se observa que los puntos no se encuentran formando una nube, sino que parecen dibujar una parábola. Por ello, se deberá utilizar algún tipo de transformación que promueva la linealidad. Se ha ensayado una de las transformaciones más utilizadas, la logarítmica. Asimismo, se ha utilizado el modelo parabólico, debido a que el gráfico de residuos anterior parece sugerir la falta de un término cuadrático en el modelo.

- Transformaciones

- $UPF = a + b \cdot \ln(Peso)$

$$UPF = -831,867 + 175,995 \cdot \ln(Peso) \quad R^2 = 77,97\%$$

- $UPF = a + b \cdot Peso + c \cdot Peso^2$

$$UPF = 89,7940 - 1,5881 \cdot Peso + 0,0081 \cdot Peso^2 \quad R^2 = 92,40\%$$

Los gráficos de ajuste y de residuos frente a la respuesta se presentan en la Figura 2.22.



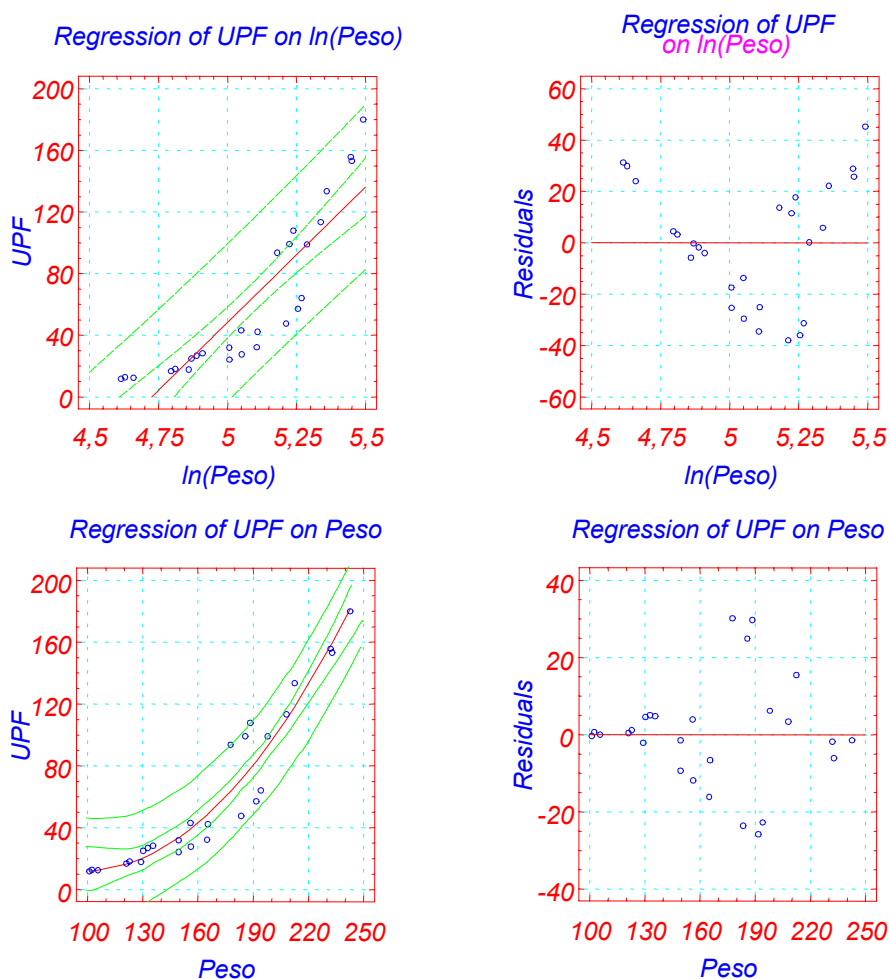


Figura 2.22. Gráficos de ajuste y de residuos frente a la respuesta UPF, tejidos de Modal Sun

El modelo que ajusta el UPF en función del logaritmo neperiano del peso presenta un gráfico de ajuste claramente deficiente, como corresponde al bajo coeficiente de determinación del modelo ($R^2 = 77,97\%$). En el gráfico de residuos se puede observar una forma parabólica que indicaría que el modelo no es correcto para describir la relación entre peso y UPF de los tejidos.

La introducción del término cuadrático en el modelo parabólico, en cambio, provoca un mejor ajuste de los puntos experimentales a la curva de regresión, con un coeficiente de determinación del modelo de valor elevado (92,40%).

Resumiendo, para los tejidos de Modal Sun, el modelo más adecuado ha resultado ser el modelo parabólico.

2.3.2.2.3.4. Comparación entre los modelos obtenidos para las diferentes fibras

Para comparar los resultados y el efecto del tipo de fibra sobre el Factor de Protección a la Radiación Ultravioleta de los tejidos en función del peso de los tejidos, se recuerdan los mejores modelos obtenidos para las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun.



- Algodón: $UPF = 0,9131 + 0,0326 \cdot Peso$ con $R^2 = 97,28\%$
- Modal: $UPF = -5,6679 + 0,0939 \cdot Peso$ con $R^2 = 96,69\%$
- Modal Sun: $UPF = 89,7940 - 1,5881 \cdot Peso + 0,0081 \cdot Peso^2$ con $R^2 = 92,40\%$

En primer lugar, cabe señalar que el que existan algunos términos negativos no significa que el UPF esté relacionado negativamente con el peso de los tejidos. Estos modelos son válidos dentro del campo experimental, es decir, para valores del peso comprendidos entre los utilizados en el análisis estadístico. Y dentro de este campo experimental no hay ningún problema. Así, en el modelo para la fibra de Modal, el valor del peso más pequeño multiplicado por su coeficiente, será un valor superior al término independiente negativo. Y en el modelo para la fibra de Modal Sun, el término cuadrático tendrá un valor muy elevado que neutralizará el coeficiente negativo del término lineal. En este último caso, el elevado valor numérico de la variable peso se magnifica al calcular su cuadrado y, por ello, enmascara la significación del término lineal, hecho que complica el análisis de los resultados.

La primera diferencia que se aprecia al observar los modelos obtenidos, es el hecho de que en el modelo para Modal Sun aparece el término cuadrático. La significación de este término, con su coeficiente positivo es indicativo de una aceleración en el aumento de la respuesta UPF a medida que aumenta el valor de la variable Peso. También el término independiente tiene un coeficiente notablemente mayor. En conjunto, en los tejidos de Modal Sun, para el mismo nivel de las variables del sistema, se estimarán valores de UPF también notablemente más altos que para los tejidos de Algodón y Modal. Los coeficientes de la serie de Modal han resultado ligeramente más altos que los obtenidos para la serie de Algodón.

Los modelos obtenidos nos permiten estimar el UPF a priori según el parámetro peso aunque siempre dentro del rango experimental, es decir, con valores de la variable entre los niveles mínimo y máximo que se han utilizado para hallar el modelo. También permiten el ajuste de dicha variable para obtener un UPF determinado. En este caso, es interesante para estimar cual es el peso mínimo del tejido para obtener un UPF de 15 (que hace al tejido buen protector), de 25 (con lo que el tejido proporcionaría buena protección) y de 40 (con lo que se obtendría una protección excelente).

Para realizar cualquiera de estas estimaciones con total seguridad no se debe utilizar el modelo exactamente, sino que deben considerarse también los intervalos de predicción. En la siguiente figura se ha representado una respuesta Y en función de una variable X, a modo de ejemplo. Se presentan los valores experimentales (puntos azules) y la respuesta estimada según un modelo hipotético (línea azul). También se han representado los intervalos de confianza del modelo (línea discontinua naranja) y los intervalos de predicción (línea discontinua roja).



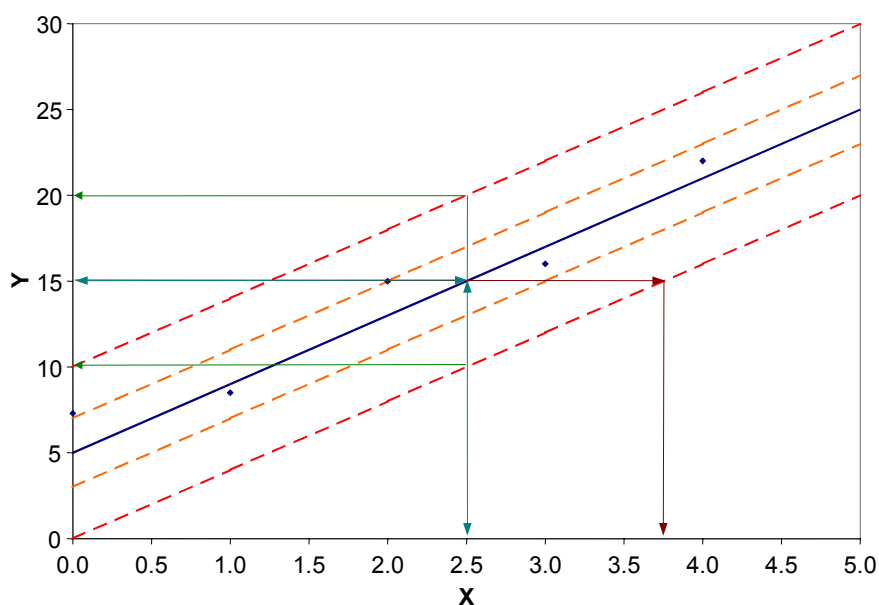


Figura 2.23. Modelo estimado e intervalos de predicción

Si para la estimación se utiliza la ecuación del modelo (línea azul marino), se obtiene que para un valor de la variable X de 2,5, el valor Y estimado es de 15 (flechas azules), o a la inversa, un valor de la respuesta Y de 15 se obtendrá para un valor de la variable X de 2,5. Estos valores estimados con la ecuación del modelo, corresponderían al valor medio de Y para una X determinada, o viceversa. Pero si se tienen en cuenta los intervalos de predicción, y, por lo tanto la variancia experimental, se observa que para un valor de la variable X de 2,5, en realidad se pueden obtener valores de Y comprendidos entre 10 y 20 (flechas verdes). Es decir, existe un 95% de probabilidad de que el valor de Y esté entre 10 y 20, pero no de que ese valor sea 15 o mayor, que es lo realmente interesante desde el punto de vista de la estimación del UPF. Para saber el valor de la variable X que nos dará esa seguridad, lo que se debe hacer es considerar los límites de los intervalos de predicción. Si se alarga la flecha hasta el límite inferior de dicho intervalo (flechas de color granate), se observa que con un valor mínimo de la variable X de 3,75, se tiene un 95% de probabilidad de que la respuesta sea como mínimo 15.

Se aplica lo antes expuesto a los resultados obtenidos para las tres series de tejidos. Con ello se estiman los valores mínimos de la variable peso que dan una seguridad del 95% de que el UPF de los tejidos sea igual o mayor que los valores necesarios para alcanzar las categorías de protección señaladas en la tabla siguiente:

Nivel de protección	UPF mínimo
Buena protección	15
Muy buena protección	25
Excelente protección	40

Tabla 2.25. UPF mínimo para conseguir los diferentes niveles de protección



A continuación se dibuja el modelo estimado, junto con sus intervalos de confianza y de predicción, para las series de tejidos de Algodón (Figura 2.24), Modal (Figura 2.25) y Modal Sun (Figura 2.26).

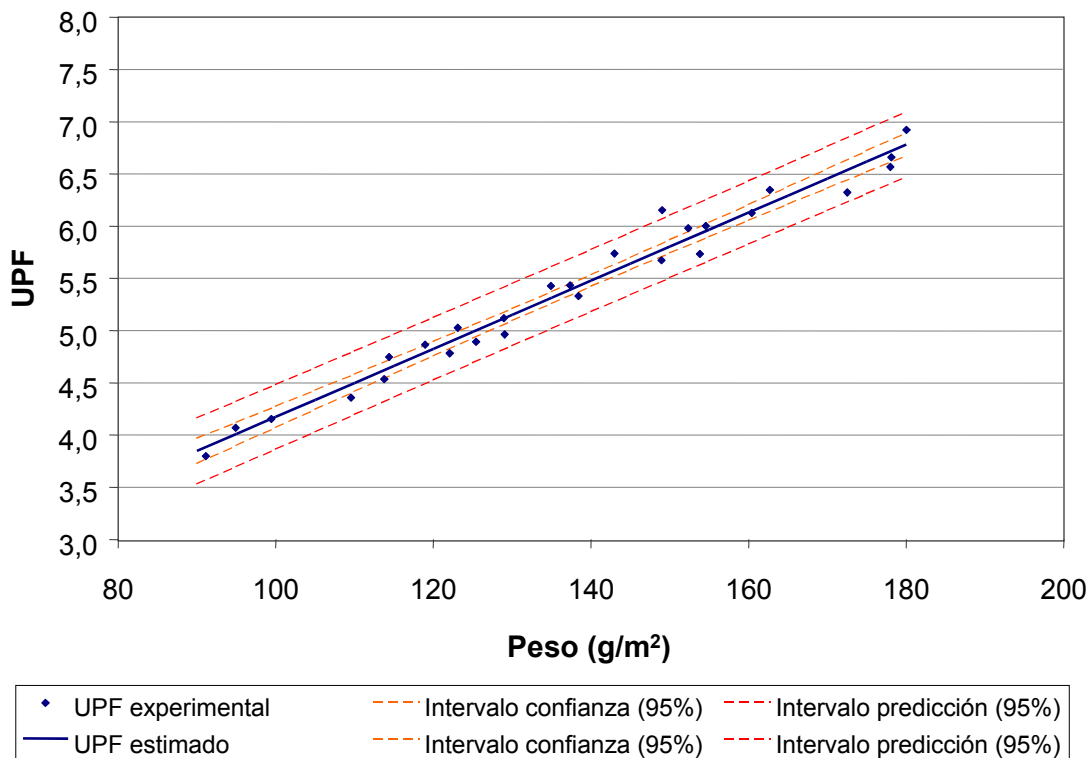


Figura 2.24. Modelo estimado, tejidos de Algodón

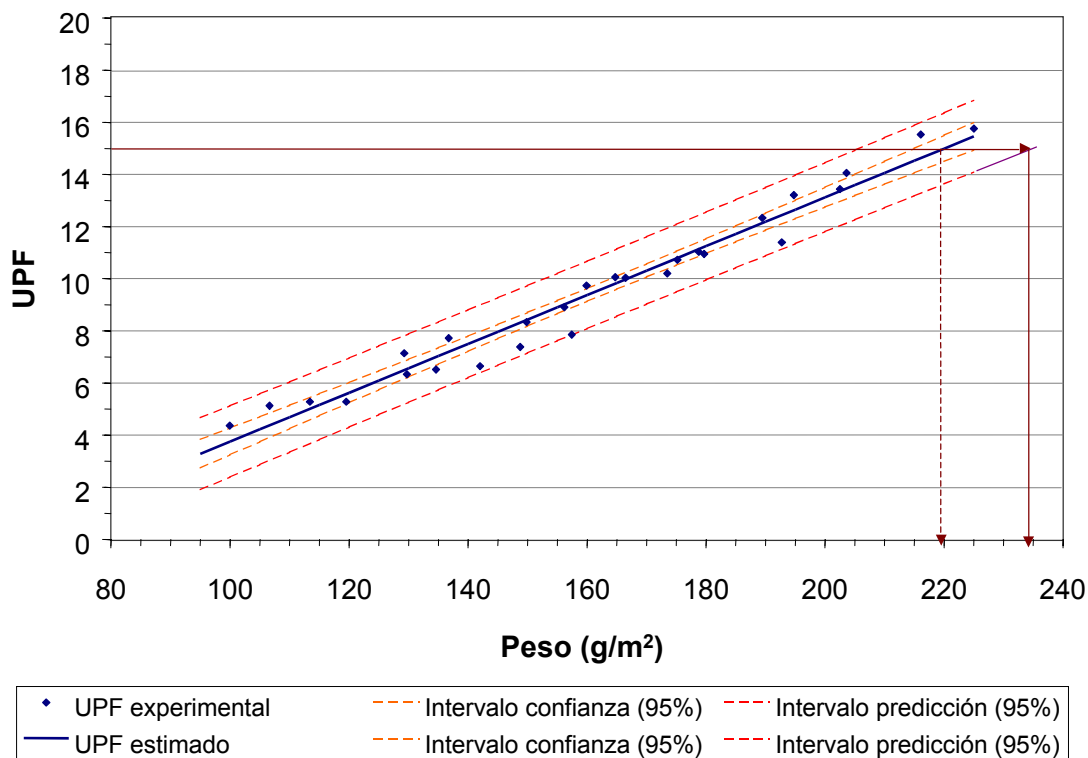


Figura 2.25. Modelo estimado, tejidos de Modal



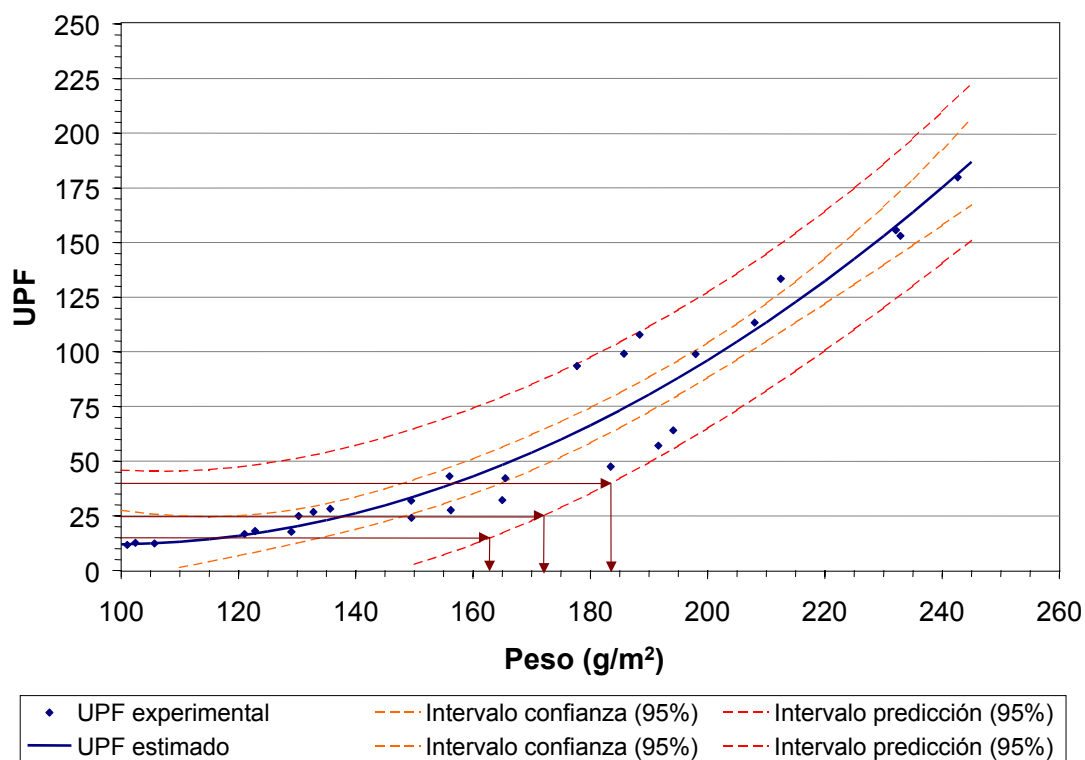


Figura 2.26. Modelo estimado, tejidos de Modal Sun

En el gráfico correspondiente a los tejidos de Algodón, se observa que no se llega a alcanzar un UPF igual o superior a 15. Ello indica que no se podrá obtener ningún tejido de Algodón protector (con un UPF superior a 15) dentro del rango experimental.

En el caso de los tejidos de Modal se han podido encontrar valores de la variable peso que podrían proporcionar un valor de UPF estimado superior a 15 (a partir de aproximadamente 220 g/m²). Sin embargo, dentro del campo experimental no hay ningún valor del intervalo de predicción inferior (al 95%) que sea superior a 15. No obstante, dentro del intervalo de predicción se alcanza un valor muy cercano (UPF = 14,5 para un peso de 225 g/m²). Se considera que el valor mínimo del peso para tener una seguridad de que el tejido sea protector estaría alrededor de 235 g/m².

Para la serie de tejidos de Modal Sun, se han podido estimar los pesos mínimos necesarios para conseguir tejidos con todos los niveles de protección. Con un peso mínimo de 163 g/m² se tiene una casi total seguridad de que el tejido presentará al menos buena protección (UPF superior a 15), con un mínimo peso de 172 g/m² el tejido presentará muy buena protección (UPF superior a 25) y si el peso es mayor que 184 g/m² el tejido presentará excelente protección (UPF superior a 40).

En la Tabla 2.26 se presenta un resumen de los pesos mínimos necesarios para obtener los niveles de protección contemplados en la norma AS/NZ 4399: 1996, para las tres series de fibras estudiadas.



Nivel de protección	UPF mínimo	Peso mínimo (g/m ²)		
		Algodón	Modal	Modal Sun
Buena protección	15	No se consigue	(235)	163
Muy buena protección	25	No se consigue	No se consigue	172
Excelente protección	40	No se consigue	No se consigue	184

Tabla 2.26. Peso mínimo estimado para conseguir los diferentes niveles de protección

Como se puede observar, las diferencias entre las fibras son muy marcadas.

- Dentro del rango experimental, y a pesar de que entre los tejidos estudiados hay algunos con pesos bastante altos, ha sido imposible conseguir tejidos de Algodón con protección. Para conseguir un mínimo de protección en estos tejidos se deberá recurrir a aumentar el peso de los mismos, en detrimento de su confortabilidad para ser utilizados como tejidos de verano. Otra posibilidad sería recurrir a la aplicación de productos químicos (colorantes, blanqueadores ópticos o productos de acabado) que podrían proporcionar la necesaria protección sin aumentar el peso de los tejidos y, por lo tanto, sin reducir su confort.
- Para conseguir un mínimo de protección en los tejidos de Modal se necesitan tejidos con pesos bastante altos (se estima que a partir de 235 g/m²) para su uso como prendas de verano. Si se requiere un nivel de protección alto o excelente, también se deberá recurrir a aumentar el peso de los tejidos, en detrimento de la confortabilidad de los mismos para ser utilizados en prendas de verano, o bien recurrir a la aplicación de productos químicos como colorantes, blanqueadores ópticos o productos de acabado.
- Para la serie de Modal Sun sí que se han conseguido tejidos con todos los niveles de protección dentro del campo experimental. Se puede obtener ya una buena protección con tejidos muy ligeros e incluso protección excelente con tejidos bastante ligeros fabricados con esta fibra, lo que la hace muy confortable y atractiva para su uso en prendas protectoras de verano.

2.3.3. Análisis de las diferencias entre las fibras por espectroscopía de infrarrojo

Diversos estudios destacan la eficacia de la técnica de espectroscopía de infrarrojo FT-IR como método para determinar diferencias estructurales entre compuestos. Concretamente, esta técnica se ha utilizado para la caracterización de la estructura de polímeros de base celulósica. En este estudio, se han utilizado tejidos fabricados con tres tipos de fibras diferentes, pero todas ellas con base celulósica: Algodón, Modal y Modal Sun. Sin embargo, y a pesar de estar constituidas principalmente por celulosa, se producen notables diferencias en la protección contra la radiación ultravioleta



proporcionada por cada fibra. En un intento de explicar estas diferencias se han analizado los espectros de infrarrojo de muestras de las tres fibras.

Las bandas de absorción en la región del infrarrojo asignadas a las vibraciones características del polímero de celulosa, han sido documentadas en varios estudios en los que se analizaron muestras de celulosa I (o celulosa nativa) y celulosa II, encontrándose diferencias significativas que permiten la distinción entre estos tipos de celulosa.

En la Tabla 2.27 se muestra la asignación de bandas de un compuesto caracterizado por ser del tipo celulosa I ⁽⁴⁶⁾:

Nº de onda (cm ⁻¹)	Intensidad	Vibración asociada
3405	Sh	Tensión OH (enlace puente de hidrógeno intermolecular)
3350	S	Tensión OH (enlace puente de hidrógeno intramolecular)
3305	Sh	Tensión OH (enlace puente de hidrógeno intermolecular)
2970	W	Tensión CH
2945	Sh	Tensión asimétrica CH ₂
2914 2897 2870	Sh M M	Tensión CH
2853	M	Tensión simétrica CH ₂
1635	-	H ₂ O absorbida
1455	Sh	Flexión OH en el plano
1430	M	Flexión CH ₂ simétrico
1374 1358	M M	Flexión CH
1336	M	Flexión OH en el plano
1317	M	Aleteo CH ₂
1282	M	Flexión CH
1205	W	Flexión OH en el plano
1162	S	Tensión asimétrica puente COC
1110	S	Tensión asimétrica del anillo
1058 1035 1015 1000 985	S S M Sh Sh	Tensión CO vibraciones del esqueleto
895	W	Tensión asimétrica fuera de fase del anillo
800	Sh	Vibración ligera del anillo
740	Sh	Balaceo CH ₂
700 663	M M	Flexión OH fuera del plano

Tabla 2.27. Asignación de bandas en el espectro de la celulosa I
(Intensidad: S – fuerte, M – media, W – débil, Sh – hombro)



De todas estas bandas, cabe destacar como principales características del espectro de celulosa I las siguientes ^(46, 47):

- La banda fuerte a 3350 cm^{-1} indica un puente de hidrógeno intramolecular, posiblemente del tipo $\text{O}_3 - \text{H} \cdots \text{O}_5'$, mientras que las bandas a 3305 y 3405 cm^{-1} indican puentes de hidrógeno intermoleculares entre cadenas, posiblemente del tipo $\text{O}_6 - \text{H} \cdots \text{O}_{\text{puente}}$. El otro conjunto de puentes de hidrógeno intermoleculares del tipo $\text{O}_2 - \text{H} \cdots \text{O}_6$ no ha sido identificado, siendo posible la hipótesis de que sus bandas se superpongan con otras de mayor frecuencia cercanas a la de 3350 cm^{-1} .
- La tensión simétrica del grupo CH_2 a 2853 cm^{-1} y la flexión simétrica del CH_2 a 1430 cm^{-1} son paralelas.
- Las vibraciones de flexión del grupo OH en el plano se producen a 1205 , 1336 y 1455 cm^{-1} y fuera del plano a 663 y 700 cm^{-1} .
- Las vibraciones de tensión y flexión del $\text{C}_1\text{-H}$ se asignan a las bandas en 2914 y 1358 cm^{-1} .
- La banda fuerte en 1162 cm^{-1} se puede asignar a la tensión asimétrica del puente COC.
- Las frecuencias de tensión del anillo se asignan a la banda a 895 cm^{-1} y a 1110 cm^{-1} , mientras que la banda cercana a 800 cm^{-1} se asigna a la vibración ligera del anillo.
- Las bandas entre 985 y 1058 cm^{-1} se asignan a los modos de tensión de los grupos C-OH.

En la Tabla 2.28 se muestra la asignación de bandas de un compuesto caracterizado por ser del tipo celulosa II ⁽⁴⁶⁾.

De todas las bandas expuestas en la tabla, cabe destacar como principales características del espectro de celulosa II las siguientes ⁽⁴⁶⁾:

- Las bandas a 3175 , 3305 y 3350 cm^{-1} se asignan a las frecuencias de tensión de puentes de hidrógeno intermolecular, mientras que las bandas a 3447 y 3488 cm^{-1} indican puentes de hidrógeno intramoleculares.
- Las bandas a 2874 , 2891 , 2904 , 2955 y 2968 cm^{-1} se asignan a las 5 frecuencias de tensión del grupo CH. Estas bandas son similares a las correspondientes a la celulosa cristalizada I.
- Si se compara esta tabla con la anterior (Tabla 2.27) se puede observar que hay diferencias obvias entre los espectros de celulosa I y celulosa II. Especialmente, son diferentes las bandas en la región de tensión del grupo OH y también las bandas



cercanas a 700 y 1335 cm^{-1} . Estas diferencias son causadas por la diferente estructura del cristal y por diferencias en los puentes de hidrógeno.

Nº de onda (cm^{-1})	Intensidad	Vibración asociada
3448 3447	S S	Tensión OH (enlace puente de hidrógeno intramolecular)
3350 3305 3175	S S S	Tensión OH (enlace puente de hidrógeno intermolecular)
2968 2955	W W	Tensión CH
2933	M	Tensión asimétrica CH_2
2904 2891 2874	S S Sh	Tensión CH
2850	W	Tensión simétrica CH_2
1635	-	H_2O absorbida
1470	Sh	Flexión OH en el plano
1416	W	Flexión CH_2 simétrico
1375 1365	M M	Flexión CH
1335	W	Flexión OH en el plano
1315	W	Aleteo CH_2
1277	M	Flexión CH
1200	M	Flexión OH en el plano
1155	S	Tensión asimétrica puente COC
1107	S	Tensión asimétrica del anillo
1078 1060 1035 1020 1005 996 965	S S S S S S Sh	Tensión CO vibraciones del esqueleto
892	M	Tensión asimétrica fuera de fase del anillo
800	Sh	Vibración ligera del anillo
760	Sh	Balanceo CH_2
700 650	Sh S	Flexión OH fuera del plano

Tabla 2.28. Asignación de bandas en el espectro de la celulosa II
(Intensidad: S – fuerte, M – media, W – débil, Sh – hombro)



2.3.3.2. Espectros de infrarrojo de muestras de las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun

Los espectros en la región del infrarrojo obtenidos en la medida de muestras de fibras de Algodón, Modal y Modal Sun se presentan en la Figura 2.27, Figura 2.28 y Figura 2.29, respectivamente.

En las figuras se puede observar que los espectros de todas las fibras estudiadas corresponden, como es natural, a espectros similares al de la celulosa.

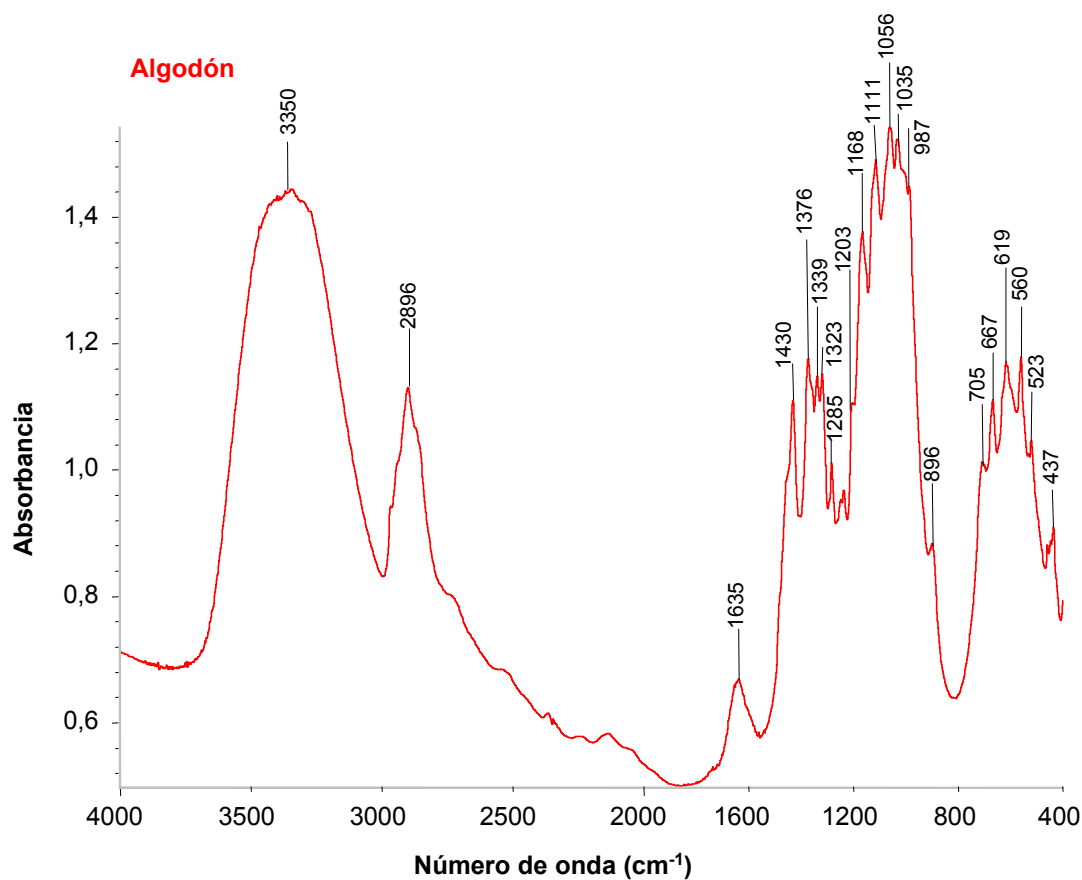


Figura 2.27. Espectro de infrarrojo de la fibra de Algodón



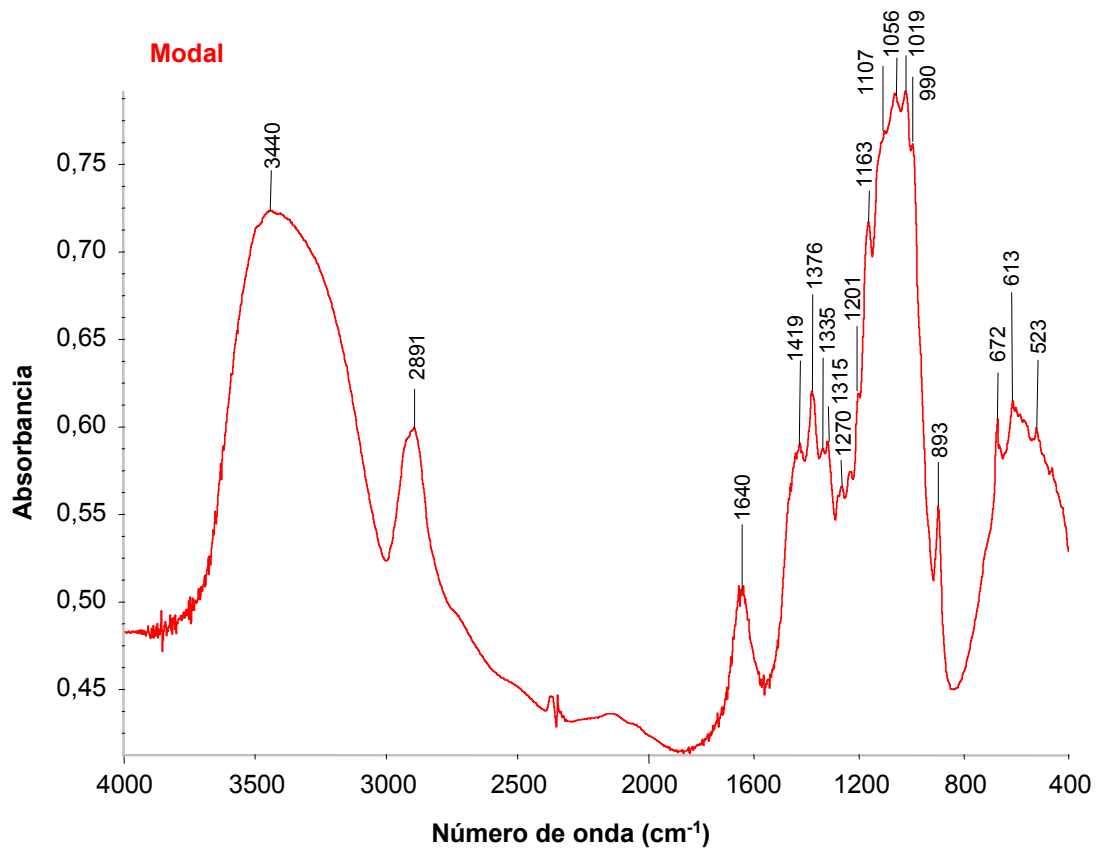


Figura 2.28. Espectro de infrarrojo de la fibra de Modal

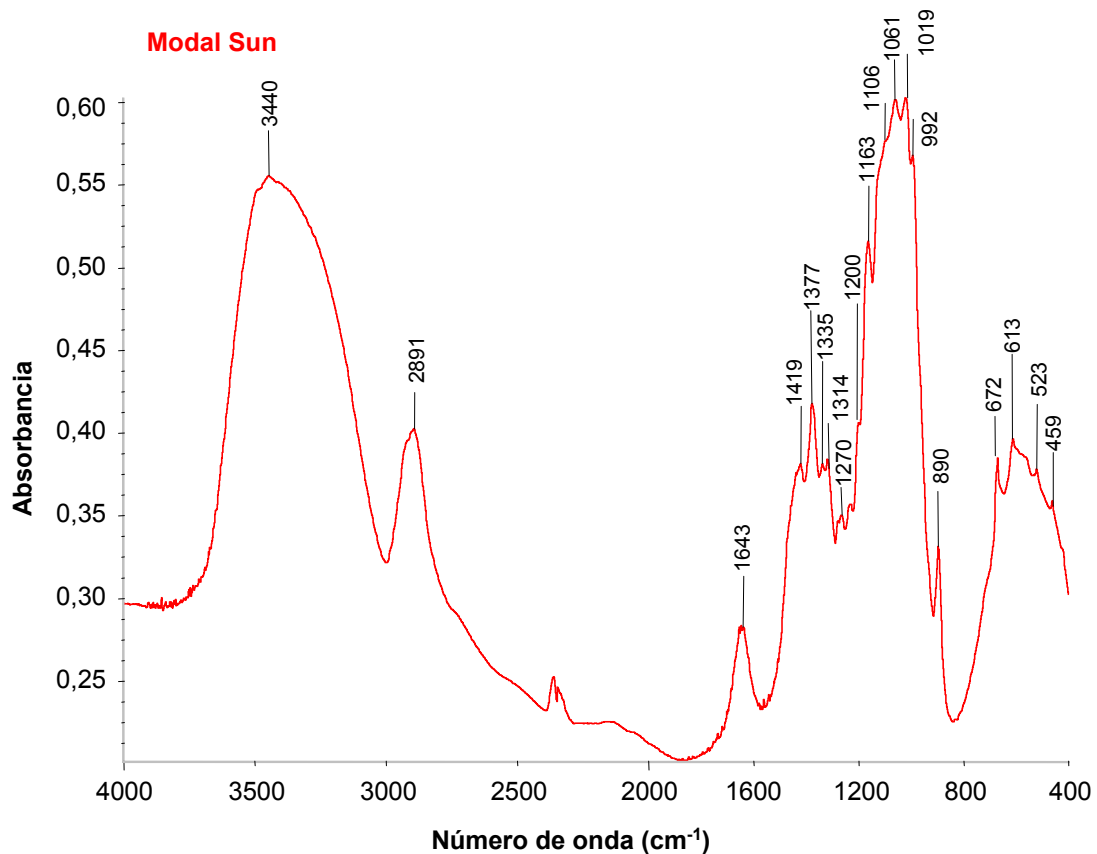


Figura 2.29. Espectro de infrarrojo de la fibra de Modal Sun



En la Tabla 2.29 se resumen las vibraciones características de la celulosa I y II, y las frecuencias a las que se han obtenido para cada una de las fibras.

Vibraciones típicas de la celulosa	Observaciones	Nº de onda (cm ⁻¹)		
		Algodón	Modal	Modal Sun
Tensión OH puentes de hidrógeno intramolecular	Característico en celulosa I a 3350 y celulosa II a 3447	3350	3440	3440
Tensión CH	Característico en celulosa I a 2897 y celulosa II a 2891	2896	2891	2891
OH del agua absorbida por la celulosa	Característico en celulosa I y II a 1635	1635	1640	1643
Tensión simétrica CH ₂	Característico en celulosa I a 1430 y celulosa II a 1416	1430	1419	1419
Flexión CH	Característico en celulosa I y celulosa II a 1375	1376	1376	1377
Flexión en el plano -OH	Característico en celulosa I y celulosa II a 1335	1339	1335	1335
Aleteo CH ₂	Característico en celulosa I a 1317 y celulosa II a 1315	1323	1315	1314
Flexión CH	Característico en celulosa I a 1282 y celulosa II a 1277	1285	1270	1270
Flexión OH en el plano	Característico en celulosa I a 1205 y celulosa II a 1200	1203	1201	1200
Tensión asimétrica del puente C-O-C	Característico en celulosa I a 1162 y celulosa II a 1155	1168	1163	1163
Tensión asimétrica del anillo	Característico en celulosa I a 1110 y celulosa II a 1107	1111	1107	1106
Tensión C-O vibraciones del esqueleto	Celulosa I: 1058, 1035, 1015, 1000, 985 Celulosa II: 1078, 1060, 1035, 1020, 1005, 996, 965	1056 1035 987	1056 1019 990	1061 1019 992
Tensión asimétrica del anillo (grupo C ₁)	Característico en celulosa I a 895 y celulosa II a 892	896	893	890

Tabla 2.29. Vibraciones características de la celulosa y frecuencias en que se producen según los espectros de Algodón, Modal y Modal Sun

En la Figura 2.30 se han representado conjuntamente los espectros de infrarrojo de las tres fibras Algodón, Modal y Modal Sun, para facilitar la observación de las diferencias entre ellas. También se presentan dichos espectros ampliados a la zona de la “huella dactilar”, en la Figura 2.31.



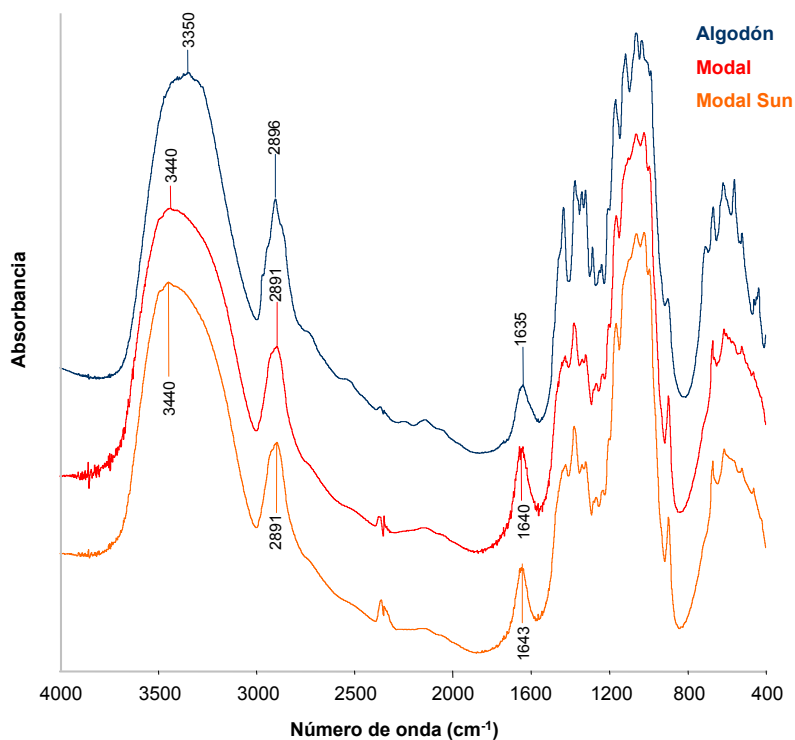


Figura 2.30. Espectros de infrarrojo de las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun

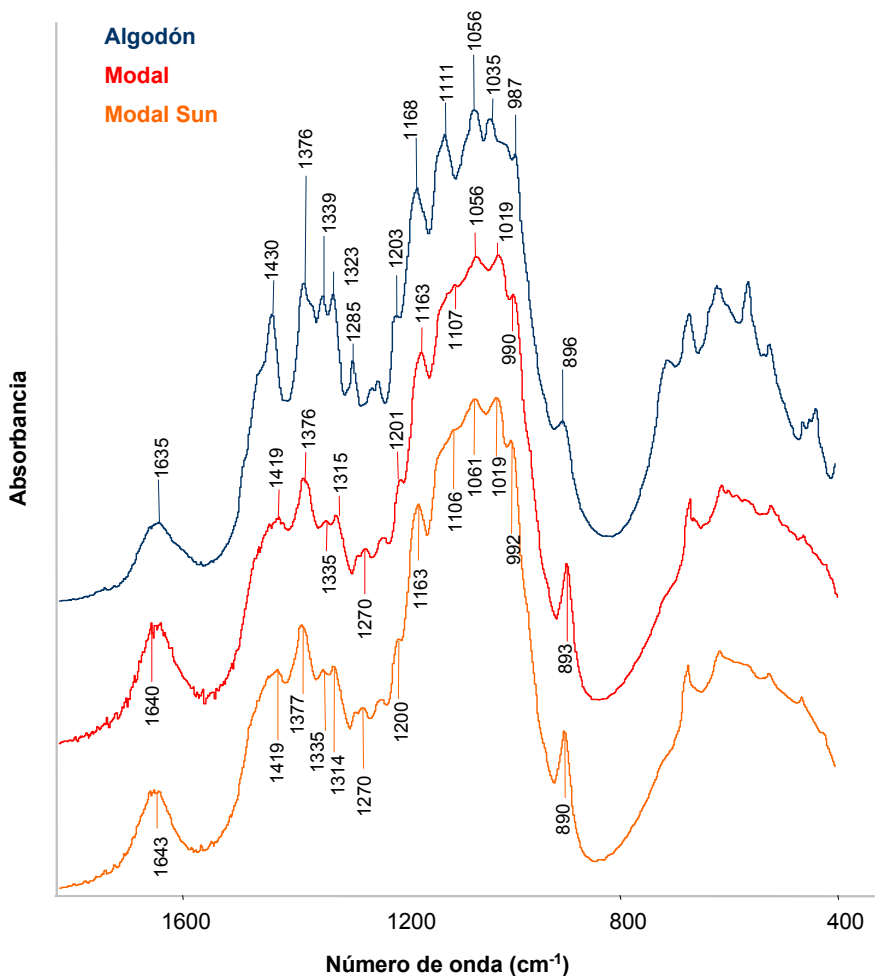


Figura 2.31. Espectros de infrarrojo de Algodón, Modal y Modal Sun en la zona de la “huella dactilar”



En la Tabla 2.29 y la Figura 2.30 y Figura 2.31 se puede observar que las bandas de absorción de las fibras Modal y Modal Sun se producen a los mismos números de onda. Los espectros de infrarrojo de estas dos fibras son muy similares. Esto es normal teniendo en cuenta que se trata casi de la misma fibra, obtenida a partir de la misma materia prima y por el mismo proceso de hilatura. La única diferencia entre estas dos fibras es que se ha utilizado un aditivo en la fabricación de la fibra Modal Sun. Este aditivo (un producto absorbente de radiación ultravioleta) no ha causado ninguna diferencia en los espectros de ambas fibras, por lo que se puede concluir que la concentración utilizada del producto no es detectable por la técnica de espectroscopía FT-IR.

En cambio, se pueden observar algunas diferencias en los espectros de Algodón, al compararlo con los de las fibras de Modal y Modal Sun. Existen algunas vibraciones moleculares que provocan bandas de absorción a números de onda diferentes para esta fibra que para las fibras de Modal y Modal Sun, es decir, se produce un cierto desplazamiento de algunas bandas de absorción.

Sobretudo, son destacables las diferencias en ciertas bandas:

- Una de ellas es la debida a la tensión de los grupos OH intramoleculares (3440 cm^{-1}), característico únicamente de la celulosa cristalizada de tipo II, que sólo aparece en los espectros de Modal y Modal Sun.
- También la banda correspondiente a la tensión CH se presenta en una frecuencia mayor en la fibra de Algodón (a 2896 cm^{-1}) que en las fibras de Modal y Modal Sun (a 2891 cm^{-1}). También este hecho indicaría la mayor presencia de celulosa I como componente de la fibra de Algodón y de celulosa II en el caso de Modal y Modal Sun.
- Otro desplazamiento indicativo de diferencias entre celulosa I y celulosa II es el causado por el aleteo del grupo CH_2 , con una banda de absorción de gran intensidad a 1430 cm^{-1} para el Algodón (característico de la celulosa I) y a 1419 cm^{-1} para el Modal y Modal Sun (característico de la celulosa II), siendo en este caso mucho menos perceptible la banda.
- La tensión asimétrica del anillo es otra banda característica de la celulosa que proporciona mucha información. Cuando predomina la celulosa cristalizada I esta banda aparece bien marcada a un número de onda de 1110 cm^{-1} , caso que se puede observar en el espectro de la fibra de Algodón. Para las fibras de Modal y Modal Sun se observa una ligera flexión que podría corresponder a este movimiento molecular en números de onda cercanos a 1107 cm^{-1} , que confirmaría también el predominio de celulosa cristalizada II.
- Por último, la frecuencia del grupo C_1 presenta una banda de absorción a un número de onda ligeramente mayor en la fibra de Algodón, que en la fibra de Modal y Modal



Sun. En el Algodón se sitúa muy cercana al número de onda observado en muestras de celulosa cristalizada I (a 895 cm^{-1}), mientras que el pico en Modal y Modal Sun se sitúa en números de onda más cercanas a la de la celulosa cristalizada II (a 892 cm^{-1}).

Las diferencias en estas bandas de absorción entre celulosa cristalizada I y II, así como en celulosa amorfa, han sido observadas y estudiadas por varios autores, que llegaron a la conclusión de que era posible utilizar la técnica de espectroscopía FT-IR para estudiar la cristalinidad de la celulosa.

En concreto Nelson y O'Connor⁽⁴⁸⁾ observaron que había algunas bandas de absorción estrechamente relacionadas con la cristalinidad de las muestras de celulosa. En su estudio tomaron celulosas I, II y amorfa con varios niveles de cristalinidad y comprobaron que se producían cambios de intensidad de absorción en los números de onda de 1372 , 1335 y 1315 cm^{-1} . Seleccionaron la banda a 1372 cm^{-1} , asignada a la flexión del grupo C-H, que no puede verse afectada por el contenido de agua absorbida por la celulosa. También escogieron otra banda, a 2900 cm^{-1} de número de onda (tensión C-H), que parecía no verse afectada por el incremento o decremento de la cristalinidad de la muestra. Relacionando las absorbancias de las muestras a dichas bandas a_{1372}/a_{2900} obtuvieron un "índice de cristalinidad total", cuyo valor crece al aumentar la cristalinidad de las muestras. Este índice puede aplicarse a muestras de celulosa cristalizada I, II y a mezclas de ambas.

Para encontrar la absorbancia al número de onda 1372 cm^{-1} , se traza una línea base que une las tangentes al espectro que comprenden las bandas de 1372 , 1335 y 1312 cm^{-1} (las tangentes están a 1292 y 1408 cm^{-1}) y se mide la altura del pico a 1372 . La línea base para el pico a 2900 se halla trazando una línea paralela al eje de las frecuencias desde la frecuencia donde se sitúa la tangente a la izquierda de la banda (desde 3000).

Este índice propuesto por Nelson y O'Connor en 1964, complementa a un índice de cristalinidad anteriormente propuesto por el mismo equipo, que relaciona las absorbancias a los números de onda de 1429 y 893 cm^{-1} . En sus estudios observaron que durante la decristalización del polímero de algodón, la banda a 1429 cm^{-1} disminuye mientras la de 893 cm^{-1} aumenta. Cuando se aplica sobre celulosa cristalizada I, el valor de este índice disminuye cuando la cristalinidad aumenta. En cambio, sobre celulosa cristalizada II, el índice aumenta al aumentar la cristalinidad.

Para encontrar la absorbancia a las frecuencias utilizadas en este último índice, se traza una línea base que une las tangentes al espectro que comprenden la banda en cuestión y se mide la altura de la banda. Las líneas base para la banda a 1429 se sitúa entre 1405 y 1505 y para la banda a 893 entre 869 y 915 cm^{-1} .



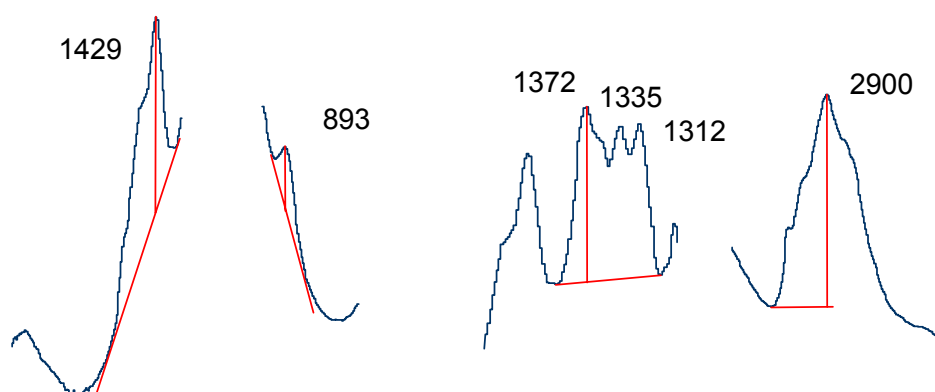


Figura 2.32. Líneas de base para el cálculo de los índices de cristalinidad A_{1429}/A_{893} y A_{1372}/A_{2900}

Los índices obtenidos se presentan en la Tabla 2.30.

Materia	Índice de cristalinidad A_{1429}/A_{893}	Índice de cristalinidad total A_{1372}/A_{2900}
Algodón	3,03	0,82
Modal	0,45	0,64
Modal Sun	0,52	0,69

Tabla 2.30. Índices de cristalinidad

Los resultados en los índices de cristalinidad obtenidos por espectroscopia FT-IR muestran que la fibra de Algodón está constituida mayoritariamente por celulosa cristalizada de tipo I, con un índice de cristalinidad de valor muy superior a 1, mientras que las fibras de Modal y Modal Sun lo están por celulosa cristalizada de tipo II. Asimismo, el índice de cristalinidad total de la fibra de Algodón es mayor que el obtenido para las fibras de Modal y Modal Sun, éstas últimas con valores muy similares. Quizás este hecho podría ser la razón de las diferencias en el factor de protección proporcionado por los tejidos de Algodón respecto al obtenido para las fibras de Modal. Una posible hipótesis sería que la absorción de radiación UV es menor en las zonas cristalinas que las amorfas. Esta hipótesis explicaría que los tejidos de Modal, fibra con menor cristalinidad, tengan una mayor capacidad de absorción de la radiación UV que los tejidos de Algodón. Pero esta hipótesis debería ser comprobada con estudios más profundos, que exceden el objeto de esta tesis.

Por otra parte, los resultados no pueden explicar que exista una diferencia tan notable en el factor de protección a la radiación ultravioleta entre los tejidos de Modal y Modal Sun. Los índices de cristalinidad obtenidos para estas fibras son muy similares entre sí y ambas están constituidas mayoritariamente por celulosa de tipo II. Sus espectros FT-IR presentan una curva muy similar, aunque se conoce que en la fibra de Modal Sun se ha adicionado un producto absorbente de radiación ultravioleta. Se ha comprobado también que, cuando se procesan los espectros mediante sustracción espectral, no aparecen bandas de absorción determinantes para detectar las diferencias entre las dos fibras. Por



lo tanto, la única explicación es que el producto añadido al Modal Sun está presente en una concentración no detectable mediante la técnica de espectroscopía FT-IR.

2.3.3.3. Espectros de infrarrojo de muestras calcinadas de las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun

Como se ha indicado anteriormente, en el espectro de la fibra Modal Sun no se ha encontrado ninguna diferencia significativa con respecto al espectro de la fibra Modal, que nos permita dilucidar el producto absorbente de la radiación ultravioleta añadido durante la hilatura. Este hecho puede ser debido a que la concentración del producto es muy baja y, por tanto, no detectable con la técnica de espectroscopía FT-IR. Para intentar detectar este producto se han calcinado muestras de las diferentes fibras de forma que se elimina todo el material orgánico y quedan los residuos de material inorgánico. Con dichos residuos se han preparado pastillas en matriz de bromuro de potasio y se han analizado con el espectrómetro.

En la Figura 2.33, Figura 2.34 y Figura 2.35 se muestra el espectro de infrarrojo obtenido para las muestras de Algodón, Modal y Modal Sun calcinadas.

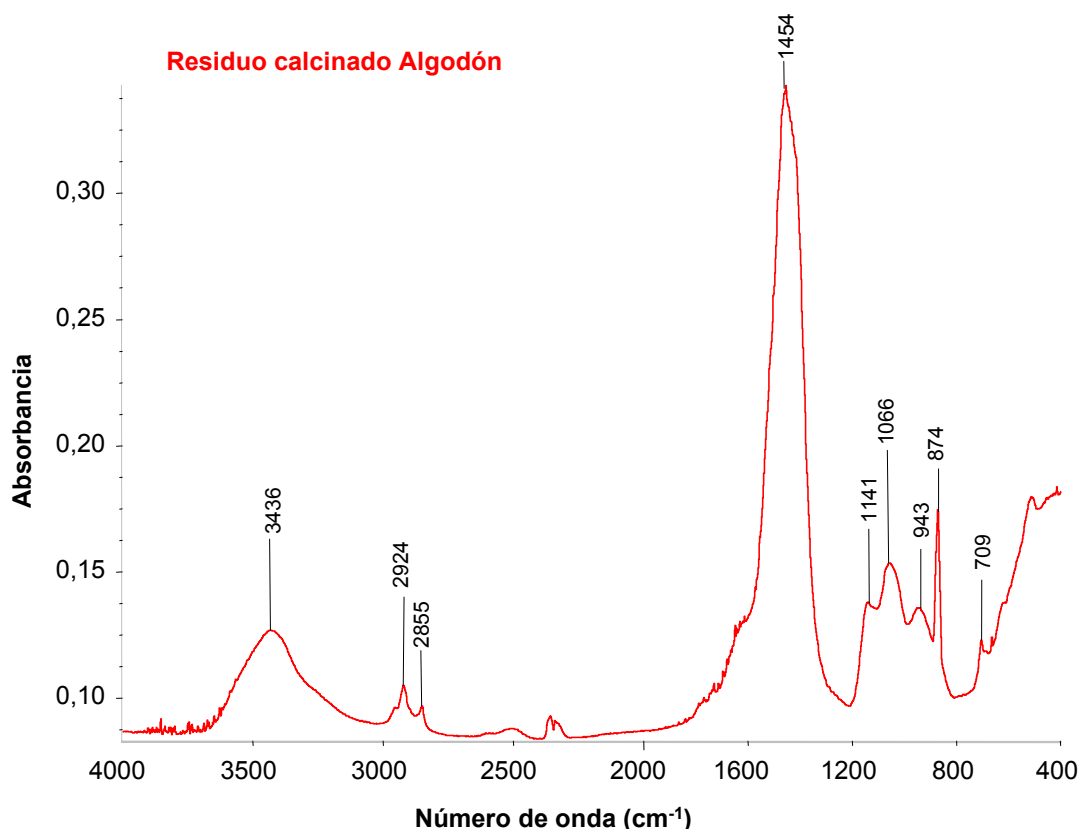


Figura 2.33. Espectro de infrarrojo del residuo calcinado de la fibra de Algodón



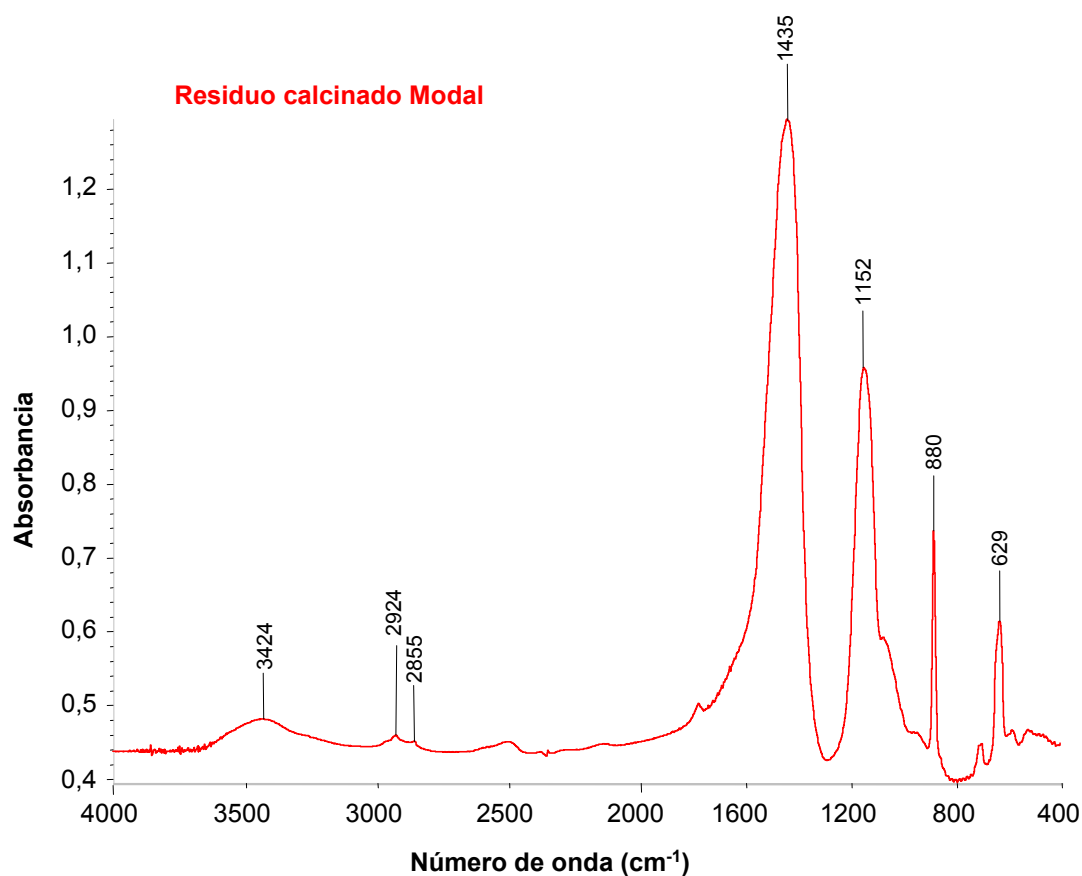


Figura 2.34. Espectro de infrarrojo del residuo calcinado de la fibra de Modal

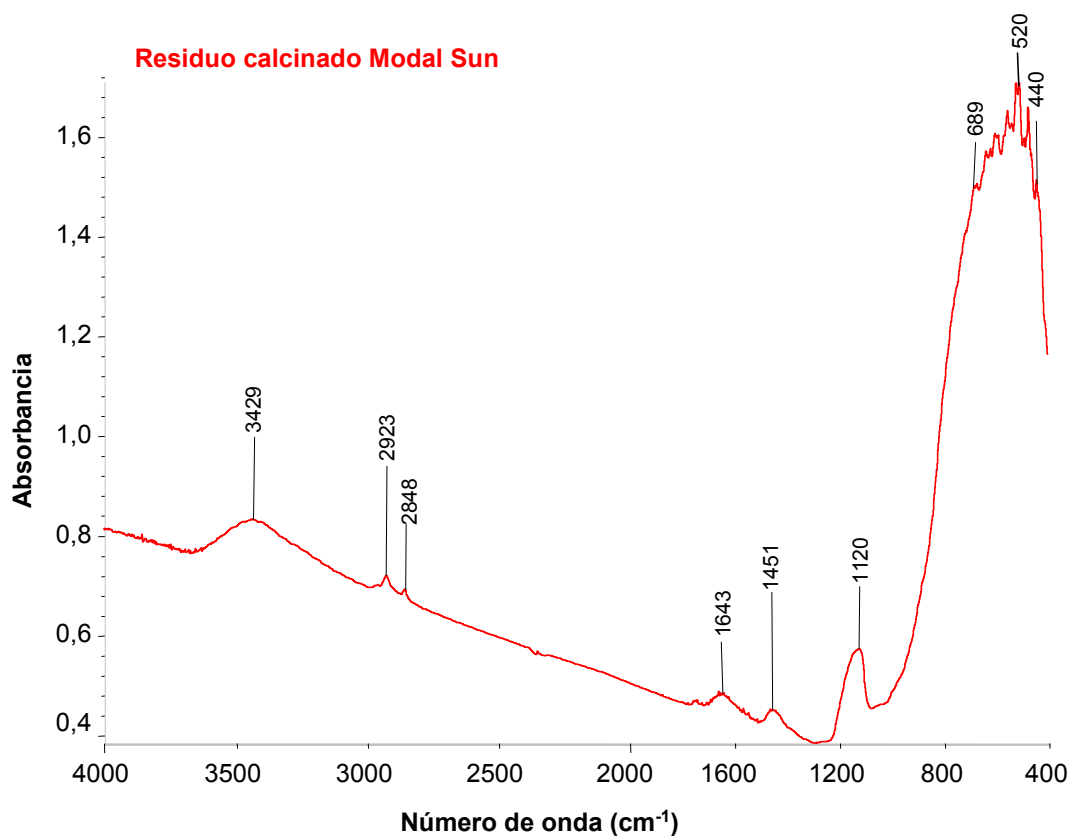


Figura 2.35. Espectro de infrarrojo del residuo calcinado de la fibra de Modal Sun



Analizando los espectros de los residuos calcinados de las fibras, se observa que los espectros de las cenizas de Algodón y Modal presentan bandas con absorbancias más intensas en números de onda similares, mientras que el espectro de la ceniza de Modal Sun es significativamente diferente. Este último espectro presenta bandas en números de onda similares a las otras fibras, pero estas bandas son menos distinguibles. Ello es consecuencia de la mayor magnitud en absorbancia debida a la presencia de un compuesto inorgánico, con una banda muy intensa en números de onda bajos (700 a 400 cm^{-1}). Por lo tanto, en las fibras de Modal Sun está presente algún compuesto inorgánico que no lo está en las fibras de Algodón y Modal.

Para intentar identificar los compuestos inorgánicos presentes en las cenizas de las fibras estudiadas, se ha utilizado la biblioteca de espectros Hummel.

Al realizar la búsqueda de espectros coincidentes se ha encontrado el mismo resultado para los espectros de los residuos calcinados de las fibras de Algodón y Modal. Aunque mostrando bandas adicionales que corresponderían a otros residuos, la mayor coincidencia se produce al comparar los espectros con el del compuesto inorgánico carbonato cálcico, que se muestra en la Figura 2.36.

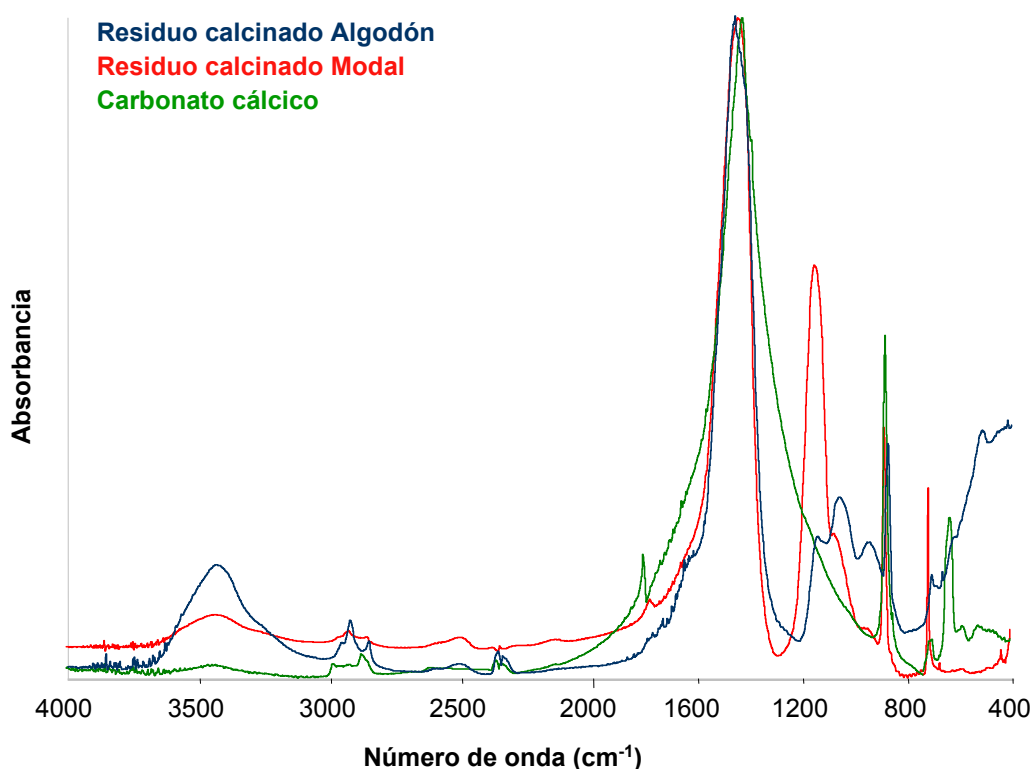


Figura 2.36. Comparación de los espectros en el infrarrojo del carbonato cálcico y los residuos calcinados de las fibras de Algodón y Modal

La presencia de carbonato cálcico como residuo inorgánico en las muestras de Algodón y Modal es fácilmente explicable, ya que es un producto que se añade habitualmente durante el procesado textil.



Al realizar la búsqueda en la biblioteca Hummel de un espectro coincidente con el del residuo calcinado de la fibra de Modal Sun, se ha obtenido, en cambio, una mayor coincidencia con dos productos inorgánicos diferente, el dióxido de titanio y el óxido de zinc, cuyos espectros se muestran en la Figura 2.37.

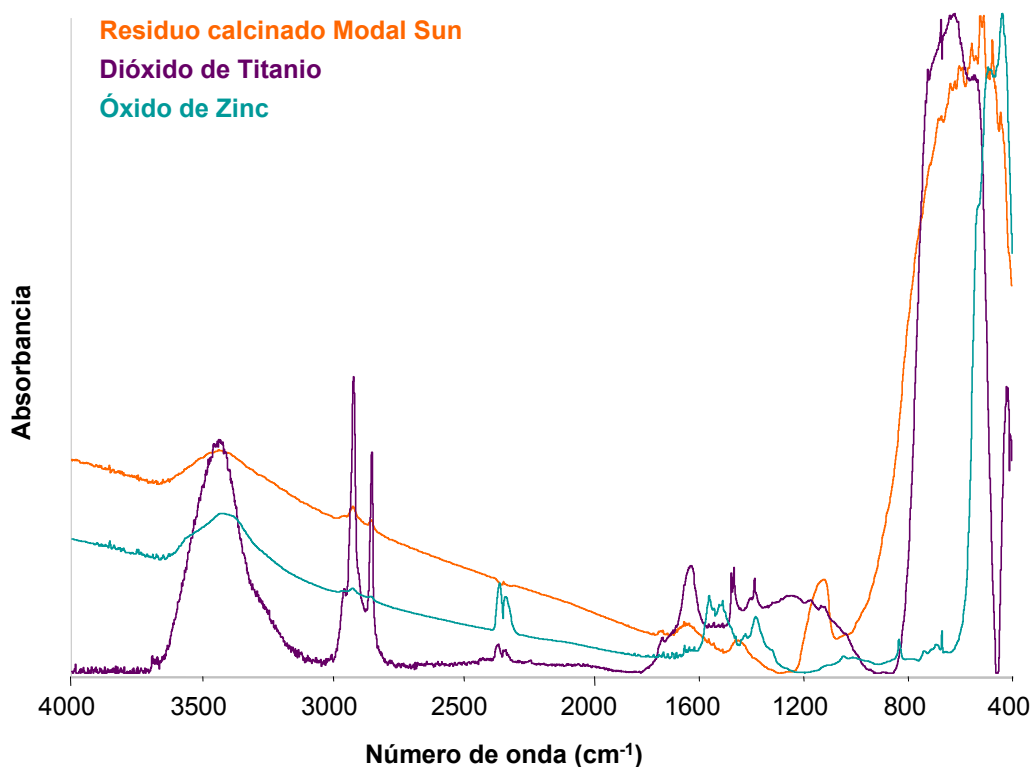


Figura 2.37. Comparación de los espectros en el infrarrojo del residuo calcinado de la fibra de Modal Sun y de los compuestos inorgánicos dióxido de titanio y óxido de zinc

El dióxido de titanio es un producto ampliamente utilizado como mateante de las fibras químicas. En varios estudios bibliográficos se destaca, además, su capacidad de actuar como producto absorbente de la radiación ultravioleta. Para esta última función, también se referencia en la bibliografía el uso del óxido de zinc.

El análisis de los espectros no permite determinar cuál de dichos compuestos inorgánicos ha sido añadido a la fibra de Modal Sun. Para tratar de dilucidarlo, se han procesado los espectros del residuo calcinado de la fibra y de los compuestos de dióxido de titanio y óxido de zinc, calculándose su segunda derivada. El resultado, ampliado en la zona de número de onda entre 700 y 400 cm^{-1} , se muestra en la Figura 2.38.

El cálculo de la segunda derivada de los espectros permite apreciar más fácilmente las inflexiones en las curvas y los máximos y mínimos de absorbancia correspondiente a cada banda de absorción. Aunque algunas de las bandas de la segunda derivada del residuo calcinado de Modal Sun coinciden con las del óxido de zinc, en la figura se puede apreciar que en general existe una mayor coincidencia con las bandas del dióxido de



titanio y en particular con las bandas más amplias, situadas en torno a 500 cm^{-1} de número de onda.

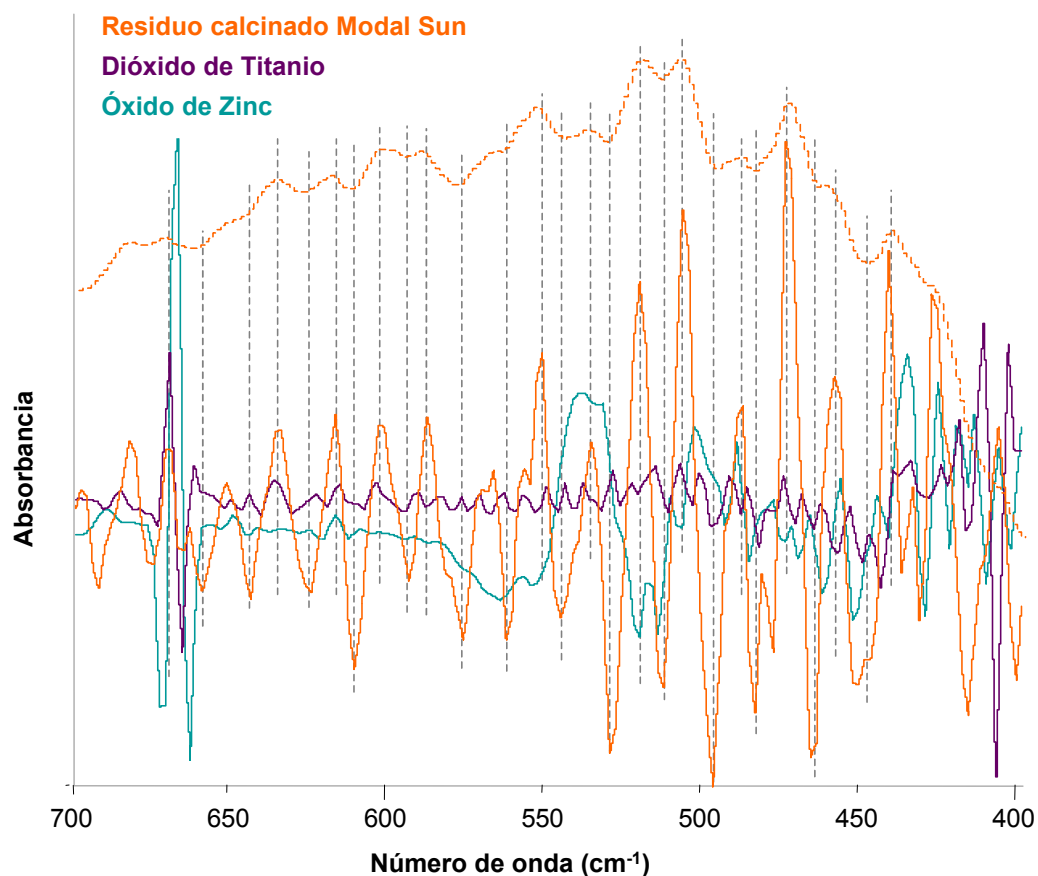


Figura 2.38. Comparación de las segundas derivadas de los espectros en el infrarrojo del residuo calcinado de la fibra de Modal Sun y de los compuestos inorgánicos dióxido de titanio y óxido de zinc

Así, el estudio de los espectros de infrarrojo de la fibra de Modal Sun calcinada corrobora la presencia de dióxido de titanio en la misma. Como ya se había indicado al introducir cada tipo de fibra, el Modal Sun se fabrica añadiendo dióxido de titanio en la masa de polímero, que es absorbente de radiación ultravioleta, y consecuentemente es el principal responsable de las diferencias entre Modal y Modal Sun en cuanto a la protección a la radiación ultravioleta.



2.4. CONCLUSIONES

El tipo de fibra es un factor que tiene una notable influencia sobre la protección a la radiación ultravioleta proporcionada por los artículos textiles.

- Los dos tipos seleccionados de fibras celulósicas convencionales han resultado ser muy transparentes a la radiación ultravioleta, dentro de la gama de tejidos fabricados para este estudio con pesos adecuados para su uso en prendas de verano.
 - Los espectros de transmisión difusa de la radiación ultravioleta a través de los tejidos de Algodón y Modal presentan una curva creciente a medida que aumenta la longitud de onda de la radiación, es decir, bloquean más cantidad de radiación UVB que de radiación UVA.
 - A pesar de que se produce un cierto bloqueo de la radiación ultravioleta, los valores de transmisiones medias en el UVR, así como en el UVA y, sobretodo, en el UVB, son excesivamente elevados para proporcionar una suficiente protección.
 - Los tejidos crudos fabricados con la fibra de Algodón son los más transparentes al paso de la radiación ultravioleta. Dentro de la gama de tejidos de Algodón no se ha conseguido obtener ningún tejido con un UPF suficiente para que pueda ser considerado como protector contra la radiación ultravioleta.
 - Los tejidos fabricados con la fibra de Modal presentan un mejor comportamiento que los de Algodón, si bien la mayoría de ellos tampoco proporciona una protección suficiente. Únicamente dos tejidos de Modal, los más compactos de la serie, han obtenido un factor de protección de valor un poco superior a 15, que los clasifica como buenos protectores.
 - La fibra de Modal ha resultado ser ligeramente más protectora que la fibra de Algodón, a pesar de que ambas son fibras celulósicas de igual estructura química. El diferente comportamiento podría ser explicado por un mayor contenido cristalino en la fibra de Algodón que produciría una menor absorción de la radiación ultravioleta por parte de esta fibra. Otra posible causa sería la presencia en la fibra de Modal de algún resto de agentes de ensimaje o aditivos que pudieran modificar el comportamiento de la celulosa frente a la radiación ultravioleta. Sin embargo, estas hipótesis deberán ser comprobadas en una investigación posterior.
- La fibra de Modal Sun, especialmente diseñada para su uso en prendas protectoras contra la radiación ultravioleta, se ha mostrado muy eficaz en el desempeño de su función específica.
 - Aunque las estructuras de los tejidos de Modal Sun son similares a las de las series de Algodón y Modal, el factor de protección de los tejidos de Modal Sun es notablemente mayor. Se han obtenido tejidos ligeros para su uso en prendas de



verano que pueden proporcionar niveles de buena protección ($15 < \text{UPF} < 24$), muy buena protección ($25 < \text{UPF} < 39$) y protección excelente ($\text{UPF} > 40$).

- La mayor efectividad de la fibra de Modal Sun en el bloqueo de la radiación ultravioleta se puede explicar por la presencia de partículas de dióxido de titanio en su composición. El dióxido de titanio, habitualmente utilizado como agente mateante de fibras artificiales y sintéticas, es un producto con una alta capacidad de absorción de la radiación ultravioleta. Su adición a la celulosa produce una disminución considerable de la transmisión difusa de la radiación en todas las longitudes de onda del espectro ultravioleta y, más importante, absorbe una gran parte de la radiación en las longitudes de onda del UVB. Este tipo de radiación es el más perjudicial para la piel humana, por lo que se le da más peso en la fórmula del factor de protección UPF, de forma que un bloqueo efectivo de la radiación UVB produce un notable incremento en el valor del UPF de un tejido.

La estructura de los tejidos es otro factor que también tiene una notable influencia sobre la protección proporcionada por los mismos contra la radiación ultravioleta.

- La transmisión difusa de radiación ultravioleta a través de los tejidos disminuye cuando aumentan los niveles de las variables de fabricación de los tejidos: título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama o densidad de hilos de trama. También disminuye cuando aumenta el valor de otros parámetros estructurales como son el peso por unidad de superficie, espesor o el porcentaje de cobertura de los tejidos.
- Al disminuir la transmisión, el factor de protección a la radiación ultravioleta UPF aumenta al incrementarse el valor de cualquiera de las variables estructurales.
- Mediante el análisis estadístico de los datos, se han podido obtener modelos que cuantifican el UPF en función de los parámetros de fabricación de los tejidos.
 - Los modelos para cada fibra, han obtenido un coeficiente de determinación de valor muy elevado, alrededor del 99%. Ello significa que con pocos términos se consigue explicar en un elevado porcentaje el valor de la respuesta, y, por lo tanto, se tiene una alta seguridad sobre el valor de UPF estimado.
 - Los modelos demuestran que, independientemente del tipo de fibra, todos los parámetros de fabricación de los tejidos estudiados (título del hilo de urdimbre, título del hilo de trama y densidad de hilos de trama) tienen una influencia significativa sobre el valor del UPF del tejido. Los coeficientes positivos de los efectos en el modelo indican que el valor de la respuesta aumentará cuando lo haga cualquiera de dichos parámetros.
 - Para todos los tipos de fibra estudiados, el parámetro de fabricación del tejido que tiene más influencia sobre el valor del UPF es el título del hilo de urdimbre. Este



hecho era esperable, si se tiene en cuenta que habitualmente hay una mayor cantidad de hilos en la urdimbre que en la trama del tejido, de forma que un aumento en el grosor del hilo de urdimbre hará al tejido más compacto (y, por lo tanto, más protector) que el mismo aumento en el grosor del hilo de trama. El segundo parámetro más influyente es el título del hilo de trama, mientras que la densidad de hilos de trama presenta una influencia menos notable.

- La estructura del tejido tiene una mayor o menor influencia en su factor de protección dependiendo del tipo de fibra utilizado.
 - Si el tejido se fabrica con Algodón o Modal, fibras bastante transparentes a la radiación ultravioleta, la influencia de la estructura no tiene una fuerza suficiente como para que un incremento en la compacidad del tejido pueda provocar un cambio notable en el factor de protección del tejido.
 - En cambio, a medida que aumenta la protección que el tipo de fibra proporciona por su propia naturaleza, aparecen en el modelo mayor número de términos significativos y mayor valor positivo tienen sus coeficientes, de forma que la influencia de la estructura del tejido se va haciendo más notable.
- La influencia de la estructura del tejido crece cada vez con mayor rapidez a medida que se aumenta la compacidad del tejido. Si se parte de un tejido con una estructura muy abierta y se va aumentando el valor de las variables a incrementos regulares, el crecimiento del valor de la respuesta UPF no será muy rápido al principio, pero se irá incrementando progresivamente. Este hecho se refleja en los modelos por la existencia de coeficientes significativos positivos de términos cuadráticos y de interacciones, que demuestran que se produce una aceleración en el incremento de la respuesta al aumentar el nivel de las variables.
- Los modelos permiten estimar el UPF a priori según los parámetros de fabricación, aunque siempre dentro del rango experimental, es decir, con valores de las variables entre los niveles mínimo y máximo que se han utilizado para hallar el modelo. También permiten elegir los valores de las variables, con numerosas posibilidades de combinaciones distintas, para obtener un UPF determinado.
- Mediante el análisis estadístico de los resultados se han podido también establecer modelos que relacionan el UPF con otros parámetros estructurales habitualmente utilizados en la industria textil, peso por unidad de superficie, espesor y cobertura. Los valores de estos parámetros guardan relación con las variables de fabricación (títulos y densidades de hilos).
 - El UPF está fuertemente correlacionado con el peso por unidad de superficie, el espesor y la cobertura de los tejidos. Al aumentar cualquiera de estos parámetros, lo hará el UPF de los tejidos.



- En todos los casos los coeficientes de correlación más elevados se obtienen para el parámetro peso. Por tanto, desde el punto de vista estadístico, este parámetro es el que mejor puede utilizarse para predecir el UPF. También es interesante desde el punto de vista práctico, ya que es un parámetro muy utilizado industrialmente.
- Mediante el análisis estadístico de los resultados, se han podido formular modelos que permiten estimar el UPF en función del peso de los tejidos.
 - Para las series de tejidos de Algodón y Modal, se puede utilizar el modelo lineal para describir el comportamiento de los tejidos como protectores contra la radiación ultravioleta en función del peso por unidad de superficie. Este hecho es muy conveniente ya que es el modelo de regresión simple más sencillo. En el caso de la serie de Modal Sun, se debe recurrir al modelo parabólico, ya que se requiere la introducción de un término cuadrático.
 - Los modelos estimados presentan coeficientes de determinación lo bastante altos, alrededor del 97%, como para que la variable peso pudiera ser un buen estimador del UPF de los tejidos.
 - Los modelos permiten estimar el UPF a priori según el parámetro peso. También, mediante el uso de los intervalos de predicción, permiten la estimación del peso a partir del cual se tiene una seguridad del 95% de obtener un UPF mínimo determinado. La estimación será válida dentro del rango experimental.
 - Mediante el modelo obtenido, no se puede estimar cual sería el peso mínimo de un tejido de Algodón que alcance un valor de UPF de 15 (mínimo para ser considerado protector). Lo que el modelo asegura es que con un peso inferior a 180 g/m^2 , que corresponde al valor máximo de esta variable dentro del campo experimental, no se alcanza una protección suficiente.
 - El modelo obtenido para los tejidos de Modal indica que, dentro del campo experimental, hay valores de la variable peso que podrían proporcionar un valor de UPF estimado de 15 (a partir de aproximadamente 220 g/m^2). Sin embargo, si se quieren tener en cuenta los intervalos de predicción y, por lo tanto, tener una seguridad del 95% de que se obtendrá un tejido con un UPF igual o superior a 15, no hay ningún valor de la variable peso que cumpla con las exigencias. No obstante, dentro del intervalo de predicción se alcanza un valor muy cercano ($\text{UPF}=14,5$ para 225 g/m^2). Se considera que el valor mínimo del peso para obtener un $\text{UPF} \geq 15$ estaría alrededor de 235 g/m^2 .
 - Si se utiliza la fibra de Modal Sun, con un peso mínimo de 163 g/m^2 se tiene una casi total seguridad de que el tejido presentará buena protección ($\text{UPF} \geq 15$). Con un mínimo peso de 172 g/m^2 el tejido presentará muy buena protección ($\text{UPF} \geq 25$) y si el peso es mayor que 184 g/m^2 el tejido presentará excelente protección ($\text{UPF} \geq 40$).

