

MODELIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN DE ALGUNAS VARIABLES DE DISEÑO DE TEJIDOS CELULÓSICOS PARA PREDECIR SU FACTOR DE PROTECCIÓN FRENTE A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

I. Algaba*, M. Pepió** y A. Riva***

0.1. Resumen

El objetivo principal de este trabajo es la modelización del Factor de Protección al Ultravioleta en relación con los parámetros estructurales más significativos que pueden variar en el proceso de tisaje: número de los hilados y densidad de los mismos. Mediante una planificación estadística y análisis de los datos se han obtenido modelos que correlacionan estos parámetros con el UPF de tres tipos diferentes de fibras celulósicas. La composición y estructura de los tejidos es la apropiada para la fabricación de prendas veraniegas.

Palabras clave: Factor de Protección Ultravioleta, tejidos no teñidos, estructura de tejido, modelos estadísticos

0.2. Summary: MODELISATION OF THE INTERACTION OF SOME VARIABLES OF DESIGN OF CELLULOSIC FABRICS TO PREDICT THEIR ULTRAVIOLET PROTECTION FACTOR

The main focus of this research is the modelisation of the Ultraviolet Protection Factor of the fabrics in relation with the most significant structural parameters that are likely to be varied during the weaving process: yarn number and thread count. By statistical planning and data analysis, a model that correlates the UPF with these parameters is formulated for three different

types of cellulosic fibres. The composition and structure of the studied fabrics are appropriate for their use in summer garments.

Key words: Ultraviolet Protection Factor (UPF), undyed fabrics, fabric structure, cellulosic fibres, statistical models

0.3. Résumé: MODÉLISATION DE L'INTERACTION DE QUELQUES VARIABLES DE CRÉATION DE TISSUS CELLULOSIQUES POUR PRÉDIRE LEUR FACTEUR DE PROTECTION FACE À LA RADIATION ULTRAVIOLETTE

L'objectif principal de ce travail est la modélisation du Facteur de Protection à l'Ultraviolet par rapport aux paramètres structuraux les plus significatifs que peuvent varier dans le processus de tissage nombre des filages et densité de ceux-ci. Moyennant une planification statistique et de l'analyse des données on a obtenu des modèles qui relient ces paramètres avec l'UPF de trois types différents de fibres cellulósiques. La composition et structure des tissus est l'appropriée pour la fabrication de vêtements estivaux.

Mots clé: Facteur de Protection à l'Ultraviolet, tissus non teints, structure de tissus, modèles statistiques

1. INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta, tan beneficiosa en dosis adecuadas, puede resultar muy perjudicial si nuestra piel está expuesta a cantidades excesivas (1-4).

Las prendas textiles están consideradas como uno de los mejores medios de protección contra la radiación ultravioleta. Pero el nivel de protección que ejercen los tejidos depende de un gran número de parámetros. En la bibliografía relacionada con el tema se señala que en los tejidos no teñidos son de especial relevancia el tipo de fibra y la estructura (5-11). Sin embargo, en casi ninguna publicación se cuantifica la influencia de dichos parámetros y cuando se hace se parte de tejidos comerciales con composiciones, estructuras, colores

* Dra. Ing. Inés Algaba Joaquín, Departamento de Estadística de Investigación Operativa, E.T.S.E.I.A.T. (U.P.C.)

** Dra. Ing. Montserrat Pepió Viñals, Catedrática de Universidad del Departamento de Estadística de Investigación Operativa. Responsable de Estadística en la E.T.S.E.I.A.T. (U.P.C.)

*** Dra. Ing. Ascensión Riva Juan, Catedrática de Universidad del Departamento de Ingeniería Textil y Papelera. Jefa del Laboratorio de Físico-Química de la Tintura y Acabados del INTEXTER (U.P.C.)

y acabados aleatorios, por lo que, al compararlos, no se puede determinar qué parámetro es el que influye más o menos ni la interacción entre las diferentes variables.

En este trabajo, mediante la utilización de técnicas estadísticas de planificación de experiencias, se han diseñado y fabricado tres series de tejidos de calada a partir de fibras convencionales de Algodón y Modal, y de fibras de Modal Sun que llevan incorporado un absorbente de radiación ultravioleta. Siguiendo un diseño factorial 3^3 , cada serie la constituyen 27 tejidos diferentes, resultado de la combinación de 3 variables estructurales, cada una de ellas con 3 niveles adecuados para la obtención de tejidos ligeros para prendas de verano.

La evaluación de la protección que cada tejido ofrece al paso de la radiación ultravioleta se realiza mediante la determinación *in vitro* de su factor de protección UPF (Ultraviolet Protection Factor).

A partir del análisis estadístico de los resultados se establecen los modelos estadísticos que cuantifican la influencia de cada variable estudiada y sus interacciones sobre el UPF de los tejidos. Los modelos obtenidos permiten estimar el factor de protección ultravioleta antes de la fabricación de los tejidos, lo cual constituye una herramienta muy útil para el diseño de tejidos que puedan ser considerados tejidos protectores frente a la radiación ultravioleta.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Materia

Se han fabricado y estudiado tres series de tejidos de calada, cuya composición y estructura los hace apropiados para la obtención de prendas de verano.

Cada serie de tejidos fue obtenida partiendo de hilos fabricados con tres fibras celulósicas diferentes: Algodón, Modal y Modal Sun (fibra de Modal que incorpora un absorbente de radiación UV en el fluido de hilatura).

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 el número de estructuras, 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. 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 100 y 200 g/m² aproximadamente. Los niveles escogidos de cada variable son los que se exponen en la Tabla 1.

TABLA 1

Variables y niveles de las variables en el plan experimental

Variable	ALGODÓN - MODAL			MODAL SUN		
	X1 Título hilo urdimbre (tex)	X2 Título hilo trama (tex)	X3 Densidad pasadas (hilos/cm)	X1 Título hilo urdimbre (tex)	X2 Título hilo trama (tex)	X3 Densidad pasadas (hilos/cm)
Nivel						
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

Los hilos de Algodón, Modal y Modal Sun utilizados en este estudio fueron producidos por una empresa dedicada a la hilatura que ha colaborado en el proyecto. 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 33. 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 (12). 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.

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

Después de su fabricación, los tejidos han sido sometidos a un tratamiento de desencolado enzimático para eliminar la cola adicionada en el tisaje. 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.

2.2. Determinación de la respuesta: UPF del tejido

Se han tomado 5 especímenes de cada uno de los 27 tejidos de las 3 series. En cada espécimen se ha determinado el valor del factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos por duplicado, una medida en la dirección de la urdimbre y otra en la dirección de la trama, dando un total de 10 medidas por muestra de tejido.

El factor de protección a la radiación ultravioleta (UPF) de los tejidos se ha determinado mediante el método *in vitro*, utilizando el aparato Analizador de Transmitancia en el Ultravioleta UV1000F de Labsphere, siguiendo las indicaciones de la norma AS/NZ 4399:1996 (13).

El UPF de cada espécimen se calcula según la siguiente fórmula:

$$UPF_i = \frac{\sum_{\lambda=290}^{400} E_{\lambda} \times S_{\lambda} \times \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=290}^{400} E_{\lambda} \times S_{\lambda} \times T_{\lambda} \times \Delta\lambda}$$

E_{λ} : espectro eritemal según CIE

S_{λ} : irradiancia espectral solar

T_{λ} : transmitancia espectral del tejido

$\Delta\lambda$: anchura de banda en nm

λ : longitud de onda en nm

A continuación se calcula el UPF medio, como la media aritmética de los UPF de cada uno de los especímenes.

$$\overline{UPF} = \frac{UPF_1 + UPF_2 + \dots + UPF_N}{N}$$

\overline{UPF} : UPF medio
 UPF_i: UPF de los especímenes
 N: número de especímenes

Para evaluar el UPF de la muestra se introduce una corrección estadística, consistente en calcular el extremo inferior del intervalo de probabilidad del 99%. Esta corrección asegura que el verdadero valor del UPF es igual o superior al calculado, con una probabilidad del 99,5%. La expresión es la siguiente:

$$UPF = \overline{UPF} - t_{\alpha/2, N-1} \cdot \frac{SD}{\sqrt{N}}$$

$t_{\alpha/2, N-1}$: t de Student que deja a su derecha una probabilidad $\alpha/2 = 0,005$ con N-1 grados de libertad
 SD: desviación estándar del UPF

Este valor obtenido es el definitivo si es mayor que cualquiera de las medidas individuales de los especímenes. Si el valor obtenido es menor, el UPF de la muestra será el menor valor del UPF de los especímenes.

La norma australiana/neozelandesa establece, además, un sistema de clasificación de los tejidos en función de sus propiedades protectoras del sol. Cuando el objetivo es incluir el factor de protección en el etiquetado, la ropa protectora del sol debe ser categorizada de acuerdo con el índice UPF, según la Tabla 2.

TABLA 2

Etiquetado y clasificación de los tejidos en función de su factor de protección a la radiación ultravioleta (Norma AS/NZ 4399: 1996)

Rango UPF de la muestra	Categoría de protección UVR	Transmisión UVR efectiva (%)	Índice UPF
15 a 24	Buena protección	6,7 a 4,2	15, 20
25 a 39	Muy buena protección	4,1 a 2,6	25, 30, 35
40 a 50, 50+	Protección excelente	≤ 2,5	40, 45, 50, 50+

El índice UPF siempre será un valor múltiplo de 5. Para su cálculo se parte del UPF de la muestra y se toma el múltiplo de 5 inmediatamente inferior. Así un tejido con un UPF de 39, tendrá un índice UPF de 35 y proporcionará muy buena protección a la radiación ultravioleta. A partir de 50, el índice siempre se señala como 50+.

2.3. Procedimiento para el análisis estadístico de los resultados

2.4.1. 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. 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 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. 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 exponen en la Tabla 3. Aplicando las fórmulas se obtienen los niveles codificados de las variables que se exponen en la Tabla 4.

TABLA 3

Fórmulas de codificación de las variables

Variable	ALGODÓN - MODAL	MODAL SUN
A: Variable codificada de X1 título del hilo de urdimbre	$A = \frac{X1 - \bar{X1}}{5}$	$A = \frac{X1 - \bar{X1}}{7}$
B: Variable codificada de X2 título del hilo de trama	$B = \frac{X2 - \bar{X2}}{5}$	$B = \frac{X2 - \bar{X2}}{7}$
C: Variable codificada de X3 densidad de trama	$C = \frac{X3 - \bar{X3}}{2}$	$C = \frac{X3 - \bar{X3}}{2}$

TABLA 4

Variables codificadas

Variable	ALGODÓN - MODAL			MODAL SUN		
	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
A	-1,0933	0,0467	1,0467	-0,9905	-0,1762	1,1667
B	-1,0933	0,0467	1,0467	-0,9905	-0,1762	1,1667
C	-1	0	1	-1	0	+1

2.4.2. 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 Xi, no aleatorias, denominadas regresores o factores de control del proceso.

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. Teniendo en cuenta estas consideraciones se ha ensayado el siguiente modelo inicial:

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

2.4.3. Estimación de los coeficientes significativos

La estimación de los coeficientes significativos del modelo para cada respuesta se realiza mediante el método denominado regresión paso a paso (Stepwise Regression), en su modalidad hacia delante (forward). Este procedimiento obtiene directamente la regresión significativa a partir del modelo inicial y proporciona una estimación final de los regresores significativos, así como el valor estimado de sus coeficientes y del 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 la significación del ajuste del modelo completo, que se obtiene mediante el cálculo de la ANOVA de la regresión. Para ello se utiliza el estadístico F de Snedecor y se obtiene 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%.

La ANOVA de la regresión también proporciona el valor de $\hat{\sigma}^2$ 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 también los gráficos de residuos del modelo definitivo. Se han determinado los gráficos de residuos en función de la respuesta UPF, del índice y de cada regresor, así como el gráfico probabilístico normal de los residuos. Cualquier irregularidad en la forma de los gráficos de residuos proporciona determinada información que debe tenerse en cuenta para admitir o no el modelo.

3. RESULTADOS

3.1. Respuesta UPF de los tejidos

En las tablas siguientes se exponen los resultados obtenidos en la medida del Factor de Protección a la Radiación Ultravioleta de cada uno de los 27 tejidos fabricados con las fibras de Algodón (Tabla 5), Modal (Tabla 6) y Modal Sun (Tabla 7), según la combinación de los 3 niveles de las 3 variables del sistema: X1 (título del hilo de urdimbre, tex), X2 (título del hilo de trama, tex) y X3 (densidad de pasadas, hilos/cm).

TABLA 5

Respuesta UPF de los tejidos de Algodón

UPF		X1 _a = 14,3	X1 _a = 20	X1 _a = 25
X3 _a = 23	X2 _a = 14,3	3,80 (1)	4,75 (2)	5,33 (3)
	X2 _a = 20	4,36 (4)	5,43 (5)	6,13 (6)
	X2 _a = 25	4,89 (7)	5,98 (8)	6,57 (9)
X3 _a = 25	X2 _a = 14,3	4,06 (10)	4,86 (11)	5,74 (12)
	X2 _a = 20	4,54 (13)	5,43 (14)	6,35 (15)
	X2 _a = 25	4,96 (16)	5,74 (17)	6,66 (18)
X3 _a = 27	X2 _a = 14,3	4,16 (19)	5,03 (20)	6,15 (21)
	X2 _a = 20	4,78 (22)	5,67 (23)	6,32 (24)
	X2 _a = 25	5,12 (25)	6,00 (26)	6,92 (27)

TABLA 6

Respuesta UPF de los tejidos de Modal

UPF		X1 _m = 14,3	X1 _m = 20	X1 _m = 25
X3 _m = 23	X2 _m = 14,3	4,72 (1)	7,15 (2)	10,06 (3)
	X2 _m = 20	5,28 (4)	8,91 (5)	12,34 (6)
	X2 _m = 25	6,65 (7)	10,20 (8)	13,44 (9)
X3 _m = 25	X2 _m = 14,3	5,12 (10)	7,72 (11)	10,73 (12)
	X2 _m = 20	6,34 (13)	9,73 (14)	13,21 (15)
	X2 _m = 25	7,38 (16)	11,03 (17)	15,53 (18)
X3 _m = 27	X2 _m = 14,3	5,28 (19)	8,34 (20)	10,95 (21)
	X2 _m = 20	6,52 (22)	10,03 (23)	14,06 (24)
	X2 _m = 25	7,86 (25)	11,39 (26)	15,76 (27)

TABLA 7

Respuesta UPF de los tejidos de Modal Sun

UPF		X1 _{ms} = 14,3	X1 _{ms} = 20	X1 _{ms} = 25
X3 _{ms} = 23	X2 _{ms} = 14,3	11,48 (1)	24,88 (2)	93,47 (3)
	X2 _{ms} = 20	16,63 (4)	31,89 (5)	98,96 (6)
	X2 _{ms} = 25	24,09 (7)	47,48 (8)	155,64 (9)
X3 _{ms} = 25	X2 _{ms} = 14,3	12,66 (10)	26,72 (11)	99,08 (12)
	X2 _{ms} = 20	18,01 (13)	43,11 (14)	113,31 (15)
	X2 _{ms} = 25	27,54 (16)	57,06 (17)	153,10 (18)
X3 _{ms} = 27	X2 _{ms} = 14,3	12,38 (19)	28,22 (20)	107,80 (21)
	X2 _{ms} = 20	17,61 (22)	42,16 (23)	133,41 (24)
	X2 _{ms} = 25	32,16 (25)	64,04 (26)	179,85 (27)

3.2. Modelización de la respuesta UPF de los tejidos

3.2.1. Tejidos de Algodón

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

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. Los coeficientes de los efectos simples 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). 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) y con un menor nivel de. El coeficiente negativo de esta interacción produce una ralentización en el aumento del valor de la respuesta UPF al aumentar el nivel de las variables que intervienen en la interacción (título del hilo de trama y densidad de trama).

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

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

La Figura 1 muestra las superficies de respuesta estimadas según el modelo para los tejidos de Algodón en función de las variables de fabricación de los tejidos: X1 título del hilo de urdimbre, X2 título del hilo de trama y X3 densidad de trama.

En ésta y en posteriores superficies de respuesta, 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. Se distinguen las zonas de UPF que no proporcionan protección (UPF < 15), las que proporcionan buena protección (15 ≤ UPF < 25), las de muy buena protección (25 ≤ UPF < 40) y las de protección excelente (UPF ≥ 40).

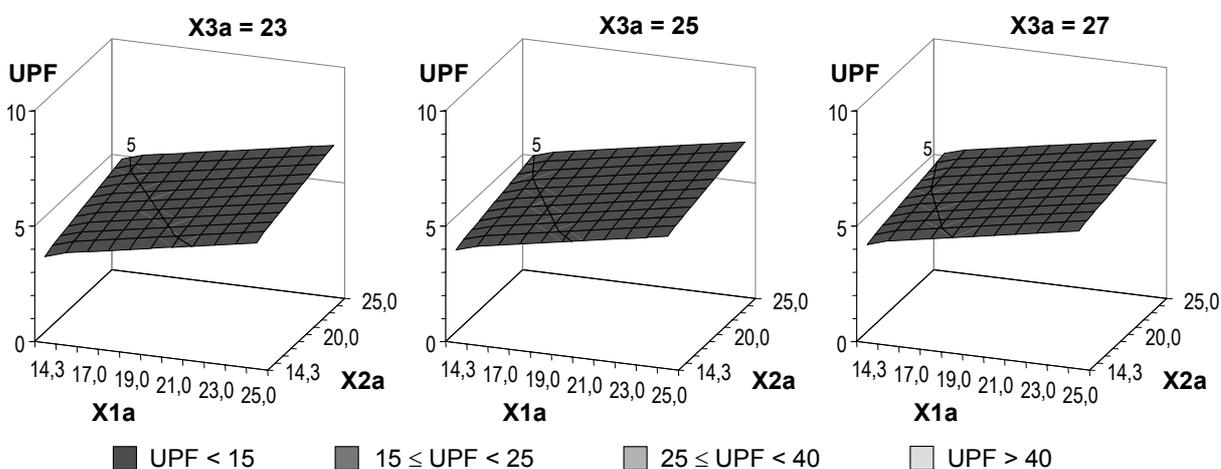


FIGURA 1: Superficies de respuesta UPF según el modelo estimado, Algodón

En la figura se aprecia el bajo nivel de protección estimado para los tejidos de Algodón que se fabriquen con niveles de las variables comprendidos en el intervalo utilizado en este trabajo. La representación gráfica del modelo estimado indica que no se alcanzará un nivel mínimo de protección (UPF ≥ 15) dentro de los intervalos escogidos de las variables.

Al tener todas las variables un coeficiente positivo en el modelo estimado, no existirá interacción entre X1 y X2 y no será 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 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.

3.2.2. Tejidos de Modal

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

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

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. 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 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 doble 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 doble 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:

$$UPF_m = -30,1602 - 0,5728 \cdot X_1 - 0,4646 \cdot X_2 + 2,9260 \cdot X_3 + 0,0182 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,0148 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0163 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,0121 \cdot X_1^2 - 0,0645 \cdot X_3^2$$

La Figura 2 muestra las superficies de respuesta estimadas según el modelo para los tejidos de Modal en función de las variables de fabricación de los tejidos: X1 título del hilo de urdimbre, X2 título del hilo de trama y X3 densidad de trama.

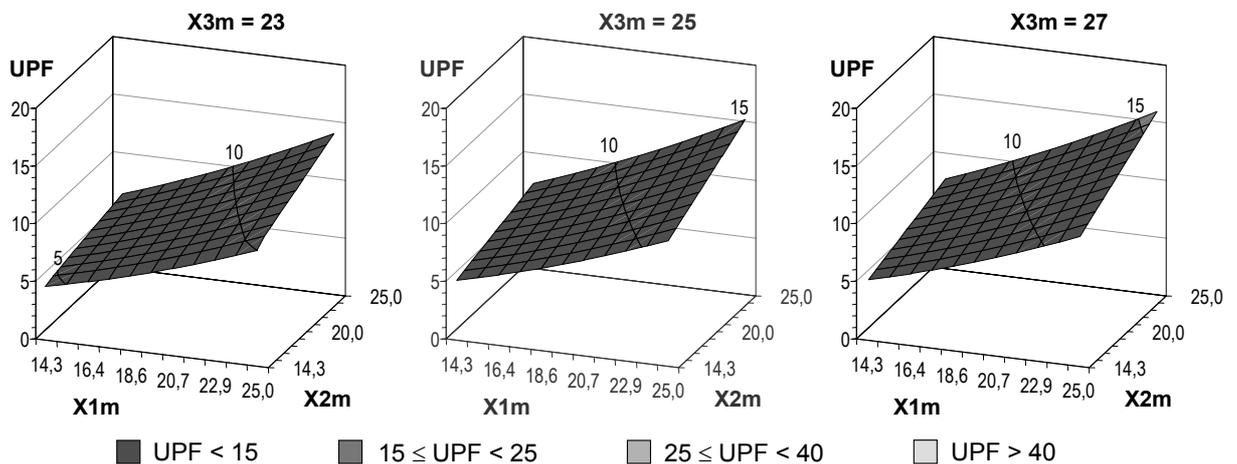


FIGURA 2: Superficies de respuesta UPF según el modelo estimado, Modal

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.

3.2.3. Tejidos de Modal Sun

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:

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

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 doble 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 doble A^2 .

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

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

La Figura 3 muestra las superficies de respuesta estimadas según el modelo para los tejidos de Algodón en función de las variables de fabricación de los tejidos: X1 título del hilo de urdimbre, X2 título del hilo de trama y X3 densidad de trama.

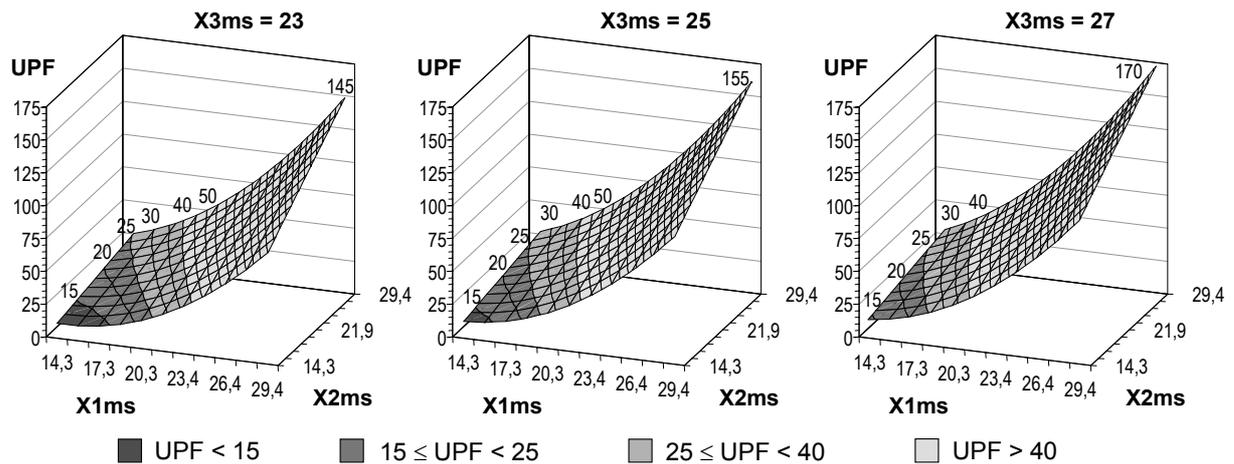


FIGURA 3: Superficies de respuesta UPF según el modelo estimado, Modal Sun

Para la serie de tejidos de Modal Sun, en la figura se aprecia que dentro de los niveles de las variables estudiadas en este trabajo, sí que se pueden encontrar combinaciones de valores de las variables que permitan obtener tejidos con niveles estimados de protección buena, muy buena y excelente. Con niveles relativamente bajos de las variables de fabricación se pueden conseguir tejidos protectores contra la radiación ultravioleta fabricados 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.

4. CONCLUSIONES

4.1. Mediante el análisis estadístico de los datos obtenidos, se han podido obtener modelos que cuantifican el UPF en función de los parámetros de fabricación de los tejidos.

4.2. Los modelos obtenidos para cada una de las fibras estudiadas tienen un coeficiente de determinación del modelo de valor muy elevado (alrededor del 99%). 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 estimado con los modelos.

4.3. Los modelos demuestran que, independientemente del tipo de fibra utilizada, 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.

4.4. 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, por lo que un aumento

en el grosor del hilo de urdimbre hará al tejido más compacto 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.

4.5. En los tejidos de Modal y Modal Sun, la influencia de la estructura del tejido sobre el UPF es cada vez más notoria 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 los parámetros estructurales a incrementos regulares, la variación en el valor de la respuesta UPF no será muy rápida al principio, pero se irá incrementando progresivamente, de forma que llegará un momento en que una pequeña variación producirá un incremento drástico en el UPF del tejido. Este hecho se observa por la inclusión en los modelos de coeficientes significativos positivos de términos cuadráticos y de interacciones, que aceleran la velocidad en el incremento de la respuesta al incrementarse el nivel de las variables.

4.6. La respuesta UPF es más o menos sensible a variaciones en la estructura del tejido dependiendo del tipo de fibra utilizado. Si el tejido se fabrica con un tipo de fibra bastante transparente 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, para un tipo de fibra que proporciona una mayor protección por su propia naturaleza, como es el caso de la fibra de Modal Sun, aparece en el modelo un mayor número de términos significativos, con coeficientes positivos de mayor valor. La influencia de la estructura del tejido se va haciendo más notable, de forma que pequeños aumentos en la compacidad de los tejidos, pueden provocar aumentos cada vez notables en el valor del UPF.

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

5. AGRADECIMIENTOS

5.1. Los autores agradecen a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) la financiación del proyecto MAT 99-0996, dentro del cual se ha llevado a cabo este estudio. Asimismo agradecen al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte la concesión de una beca para la realización de la tesis doctoral dentro de su programa de Formación de Profesorado Universitario.

También desean expresar su especial agradecimiento a la empresa Hilaturas Llaudet S.A. por el suministro de las fibras y fabricación de los hilados utilizados en el estudio, así como a las señoras R. Prieto y P. Ferrer por su colaboración en la preparación de los tejidos.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. United States Environmental Protection Agency. *The sun, UV and you. A guide for sunwise behaviour* [En línea]. Página web, URL < <http://www.epa.gov/sunwise> >. (1999).
2. World Health Organisation; United Nations Environment Programme; Geneva. *Protection Against Exposure to Ultraviolet Radiation* [En línea]. Página web, URL < <http://www.who.int/pehuv/publications/english/whoehg95-17.htm> >. Intersun - The global UV Project. (1995).
3. Tenkate, T.D. Ultraviolet Radiation: Human Exposure and Health Risks. *Environmental Health*, 61(2): 9-15, (1998).
4. Ferrini, R.L.; Perlman, M.; Hill, L. Skin Protection from Ultraviolet Light Exposure American College of Preventive Medicine Practice Policy Statement. *American Journal of Preventive Medicine*, 14(1): 83-86. (1998).
5. Hilfiker, R.; Kaufmann, W.; Reinert, G.; Schmidt, E. Improving Sun Protection Factors of Fabrics by Applying UV-Absorbers. *Textile Research Journal*, 66(2): 61-70. (1996).
6. Curiskis, J.; Pailthorpe, M. Apparel textiles and sun protection. *Textiles Magazine*, 4: 13-17. (1996).
7. Crews, P.; Kachman, S.; Beyer, A. Influences on UVR transmission of undyed woven fabrics. *Textile Chemist and Colorist*, 31(6): 17-26. (1999).
8. Reinert, G.; Fuso, F.; Hilfiker, R.; Schmidt E. UV-protecting properties of textile fabrics and their improvement. *Textile Chemist and Colorist*, 29(12): 36-43. (1997).
9. Gies, P.; Roy, C.; Toomey, S.; McLennan, A. Protection against solar ultraviolet radiation. *Mutation Research*, 422: 15-22. (1998).
10. Böhringer, B. UV Protection by textiles. Conferencia presentada en el 37th International Man-Made Fibres Congress, Dornbirn (Austria) 16-18 septiembre (1998).
11. Pailthorpe, M.T. Textiles and sun protection: the current situation. *Australian Textiles*, 14(6): 54-66. (1994).
12. Pepió, M.; Polo C. *Disseny i optimització de processos*. Terrassa: Laboratori d'Estadística ETSEIT-UPC. (1996).
13. AS/NZS 4399:1996. *Sun protective clothing - Evaluation and classification* (1996).