

Tras coger la tercera flecha, Karim permitió que Mirdin lo frotara con el ungüento preparado con aceite de rosas, aceite de nuez moscada y canela. Volvió amarilla su piel morena clara, pero era una buena protección del sol. [...]

[...] El indio había reducido la velocidad pero la aumentó cuando Karim se le puso a la par; siguieron avanzando juntos, zancada a zancada. Tenía la piel muy oscura, casi del color del ébano, bajo la que destellaban al sol músculos largos y lisos, mientras se movía.

La piel de Zaki también era oscura; una ventaja para correr bajo el sol ardiente. La de Karim necesitaba el ungüento amarillo: era del color del cuero claro y resultado – decía siempre Zaki – de que a una de sus antepasadas la había cubierto uno de los griegos rubios de Alejandro.

“El médico”, Noah Gordon



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Institut d'Investigació Tèxtil
i Cooperació Industrial



Departament d'Enginyeria
Tèxtil i Paperera

PROTECCIÓN ULTRAVIOLETA PROPORCIONADA POR LOS TEXTILES: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES MÁS SIGNIFICATIVAS Y APLICACIÓN DE PRODUCTOS ESPECÍFICOS PARA SU MEJORA

El estudio recogido en esta memoria ha sido realizado por **Inés M. Algaba Joaquín**, Ingeniera Industrial, para optar al grado de Doctor por la UPC, bajo la dirección de la **Prof. Dra. Ascensión Riva Juan**, en el **Institut de Investigació Tèxtil i Cooperació Industrial de Terrassa** y dentro del programa de doctorado de **Enginyeria Tèxtil i Paperera**, de la **Universitat Politècnica de Catalunya**.

Diciembre de 2004

A Esther, espero que mi trabajo pueda ayudar aunque sea un poquito a los que, como ella, han podido vencer al melanoma.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo experimental de esta tesis se ha llevado a cabo en el laboratorio de Físico-Química de la Tintura y Acabados, del Instituto de Investigación Textil de Terrassa, de la Universitat Politècnica de Catalunya. A la institución y a las personas, muchas gracias por permitirme estar aquí todo este tiempo, por su apoyo y compañerismo. También agradecer al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte el apoyo económico por la concesión de una beca dentro de su programa de Formación de Profesorado Universitario para la realización de esta tesis doctoral, así como para dos estancias breves en el extranjero. Asimismo, el trabajo experimental fue financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, Proyecto CICYT MAT 99-0996.

Deseo expresar mi agradecimiento a todas las personas que de una manera u otra han contribuido a que esta tesis doctoral se haya llevado a cabo.

En primer lugar mi más sincero agradecimiento a la “culpable” de que ahora esté escribiendo estas líneas, a la persona que me animó a empezar y que ha dirigido esta tesis, la Prof. Ascensión Riva. Gracias por la orientación y el apoyo recibidos a lo largo de todos estos años.

Asimismo, tengo una especial gratitud a la Prof. Montserrat Pepió, por todo lo que he aprendido, por sus valiosos consejos y entusiasta disposición para revisar y corregir los modelos estadísticos. Con ella, la probabilidad de que el error sea grande no sigue una ley Normal, seguro.

Mil gracias también a la Sra. Remedios Prieto, a la Sra. Paulina Ferrer y a la Sra. Meritxell Arroyo, por su valiosa ayuda para la realización de los tratamientos, tinturas, blanqueos y demás ensayos. A ellas, junto a los demás compañeros del Laboratorio de Tecnología Textil Química del Intexter, los que están, y los que vinieron y ya se fueron, gracias por aclarar todas las dudas, pero más aún por el excelente ambiente de trabajo y por ser más que colegas, amigos.

Mi agradecimiento a la Dra. M^a Carmen Riva y al personal del Laboratorio de Toxicología Ambiental del Intexter, por sus explicaciones y su colaboración en la determinación y análisis de los parámetros ecotoxicológicos de los baños residuales de acabado. Al Prof. Pere Pagès y la Sra. M^a Teresa Lacorte, del Departament de Ciències dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica en el Campus de Terrassa de la UPC, por su contribución para la determinación de los espectros FT-IR y sus ideas para la interpretación de los resultados. Y al Prof. Josep Mumbrú y el Sr. Gabriel Caballero, del Departament d'Enginyeria Tèxtil i Paperera de la UPC, por su ayuda en la obtención de las imágenes SEM.

También quiero agradecer su colaboración a algunas personas, que aunque ahora estén en la distancia, pusieron sus instalaciones y conocimientos a mi disposición y me

acogieron tan amablemente durante un tiempo. A la Prof. Patricia C. Crews, a Lisa y a Carol, que hicieron tan agradable mi estancia en Estados Unidos, en el Department of Textiles, Clothing and Design de la University of Nebraska-Lincoln, así como al Dr. Joe Zhou, director de la University of Nebraska Microscopy Research Facility, por su ayuda en la determinación de la cobertura por análisis de imagen. Mi agradecimiento al Dr. Stefan Mecheels, director del Forshungsinstitut Hohenstein, y al Dr. Maximilian Swerev por acogerme en su instituto y departamento, al Sr. Stefan Rasmich por sus explicaciones para la determinación del UPF en estado estirado y mojado, y a un amigo, el Sr. Jan Beringer, siempre dispuesto a charlar un rato y a ayudarme en todo lo que necesitara durante mi estancia en Alemania.

También mi agradecimiento a la empresa Hilaturas Llaudet S.A. por proporcionar las fibras y suministrar los hilados en los títulos requeridos, y especialmente al Sr. Josep M^a Llaudet por su interés y por aconsejarme en la elección de las variables, aportando siempre su valioso punto de vista industrial.

A las empresas Clariant International AG y Ciba Specialty Chemicals Inc, por el suministro, respectivamente, de los colorantes y los blanqueadores ópticos y el producto de acabado, así como de la información técnica de los mismos.

Gracias también a mi familia, porque ellos han hecho que sea como soy y siempre han estado allí dando su amor, ánimos y apoyo moral y no tan moral. A mis hermanos Sebas y Juanma y a mi nueva hermana Laura, que se cargaron con las obligaciones familiares, mientras la mayor jugaba a los doctores. A mis padres, Sebastián y María, que han sabido aguantar casi sin protestar, el tener aún en casa a una hija de 32 años que, encima, sigue siendo estudiante. Gracias por quererme a pesar de todo.

Y a Charlie, que, por una vez en su vida, ha tenido una paciencia infinita y sigue esperándome para que iniciemos juntos la siguiente etapa.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	VII
------------------------------	------------

ÍNDICE DE CONTENIDO	IX
----------------------------------	-----------

MEMORIA DE LA TESIS DOCTORAL.....	1
--	----------

CAPÍTULO 1. ESTADO DE LA TÉCNICA Y OBJETIVOS DE LA TESIS

DOCTORAL	3
-----------------------	----------

1.1. ESTADO DE LA TÉCNICA Y JUSTIFICACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE LA TESIS.....	5
1.1.1. El sol y el hombre: breve historia	5
1.1.2. La radiación ultravioleta.....	7
1.1.3. Efecto de la radiación ultravioleta sobre la piel.....	8
1.1.4. Factor de protección a la radiación ultravioleta de artículos textiles.....	13
1.1.4.1. Técnicas de determinación del factor de protección a la UVR.....	13
1.1.4.2. Determinación del UPF mediante técnicas in vitro	14
1.1.4.2.1. Factores que intervienen en la determinación in vitro del UPF de un tejido.....	14
1.1.4.2.2. Normativa relacionada con la determinación del UPF in vitro	25
1.1.4.2.3. Clasificación y etiquetado de las prendas protectoras: Índice UPF.....	28
1.1.5. Índice UV	28
1.2. OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL	32

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

PROTECCIÓN A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	37
---	-----------

2.1. INTRODUCCIÓN	39
2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	42
2.2.1. Materia	42
2.2.1.2. Algodón	42
2.2.1.3. Modal.....	43
2.2.1.4. Modal Sun	44
2.2.2. Planificación experimental y preparación de las muestras de tejido.....	44
2.2.3. Parámetros determinados	47
2.3. RESULTADOS.....	49
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	49
2.3.1.1. Resultados en la determinación de los parámetros.....	49
2.3.1.1.1. Espectros de transmisión de radiación en la región del ultravioleta	49
2.3.1.1.2. Factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos (UPF).....	59

2.3.1.2. Análisis estadístico de los resultados	63
2.3.1.2.1. Diseño experimental: variables y niveles de las variables	63
2.3.1.2.2. Codificación de las variables	64
2.3.1.2.3. Modelo inicial	67
2.3.1.2.4. Procedimiento de análisis para la estimación del modelo significativo y coeficiente de determinación del ajuste	68
2.3.1.2.5. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Algodón	70
2.3.1.2.6. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal	76
2.3.1.2.7. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal Sun	81
2.3.1.2.8. Comparación entre los modelos obtenidos para las diferentes fibras	86
2.3.2. Relación entre otros parámetros estructurales (peso por unidad de superficie, espesor y cobertura) y el UPF de los tejidos	91
2.3.2.1. Resultados en la determinación de los parámetros	91
2.3.2.1.1. Peso, espesor y cobertura de los tejidos de Algodón	91
2.3.2.1.2. Peso, espesor y cobertura de los tejidos de Modal	94
2.3.2.1.3. Peso, espesor y cobertura de los tejidos de Modal Sun	97
2.3.2.2. Análisis estadístico de los resultados	100
2.3.2.2.1. Modelo inicial	100
2.3.2.2.2. Procedimiento de análisis para la estimación del modelo significativo y coeficiente de determinación del ajuste	101
2.3.2.2.3. Modelización de la respuesta UPF en función del peso por unidad de superficie	101
2.3.3. Análisis de las diferencias entre las fibras por espectroscopía de infrarrojo	109
2.3.3.2. Espectros de infrarrojo de muestras de las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun	113
2.3.3.3. Espectros de infrarrojo de muestras calcinadas de las fibras de Algodón, Modal y Modal Sun	120
2.4. CONCLUSIONES	125

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE USO DE LAS PRENDAS EN EL FACTOR DE PROTECCIÓN A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

3.1. INTRODUCCIÓN	131
3.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	133
3.2.1. Materia	133
3.2.2. Planificación experimental	134
3.2.3. Parámetros determinados	135
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	136
3.3.1. Estudio de la Respuesta UPF en función de la tensión y humedad de los tejidos	136
3.3.1.1. Resultados en la determinación de los parámetros	136
3.3.1.1.1. Espectros de transmisión de radiación en la región del ultravioleta de los tejidos	136
3.3.1.1.2. Factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos (UPF)	148

3.3.1.2. Análisis estadístico de los resultados	153
3.3.1.2.1. Diseño experimental: variables y niveles de las variables.....	153
3.3.1.2.2. Codificación de las variables.....	154
3.3.1.2.3. Modelo inicial.....	157
3.3.1.2.4. Procedimiento de análisis para la estimación del modelo significativo y coeficiente de determinación del ajuste.....	157
3.3.1.2.5. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Algodón en función de las condiciones de uso de las prendas.....	158
3.3.1.2.6. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal en función de las condiciones de uso de las prendas.....	164
3.3.1.2.7. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal Sun en función de las condiciones de uso de las prendas.....	167
3.3.1.2.8. Comparación entre los modelos obtenidos para las diferentes fibras	174
3.4. CONCLUSIONES	178

CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL COLOR EN EL FACTOR DE PROTECCIÓN A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA 183

4.1. INTRODUCCIÓN	185
4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	191
4.2.1. Materia	191
4.2.2. Colorantes	191
4.2.3. Planificación experimental y fórmula de tintura.....	192
4.2.4. Proceso de tintura	197
4.2.5. Parámetros determinados	197
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	198
4.3.1. Estudio de la Respuesta UPF del tejido en función de la Intensidad Estándar de color corregida.....	198
4.3.1.1. Resultados en la determinación de los parámetros.....	198
4.3.1.1.1. Espectros de absorción en el ultravioleta-visible de los colorantes.....	198
4.3.1.1.2. Espectros de transmisión de radiación de los tejidos en la región del ultravioleta.....	200
4.3.1.1.3. Factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos (UPF).....	211
4.3.1.2. Análisis estadístico de los resultados	218
4.3.1.2.1. Diseño experimental: variables y niveles de las variables.....	218
4.3.1.2.2. Codificación de las variables.....	220
4.3.1.2.3. Modelo inicial.....	222
4.3.1.2.4. Procedimiento de análisis para la estimación del modelo significativo y coeficiente de determinación del ajuste.....	223
4.3.1.2.5. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Algodón teñidos	224
4.3.1.2.6. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal teñidos.....	231
4.3.1.2.7. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal Sun teñidos	237
4.3.1.2.8. Comparación entre los modelos obtenidos para las diferentes fibras	240
4.4. CONCLUSIONES	246

CAPÍTULO 5. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE BLANQUEADORES ÓPTICOS EN EL FACTOR DE PROTECCIÓN A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	251
5.1. INTRODUCCIÓN	253
5.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	256
5.2.1. Materia	256
5.2.2. Blanqueadores ópticos	256
5.2.3. Planificación experimental y fórmula del baño de blanqueo	257
5.2.4. Proceso de tratamiento con los blanqueadores ópticos.....	259
5.2.5. Parámetros determinados	260
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	261
5.3.1. Estudio de la Respuesta UPF y de la Respuesta Grado de Blanco ISO de los tejidos en función de la concentración de blanqueador óptico	261
5.3.1.1. Resultados en la determinación de los parámetros	261
5.3.1.1.1. Espectros de absorción en el ultravioleta-visible de los baños de tratamiento	261
5.3.1.1.2. Espectros de transmisión de radiación de los tejidos en la región del ultravioleta	263
5.3.1.1.3. Factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos (UPF).....	272
5.3.1.1.4. Grado de blanco ISO de los tejidos.....	276
5.3.1.2. Análisis estadístico de los resultados	279
5.3.1.2.1. Diseño experimental: variables y niveles de las variables	279
5.3.1.2.2. Codificación de las variables	280
5.3.1.2.3. Modelo inicial.....	282
5.3.1.2.4. Procedimiento de análisis para la estimación del modelo significativo y coeficiente de determinación del ajuste	283
5.3.1.2.5. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Algodón blanqueados	283
5.3.1.2.6. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal blanqueados.....	288
5.3.1.2.7. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal Sun blanqueados	292
5.3.1.2.8. Comparación entre los modelos obtenidos para las diferentes fibras	295
5.3.1.2.9. Modelización de la respuesta Grado de Blanco ISO en los tejidos de Algodón blanqueados	299
5.3.1.2.10. Modelización de la respuesta Grado de Blanco ISO en los tejidos de Modal blanqueados	302
5.3.1.2.11. Modelización de la respuesta Grado de Blanco ISO en los tejidos de Modal Sun blanqueados	305
5.3.2. Consideraciones para la elección de las condiciones óptimas de tratamiento	309
5.4. CONCLUSIONES.....	315

CAPÍTULO 6. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE UN PRODUCTO DE ACABADO ESPECÍFICO EN EL FACTOR DE PROTECCIÓN A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	323
6.1. INTRODUCCIÓN	325
6.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	328
6.2.1. Materia.....	328
6.2.2. Producto de acabado específico	328
6.2.3. Planificación experimental y fórmula del baño de tratamiento.....	329
6.2.4. Proceso de tratamiento con el producto de acabado.....	330
6.2.5. Determinación de la permanencia del efecto de acabado	331
6.2.5.1. Permanencia del acabado tras lavados repetidos.....	331
6.2.5.2. Permanencia del acabado tras exposición a la luz.....	332
6.2.6. Determinación de la carga ecotoxicológica del tratamiento.....	332
6.2.7. Parámetros determinados	333
6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	334
6.3.1. Estudio de la Respuesta UPF del tejido en función de la concentración del producto de acabado.....	334
6.3.1.1. Resultados en la determinación de los parámetros.....	334
6.3.1.1.1. Espectros de absorción en el ultravioleta-visible del baño de tratamiento.....	334
6.3.1.1.2. Espectros de transmisión de radiación de los tejidos en la región del ultravioleta.....	335
6.3.1.1.3. Factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos (UPF).....	342
6.3.1.2. Análisis estadístico de los resultados	345
6.3.1.2.1. Diseño experimental: variables y niveles de las variables.....	345
6.3.1.2.2. Codificación de las variables.....	346
6.3.1.2.3. Modelo inicial.....	347
6.3.1.2.4. Procedimiento de análisis para la estimación del modelo significativo y coeficiente de determinación del ajuste.....	348
6.3.1.2.5. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Algodón acabados	348
6.3.1.2.6. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal acabados.....	353
6.3.1.2.7. Modelización de la respuesta UPF en los tejidos de Modal Sun acabados	357
6.3.1.2.8. Comparación de los resultados obtenidos para las diferentes fibras	360
6.3.2. Microscopía SEM.....	362
6.3.3. Estudio de la permanencia del acabado	366
6.3.3.1. Permanencia del acabado tras lavados repetidos.....	366
6.3.3.1.1. Espectros de transmisión de radiación de los tejidos en la región del ultravioleta.....	366
6.3.3.1.2. Factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos (UPF).....	374
6.3.3.2. Permanencia del acabado tras exposición a la luz artificial	379
6.3.3.2.1. Espectros de transmisión de radiación en el ultravioleta de los tejidos.....	379
6.3.3.2.2. Factor de protección a la radiación ultravioleta de los tejidos (UPF).....	386

6.3.4. Carga ecotoxicológica del tratamiento de acabado	391
6.3.4.1. Principales contaminantes en la industria textil y legislación aplicable	391
6.3.4.2. Evaluación de la carga ecotoxicológica	393
6.3.4.2.1. Inhibición de la movilidad en Daphnia	393
6.3.4.2.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)	394
6.3.4.2.3. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5)	395
6.3.4.2.4. Compuestos Orgánicos Halogenados (AOX)	396
6.3.4.2.5. Carbono Orgánico Total (TOC)	396
6.3.4.2.6. Materias en suspensión	397
6.3.4.2.7. Cloruros	397
6.3.4.2.8. Fosfatos	398
6.3.4.2.9. Sulfatos	399
6.3.4.2.10. pH	400
6.3.4.2.11. Conductividad	400
6.3.4.2.12. Biodegradación	401
6.4. CONCLUSIONES	403
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES FINALES	409
CAPÍTULO 8. NORMAS Y MÉTODOS OPERATIVOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DETERMINADOS	421
8.1. DETERMINACIÓN DE LA TRANSMITANCIA ESPECTRAL DIFUSA Y EL UPF DE LOS TEJIDOS	423
8.1.1. Transmitancia espectral, Transmitancia media UVR, UVA y UVB	423
8.1.2. UPF de una muestra	424
8.1.3. Índice UPF	426
8.1.4. Preparación de las muestras de tejido	426
8.1.4.1. Estirado de las muestras de tejidos	427
8.1.4.2. Humectación y medida de las muestras de tejidos	427
8.1.5. Aparato utilizado	427
8.2. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS	429
8.2.1. Peso por unidad de superficie	429
8.2.2. Espesor	429
8.2.3. Cobertura	430
8.3. ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN UV-VIS	435
8.3.1. Espectros de absorción UV-Visible	435
8.3.2. Agotamiento de los baños de tintura	435
8.3.3. Aparatos utilizados	436
8.4. MEDIDA INSTRUMENTAL DEL GRADO DE BLANCO DE LOS TEJIDOS	437
8.4.1. Grado de Blanco ISO	437
8.4.2. Aparatos utilizados	437

8.5. ESPECTROSCOPIA FT-IR.....	438
8.5.1. Preparación de las muestras.....	438
8.5.2. Aparato utilizado.....	438
8.6. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.....	439
8.6.1. Preparación de las muestras.....	439
8.6.2. Aparatos utilizados.....	439
8.7. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS ECOTOXICOLÓGICOS.....	440
8.7.1. Inhibición de la movilidad en Daphnia.....	440
8.7.2. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	440
8.7.3. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5).....	440
8.7.4. Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX).....	441
8.7.5. Carbono Orgánico Total (COT).....	441
8.7.6. Materias en suspensión.....	442
8.7.7. Cloruros.....	442
8.7.8. Fosfatos.....	443
8.7.9. Sulfatos.....	443
8.7.10. pH.....	443
8.7.11. Conductividad.....	443
8.7.12. Biodegradación.....	444
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA.....	445
9.1. BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA EN LA ELABORACIÓN DE LA MEMORIA.....	447
9.2. OTRAS REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS.....	453
9.2.1. Efecto de la radiación ultravioleta sobre la salud.....	453
9.2.2. Factor de Protección Solar de los artículos textiles.....	454
9.2.3. Técnicas y normativa para la medida del UPF de tejidos.....	456
9.2.4. Bibliografía general.....	458