



BIONATEX

Nuevas aplicaciones en
acabados textiles a partir de
residuos de proximidad y
bioprocesos de
transformación sostenibles
para el sector textil.



Contenido

1. Ficha técnica del proyecto	2
2. Antecedentes y motivaciones	3
3. Objetivos del proyecto	4
4. Plan de trabajo	5
5. Resultados obtenidos	6
6. Colaboradores externos e impacto empresarial	¡Error! Marcador no definido.



1. Ficha técnica del proyecto

N.º EXPEDIENTE	IMAMCA/2025/6
TÍTULO COMPLETO	Nuevas aplicaciones en acabados textiles a partir de residuos de proximidad y bioprocesos de transformación sostenibles para el sector textil.
PROGRAMA	Ayudas dirigidas a centros tecnológicos CV para proyectos de I+D en cooperación con empresas
ANUALIDAD	2025
PARTICIPANTES	-
COORDINADOR	-
ENTIDADES FINANCIADORAS	IVACE – INSTITUT VALENCIÀ DE COMPETITIVITAT EMPRESARIAL
ENTIDAD SOLICITANTE	AITEX
C.I.F.	-



2. Antecedentes y motivaciones

En el proyecto BIONATEX continua la línea de investigación de acabados y tinturas sostenibles continuación del proyecto APRONATEX 2. En BIONATEX abordaremos la utilización de residuos de proximidad para la extracción de color a partir de los mismos y emplearlos en tintura a nivel semi-industrial, favoreciendo así la economía circular de un área geográfica concreta y de varios sectores industriales diferentes.

En cuanto a las tinturas sostenibles de índigo obtenido a partir de fuentes naturales, como el índigo microbiano, se va a escalar dicho proceso y caracterizar los resultados de sus tinturas frente las que emplean otras fuentes de indigotina (de origen sintético o vegetal).

Y en base a oportunidades identificadas en APRONATEX 2, se amplían las líneas de trabajo en nuevos bioprocesos, con la nueva línea de biorreciclado enzimático se pretende estudiar conocimiento del tema mediante un estudio bibliográfico y realizando pruebas a nivel experimental de degradación de residuos textiles. En cuanto a la desinfección bioquímica, se desea valorizar residuos textiles no reciclables por otras vías y estudiar procedimientos para su acondicionamiento e higienización.



3. Objetivos del proyecto

Los objetivos específicos del proyecto BIONATEX se clasifican con respecto dos líneas estratégicas:

Tinturas con colorantes de origen natural

Se pretende valorizar residuos de proximidad a partir de la optimización de extracciones y de ahí proceder a tinturas y/o acabados textiles y tinturas. Se desea desarrollar tinturas sostenibles (a partir de fuentes naturales) como el índigo microbiano y la comparación técnica de la tintura de índigo con otros índigos como el índigo sintético y el índigo vegetal. En cuanto a las estampaciones se desea generar fórmulas biobasadas con prestaciones técnicas similares a las realizadas con composiciones sintéticas.

Procesos y tecnologías sostenibles

Puesta a punto de biorreciclado enzimático de residuos textiles para su nuevo uso en procesos textiles. Higienización y acondicionamiento de textiles de modo sostenible.



4. Plan de trabajo

Línea 1 Estudio comparativo y caracterización de tres tinturas de índigo.

- caracterización comparativa de tres tipos de tintura de índigo: índigo vegetal, índigo sintético e índigo microbiológico
- caracterización técnica de las tres tinturas

Línea 2 Bioproducción de colorantes a partir de microorganismos.

- optimización de la bioproducción de índigo microbiano en biorreactor
- clonación de ácido carmínico en *Escherichia coli* (no patógena)

Línea 3 Acabados y Tinturas con Residuos de Proximidad y Color Natural

- extracciones y tinturas con residuos de proximidad
- estampaciones biobasadas con colorantes naturales-residuos
- tinturas mixtas de colorantes naturales y sintéticos

Línea 4 Higienización sostenible de textiles

- higienización de textiles por vaporización
- higienización de textiles por ozonización
- caracterización técnica de textiles higienizados

Línea 5 Bioreciclaje

- estudio bibliográfico documental sobre el estado actual del bioreciclaje
- cuantificación de la degradación de celulosa procedente de residuo textil por enzimas

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Línea 1	
Línea 2	
Línea 3	
Línea 4	
Línea 5	

5. Resultados obtenidos

RESUMEN DE LOS RESULTADOS

Explicar que resultados se han obtenido (cualitativo y cuantitativo)

LINEA 1 Estudio comparativo y caracterización de tres tinturas de índigo.

Como resultado general de esta línea se ha realizado una caracterización comparativa de tres tipos de tintura de índigo: índigo vegetal, índigo sintético e índigo microbiológico. A través de este análisis, hemos evaluado los diferentes pigmentos en términos de concentración de indigotina, tinturas textiles y caracterización técnica de las tinturas en cuanto a solidez a la luz y solidez al frote.

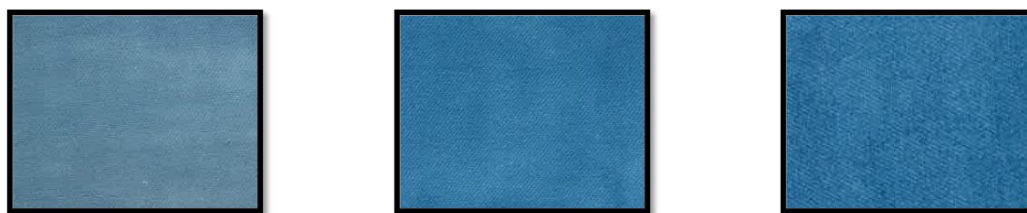
La indigotina al tener dos formas la coloreada y la leuco(transparente) tiene una cuantificación por espectrofotometría bastante compleja. Debe estar oxidada con dimetilsulfóxido (DMSO) y emite un máximo de absorbancia a 610-620 nm

Se ha realizado una cuantificación de indigotina de origen vegetal y sintético por espectrofotometría, para poder medir la concentración de índigo microbiano.

Tinturas comparativas de los tres tipos de índigo

9

Los resultados de la tintura con los tres índigos por agotamiento a una concentración aproximada de indigotina de 0.3 g/l se pueden observar en la imagen siguiente:



ÍNDIGO MICROBIANO

ÍNDIGO VEGETAL

ÍNDIGO SINTÉTICO

Ilustración 1: tintura de tres tipos de índigo mediante agotamiento.

Como se puede apreciar se consiguió una intensidad de color bastante similar poniendo de manifiesto que la concentración de indigotina se ha realizado correctamente. Se puede ver que el tono de azul en el caso del índigo microbiológico tiene un componente morado que podría venir del isómero especular de la indigotina llamada indirubina y que tiene coloración rojiza.

CARACTERIZACIÓN TÉCNICA DE LOS TEJIDOS TINTADOS CON ÍNDIGO

Solidez al lavado (UNE-EN ISO 105-C06)

En la *Tabla 1*, están recogidos los valores de transferencia observados para las distintas fibras del tejido testigo. El microíndigo fue el que más transferencia tuvo a la muestra tejido, su transferencia es especialmente alta hacia poliamida y moderada hacia triacetato, mientras que acrílica y viscosa no muestran transferencia. El índigo sintético y vegetal mostraron poca transferencia, todas las fibras un valor de 5 a excepción de la poliamida, 4 y 3, respectivamente.

Tabla 1: análisis transferencia de las tinturas de índigo al testigo directo.

	Índigo sintético	Índigo vegetal	Microíndigo
Triacetato	5	5	3
Algodón	5	5	4
Poliamida	4	3	2
Poliéster	5	5	4
Acrílica	5	5	5
Viscosa	5	5	5

En cuanto a la solidez al lavado para el desgaste de las propias muestras, para los tres índigos se observó un valor de 4/5. Cabe destacar que en el índigo microbiológico se observó un cambio de tonalidad en lugar de intensidad.

Con relación a la solidez al lavado, en la parte de transferencia al tejido testigo el microíndigo muestra mayor en la poliamida (valor 2), mientras que el índigo vegetal (3) y el sintético (valor 4). En cuanto al triacetato y algodón, el índigo sintético y vegetal tiene un valor de 5 y el microíndigo su valor es 4. En lo que se refiere a la fibra acrílica y la viscosa todos los índigos muestran la misma transferencia al tejido testigo con valor de 5 (excelente). En cuanto a la solidez al lavado para desgaste de las propias muestras, en los tres índigos se observó un valor de 4/5. Cabe destacar que en el índigo microbiológico se observó un cambio de tonalidad en lugar de intensidad. (Escala: 1-muy deficiente, 2 deficiente, 3-aceptable, 4-muy buena y 5-excelente).

Solidez a la luz (EN ISO 105-B02:2014)

Los resultados de la solidez a la luz están recogidos en la *Tabla 6*. A 100 h, el índigo sintético (4-5) muestra la mejor solidez, seguido del índigo vegetal (4) y microíndigo (3); a 240 h, los tres quedan en 3. Esto es indicativo que, bajo condiciones prolongadas de radiación, el factor determinante deja de ser el origen del colorante y pasa a ser la estructura química común del índigo y su comportamiento fotoquímico.

Tabla 2: resultados de solidez a la luz para índigo microbiológico, vegetal y sintético.

Muestra	Índice solidez a la luz
100 horas	
Microíndigo	3
Índigo vegetal	4
Índigo sintético	4-5
240 horas	
Microíndigo	3
Índigo vegetal	3
Índigo sintético	3

LINEA 2 Bioproducción de colorantes a partir de microorganismos.

En esta línea se ha realizado la bioproducción de indigotina en biorreactor a partir de una cepa recombinante de *Escherichia coli* propiedad de AITEX generada en el proyecto Apronatex 2.

En el proyecto BIONATEX se ha bioproducido el pigmento indigotina en un biorreactor bajo las condiciones seleccionadas después de su estudio exhaustivo.

En cuanto a la esterilización del cultivo se realizó con las concentraciones de una tintura de índigo (con la indigotina totalmente reducida en forma leuco, 4 g/L de NaOH y 3 g/L con hidrosulfito) Se observó la reducción del índigo obteniendo un tono más verdoso.

Los resultados de la siembra de la botella esterilizada se observan en la *Imagen 23*. En ambas placas no se observó crecimiento tras 72 horas de cultivo a 35° C validando que el cultivo es estéril.



Ilustración 2: cultivo microbiológico de índigo tras la reducción y esterilización con 4g/l de NaOH y 3 g/l.

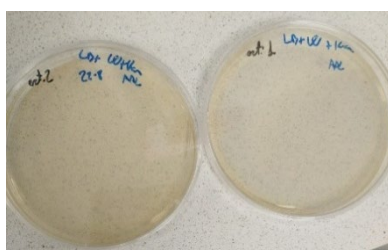


Ilustración 3: duplicado de placas sembradas tras la esterilización con NaOH y dihidrosulfito.

Después de muchas pruebas en biorreactor y tras ir optimizado con antiespumante, aire estéril, adición de medio(fed-batch), se consiguió producción visible de índigo a escala biorreactor, alcanzando altas densidades celulares y se observa bioproducción de indigotina.

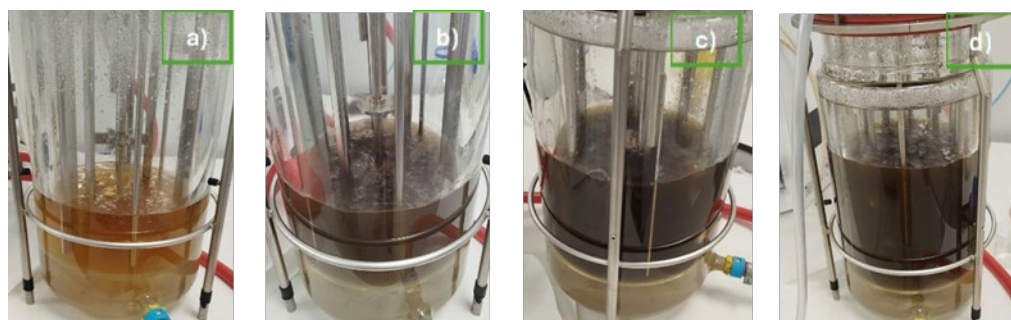


Ilustración 4: a) Biorreactor recién salido del autoclave previo a la inoculación del precultivo. b) Biorreactor tras 24 horas de cultivo c) Biorreactor tras 24 horas de la adición de 0,5 L de medio adicionales e introducir el aire estéril. d) Biorreactor tras 24 horas de la adición de 1 L de medio adicional y continuar con el aire estéril.

Siendo la cuantificación del biorreactor: **8 g/l** de indigotina, resultado generado por la Universidad de Alicante. La esterilización del biorreactor se llevó a cabo de forma exitosa obteniendo tras 24 horas el color característico amarillo del índigo en su forma leuco y observándose una capa de burbujas azul en la interfase líquido aire que indica la oxidación de las moléculas de aire superficiales.

Otro resultado dentro de esta línea es la obtención de una cepa de *Escherichia coli* BL21 (no patógena) productora de ácido carmínico, obtenida con la colaboración de los servicios externos de las empresas Cultiplay y Sanbiotech. La cepa crece en medio sólido, pero no se observa crecimiento en cultivo líquido en las condiciones estudiadas.

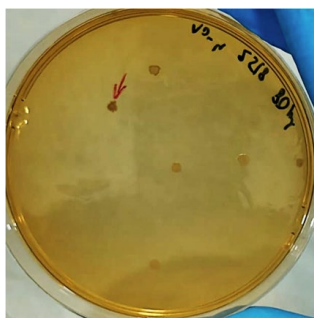


Ilustración 5: cepa de E.coli productora de ácido carmínico.

Para ello, se necesitó clonar 5 genes y a continuación se realizó la mejora de la cepa mediante mutación al azar para mejorar la ruta metabólica implicada en la síntesis de este pigmento. Se estableció una estrategia de mejora basada en mutagénesis aleatoria y selección fenotípica, que permitió aislar variantes con mayor pigmentación en cultivo sólido respecto a la cepa BL21+AC original. Los resultados apoyan que la cepa productora de ácido carmínico puede alcanzar el final de la ruta en condiciones específicas, si bien se requiere incrementar el flujo metabólico y/o mejorar clones y condiciones de cultivo para lograr niveles cuantificables y reproducibles en fase líquida.

LINEA 3 Acabados y Tinturas con Residuos de Proximidad y Color Natural

EXTRACCIONES Y TINTURAS CON RESIDUOS DE PROXIMIDAD

Aguacate

TINTURA A ESCALA PILOTO. TINTURA EN CUERDA, NATURA

Se ha realizado el escalado a la tintura realizada a escala de laboratorio en una máquina semiindustrial de tintura mediante el sistema en cuerda con la técnica por agotamiento. Se ha realizado una tintura sobre tejido de algodón de punto liso circular.

Se han realizado ensayos de solidez al lavado, las muestras se caracterizan según la norma UNE-EN ISO 105-C06. Tras la valoración, los resultados muestran en todos los tejidos testigo una solidez de 5 y una degradación de 5, por tanto, la solidez al lavado es excelente.



Ilustración 6: inicio de tintura con extracto de aguacate (Izquierda) y final de tintura (derecha)

En la muestra de tejido se han realizado también dos pruebas de ciclos de lavado, 5 y 10 con el fin de comprobar si el tejido sufre degradación conforme aumentan los lavados con detergente convencional.



Ilustración 7: tejido sin lavar, tejido lavado 5 veces y tejido lavado 10 veces.

Tabla 3 : degradación color con 5 lavados y con 10 lavados.

DEGRADACIÓN	VALOR
5 lavados	3
10 lavados	2/3

TINTURA A ESCALA PILOTO. AUTOCLAVE DE TINTURA EN HILO

Las tinturas en formato de cono de hilo se llevan a cabo en un autoclave de tintura en hilo de tipo piloto. En cuanto a la solidez al lavado, las muestras se caracterizan según la norma UNE-EN ISO 105-C06. La valoración de la solidez al lavado del hilo tintado con extracto de aguacate con todos los tejidos testigo es de 5, el valor más alto de la escala, lo que implica una solidez al lavado muy buena/excelente para las muestras de hilo.

Tomate

Se realizó una extracción y tintura con residuos de tomate. La tintura con el extracto de tomate se realiza sobre sustratos de poliéster. Los sistemas de mordentado empleados son por un lado el mordentado con sales de alumbre y taninos de roble, y por otro lado un mordentado comercial basado en sales de alumbre y quitosano (vegeplus + vegeset). Posteriormente, los tejidos se enjuagan y se secan al aire, preparados para su caracterización. La caracterización de los tejidos de poliéster tintados con extracto de tomate dio como resultado el siguiente análisis colorimétrico.

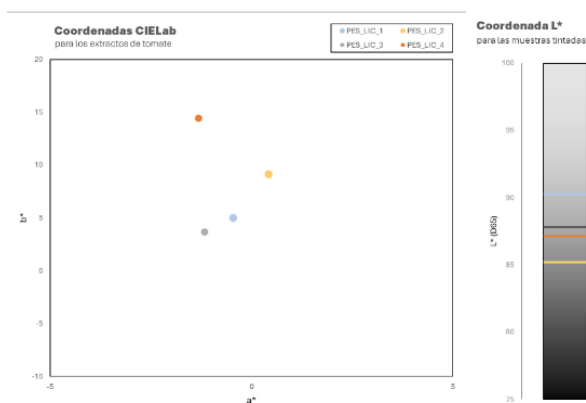


Ilustración 8: Análisis colorimétrico de las muestras tintadas con extracto de tomate

Persimon

En cuanto al aprovechamiento del caqui, se ha validado, en términos de colorimetría, el empleo de los taninos presentes en el zumo de caqui fermentado como colorante natural para el colorante natural extraído de las flores de *Tagetes erecta* y *Butea monosperma*, ambas conteniendo pigmentos del tipo carotenoide y flavonoide.

En la tabla 2 se muestran las diferentes muestras obtenidas, además de los resultados del análisis colorimétrico en coordenadas de espacio de color CIELab.

Tabla 4: Prototipos obtenidos según los diferentes sistemas de mordentado descritos y medidas de las coordenadas de color en el espacio CIELab.

Muestra	L*	a*	b*	Muestra
PT 1%	75,27	8,06	37,55	
PT 5%	70,37	11,24	32,34	
PT 10%	66,78	13,51	33,69	
Alumbre + GT	77,38	11,64	44,02	
Alumbre	82,09	8,37	46,5	
Sin mordentar	82,26	6,57	48,15	

En cuanto a los valores de K/S, se consigue una mayor saturación de color y rendimiento del colorante en los tejidos mordentados con zumo de caqui respecto al tejido sin mordentar. En comparación con los otros sistemas de mordentado comúnmente utilizados (alumbre + tanino de roble y alumbre), el mordentado solo con alumbre disminuye el rendimiento de color, mientras que el mordentado con una concentración superior al 5% de caqui consigue mayores valores de K/S respecto al mordentado con la mezcla de alumbre y tanino de roble, utilizando una concentración significativamente menor de mordiente (5% de extracto de caqui frente a 10% + 15% de alumbre y tanino de roble, respectivamente).

El uso de este mordentado provoca un cambio en la tonalidad del color obtenido respecto a la muestra sin mordentar, pero mejora significativamente el rendimiento del color y el agotamiento de este.

ESTAMPACIONES BIOBASADAS CON COLORANTES NATURALES-RESIDUOS

Se ha realizado una fórmula de estampación biobasada, se pretende evaluar la eficacia de la fórmula de estampación con los siguientes colorantes naturales. En cuanto a los resultados obtenidos en colorimetría:

Cada colorante natural aporta una firma colorimétrica distintiva. La clorofila genera tonos verdes oscuros, con alta negatividad en a^* . El bio-índigo produce azules profundos con baja luminosidad. Yeliona muestra tonos amarillos brillantes y luminosos. Rubia y Kerria Lacca da como resultados rojos intensos, con alto a^* . Logwood crea tonos violáceos/rojizos, intensificados al combinar con hierro hacia gamas azuladas. En cuanto a mallow y acacia genera colores intermedios, con matices cálidos y buena saturación.

Los resultados en cuanto al ensayo de solidez a la luz, realizado según la norma EN ISO 105-B02:2014 (Método 5), muestra que la mayoría de los colorantes naturales presentan una resistencia limitada, con valores

mayoritariamente entre 1 y 3 tras 100 y 240 horas de exposición. Durante las primeras 100 horas, algunos colorantes alcanzan un comportamiento moderado: Bio-índigo (especialmente I2), Rubia (R2), Logwood con hierro (LWFe1 y LWFe2) y Mallow (M1 y M2), con puntuaciones de 3 a 3-4. En cambio, Clorofila (L1 y L2) y Acacia (A1 y A2) muestran desde el inicio una baja estabilidad (1–2). Tras 240 horas, la degradación se intensifica.

En relación con el ensayo de solidez al frote, realizado según UNE-EN ISO 105-X12 los resultados muestran que la mayoría de los colorantes naturales presentan una solidez muy buena en seco (valores 4–5), lo que indica una fijación estable del colorante a la fibra. En húmedo, como es habitual, la solidez disminuye ligeramente debido a la mayor movilidad del colorante, con resultados que oscilan entre 3 y 5. Los colorantes con mejor comportamiento en ambas condiciones son la Clorofila, Kerria Lacca, Mallow, Acacia y Logwood mordentado con hierro, todos con valores de 4/5, lo que evidencia una excelente estabilidad cromática. Yeliona, Rubia (R1) y el Bio-índigo (I1) mantienen buenos valores en seco y descienden moderadamente en húmedo, sin comprometer la solidez global. Los resultados menos favorables corresponden al Bio-índigo (I2), la Rubia (R2) y el Logwood sin hierro, que muestran valores entre 3 y 3/4 en húmedo, reflejando mayor sensibilidad a la fricción en presencia de humedad. En conjunto, los tejidos teñidos con colorantes naturales muestran una solidez al frote excelente en seco y aceptable en húmedo, con variaciones según el tipo de colorante y la presencia de mordientes.

El ensayo de solidez al lavado, realizado según la norma UNE-EN ISO 105-C06, muestra comportamientos muy diferenciados entre los colorantes naturales evaluados. Los mejores resultados corresponden al Bio-índigo, Logwood con hierro y Acacia, con degradaciones de 4/5 y sin descargas relevantes en los testigos multifibra, lo que indica una excelente estabilidad al lavado. La Clorofila presenta una solidez aceptable (3/4) con descargas mínimas. En contraste, Mallow y Logwood sin hierro muestran degradaciones bajas (1/2), aunque sin transferencia de color a los testigos, lo que confirma que la pérdida cromática se produce principalmente en el baño de lavado. Los colorantes más críticos son Rubia, Yeliona y Kerria Lacca: Rubia presenta muy baja solidez (1) y descargas intensas en algodón, poliamida y viscosa; Yeliona muestra degradación moderadamente baja (2–2/3) con descargas en algodón y viscosa; y Kerria Lacca, aunque no transfiere color a los testigos, presenta una degradación de 1, reflejando una estabilidad cromática limitada.

TINTURAS MIXTAS DE COLORANTES NATURALES Y SINTÉTICOS

Se han utilizado los colorantes directos, en concreto el colorante directo amarillo (Amarillo Directo RL 125%) y el colorante directo azul (Azul Directo 4BL 230%). Como colorante natural, se utilizará Marigold (Yeliona), que actuará como coadyuvante cromático en dos combinaciones distintas: por un lado, se mezclará con el amarillo directo, y por otro, con el azul directo. Los códigos corresponden a distintas formulaciones tintóreas empleadas en los ensayos. La formulación **DA_0,88%** contiene colorante directo amarillo al 0,88%, mientras que **DA_0,26%** incorpora el mismo colorante directo amarillo, pero a una concentración del 0,26%. El código **Y** se refiere exclusivamente al colorante natural al 5%. Las mezclas **DA_Y_0,88%** y **DA_Y_0,26%** combinan colorante directo amarillo a 0,88% y 0,26%, respectivamente, con colorante natural al 5%. La variante **DA_Y_0,26% (sal)** mantiene la misma composición que la anterior, pero incluye sal como aditivo. Por otro lado, **DAz_Y_1%** y **DAz_Y_0,05%** corresponden a formulaciones que combinan colorante directo azul al 1% y al 0,05%, respectivamente, con colorante natural al 5%. Finalmente, **DR_R_0,55%** designa la mezcla de colorante directo rojo al 0,55% con colorante natural al 5%.

En este caso, como las tinturas se han realizado sobre tejido de algodón, utilizando un mordentado de alumbre y gallnut, ya que se crean enlaces entre las moléculas del colorante y las fibras del tejido, lo que asegura que los colores sean más resistentes y duraderos. Para estas tinturas se empleó un tejido de punto de algodón 100% (ligamento piqué)

Los resultados que se han obtenido son los que se pueden ver en la siguiente imagen:

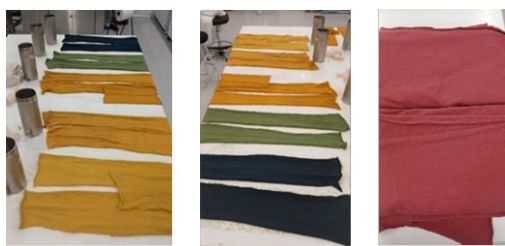


Ilustración 9: tinturas mixtas.

El ensayo evalúa las propiedades colorimétricas de tejidos teñidos con mezclas de colorantes directos y el colorante natural Yeliona mediante espectrofotometría. Todas las muestras se prepararon a partir de una misma disolución que combinaba colorantes directos (amarillo, azul y rojo) con una proporción fija de Yeliona, analizando los parámetros L , a , b y K/S para determinar cambios en luminosidad, tono e intensidad. Los resultados muestran que Yeliona modifica la respuesta cromática de los colorantes directos. En el amarillo, reduce ligeramente la luminosidad y aumenta el K/S , intensificando el tono y aportando un matiz cálido sin alterar su carácter. La ausencia de sal produce colores más claros, mientras que la combinación de Yeliona y sal genera un equilibrio entre profundidad e intensidad, indicando una interacción sinérgica. En el azul, las mezclas con Yeliona producen tonos muy oscuros y saturados a altas concentraciones, y una pérdida de saturación con tendencia verdosa a concentraciones bajas. En el rojo mezclado con Rubia, se mantiene un color intenso y oscuro, con altos valores de a^* y K/S , reflejando buena compatibilidad.

El ensayo de solidez a la luz, realizado según EN ISO 105-B02:2014 (Método 5), muestra que los tejidos teñidos únicamente con colorantes directos presentan una excelente resistencia (grado 5) tanto a 100 como a 240 horas de exposición. Sin embargo, la incorporación de Yeliona al 5% reduce ligeramente la estabilidad: las mezclas con colorante directo amarillo alcanzan valores de 4 (0,88%) y 3–4 (0,26%). Yeliona sola muestra una solidez intermedia, coherente con la menor estabilidad fotoquímica de los colorantes naturales. La presencia o ausencia de sal no modifica la solidez a la luz en las formulaciones evaluadas. En el caso del azul directo con Yeliona, la solidez es excelente (5) a alta concentración (1%), pero disminuye notablemente (2–3) a concentraciones bajas (0,05%), evidenciando una fuerte dependencia de la concentración. La mezcla de colorante reactivo rojo con Rubia presenta una solidez moderada (3), atribuible a la limitada estabilidad del colorante reactivo y/o del colorante natural.

Los ensayos de solidez al lavado realizados según UNE-EN ISO 105-C06 muestran diferencias marcadas entre colorantes directos, naturales y sus mezclas. Los colorantes directos aplicados individualmente presentan una excelente resistencia a la degradación (valor 5) y muy buena solidez en fibras sintéticas (5), aunque muestran cierta migración en fibras celulósicas como algodón y viscosa (3–4). El colorante natural Yeliona presenta una estabilidad más limitada: degradación de 3 y menor solidez en algodón (3) y viscosa (4), aunque mantiene valores altos en fibras sintéticas (5). Esto confirma la menor resistencia global de los colorantes naturales, especialmente en fibras celulósicas.

LINEA 4 Higienización sostenible de textiles

En la línea higienización de textiles se ha utilizado tanto la ozonización en fase gaseosa como la vaporización que son técnicas viables para la higienización de textiles, logrando reducciones significativas en la carga microbiológica. La eficacia del ozono fue dependiente de la concentración aplicada, con reducciones en bacterias aerobias: entre 8,5%-55,5%. En cuanto a los mohos y levaduras con la higienización por ozona se dió una reducción de hasta 83,3%. La vaporización mostró una eficacia superior, con reducciones del 77–88% en bacterias aerobias y eliminación completa (100%) de mohos y levaduras en la mayoría de las condiciones ensayadas.



LINEA 5 Bioreciclaje, estudio y normativas

La bibliografía confirma que las enzimas son catalizadores altamente específicos y eficientes para procesos textiles, permitiendo sustituir tratamientos químicos agresivos por métodos sostenibles. También se observó que las enzimas pueden utilizarse para el procesamiento de fibras naturales para la obtención de glucosa y aminoácidos que pueden ser integrados posteriormente en procesos fermentativos. La efectividad de los procesos enzimáticos sobre textiles aumenta cuando las fibras son previamente tratadas con un proceso mecánico, al mismo tiempo, la propia eficacia de las enzimas se ve aumentada cuando estas son inmovilizadas en un soporte. Las pruebas experimentales corroboran esta viabilidad: la hidrólisis enzimática alcanzó conversiones de hasta 70% en fibras celulósicas, validando su aplicabilidad en residuos mixtos. En cuanto a las fibras sintéticas, todavía no se han desarrollado procesos enzimáticos para procesarlas en condiciones ambientales.

Los estudios revisados y el ensayo con *Pleurotus ostreatus* demuestran que los hongos pueden colonizar/descomponer residuos textiles. Esto abre oportunidades para desarrollar materiales alternativos (p. ej., similares al cuero) y procesos de biodegradación y detoxificación de colorantes, integrando el micelio en estrategias de reciclaje.

Las normativas REACH y CLP obligan a garantizar la seguridad en el manejo de enzimas, lo que refuerza la necesidad de protocolos específicos y formulaciones seguras (enzimas líquidas o encapsuladas). Cumplir con estas regulaciones es clave para la adopción industrial de estas tecnologías.