



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Informática

Modelado basado en física de la apariencia de plumas
Physically-Based Modeling of Feathers

Autor

Álvaro Romeo Arroyo

Directores

Adrián Jarabo Torrijos

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2021

Modelado basado en física de la apariencia de plumas

RESUMEN

Un problema abordado desde hace tiempo en el campo de la informática gráfica es el modelado de la complejidad de los materiales en el mundo real. El modelo de reflectancia de un material esta definido mediante una función de distribución de dispersión bidireccional, del inglés, *Bidirectional Scattering Distribution Function* comúnmente conocidas como BSDF. La BSDF permite definir como la luz es reflejada en una superficie, la cual define la apariencia de esta.

Las plumas de las aves desde el punto de la informática gráfica presentan un interesante desafío debido a la gran diversidad no sólo en cuanto a forma y apariencia si no también en cuanto a las propiedades ópticas que estas estructuras poseen en el reino aviar. Debido a la complejidad de estas estructuras se producen interacciones luz-materia a múltiples escalas, dando la posibilidad de producir fenómenos tan especiales como la iridiscencia.

En este proyecto se presenta el desarrollo de un modelo general de apariencia de las plumas basado en física, basado en la estructura multiescala de estas, así como de los parámetros biofísicos que definen su interacción luz-materia. Para ello, se realiza un estudio exhaustivo en el campo de la ornitología de la estructura y mecanismos de coloración en las plumas de las aves, así como de los trabajos relacionados en informática gráfica sobre ésta u otras estructuras similares, que permite obtener la información necesaria para el desarrollo del modelo. Además, se realiza la implementación de un software de modelado procedural de la geometría de estas sobre la cuál podamos aplicar el modelo y la integración del modelo desarrollado en el motor de renderizado Mitsuba, que nos permita la generación de imágenes sintéticas de plumas.

Índice

1. Introducción y objetivos	1
2. Trabajo Relacionado	5
3. Sobre la apariencia de las plumas	7
3.1. Estructura	7
3.2. Tipos de plumas	9
3.3. Coloración	9
3.3.1. Coloración basada en pigmentación	10
3.3.2. Coloración estructural	12
4. Modelado procedural de la geometría de las plumas	15
4.1. Modelado de la geometría de las plumas	15
4.2. Generación de las barbas	17
4.3. Rasterización de la geometría	18
4.4. Detalles de implementación	19
5. Modelo de apariencia de plumas basado en física	21
5.1. Marco teórico	21
5.2. Nuestro modelo	22
5.2.1. Modelo de cilindros dieléctricos	24
5.3. Integración del modelo en Mitsuba	26
5.3.1. Decisiones de diseño	27
5.3.2. Implementación del modelo	28
6. Resultados	29
7. Conclusiones y trabajo futuro	33
7.1. Conclusiones personales	34
7.2. Planificación temporal	34

8. Bibliografía	37
Lista de Figuras	43
Lista de Tablas	47
Anexos	48
A. Mitsuba	51
A.1. Arquitectura de Mitsuba	51
B. Tipos de plumas	55

Capítulo 1

Introducción y objetivos

Las plumas son la característica distintiva de las aves, y son una estructura única que no comparten con ninguna otra familia del reino animal [1, 2, 3]. Entre otras funciones, las plumas permiten a las aves volar, controlar la temperatura corporal, y camuflarse, y resultan fundamentales para la comunicación entre especies y sexos.

Al igual que el pelo o las uñas, la pluma es una estructura epidérmica que deriva de la piel y está compuesta fundamentalmente por queratina [2, 3]. Esta proteína les otorga una gran duración y resistencia frente a los efectos del medio ambiente [2, 4]. Sin embargo, a diferencia de otras estructuras presentes en el mundo animal, las plumas presentan una enorme diversidad en cuanto a tipo y forma, y su apariencia es el resultado de complejas interacciones luz-materia a diferentes escalas. En este sentido, las plumas son estructuras ordenadas, formadas de forma jerárquica: A escala milimétrica, las *barbas* surgen a ambos lados del *raquis* de la pluma (su eje central), dando forma a la pluma. De éstas, a su vez surgen múltiples *bárbulos* de tamaño microscópico que se entrelazan para fijar la estructura de la pluma. A escala nanoscópica, la queratina y otros compuestos presentes en las plumas forman complejas estructuras fotónicas que dan como resultado una enorme variedad de colores o efectos iridiscentes (ver Figura 1.1).

Pese al interés de este tipo de estructuras en campos como la ingeniería de materiales, así como la importancia de las aves en producciones audiovisuales, el modelado de la apariencia de plumas aviares ha sido relativamente ignorado en informática gráfica. Tan sólo un puñado de trabajos han explorado el tema, centrados fundamentalmente en el modelado de las mismas y no en su apariencia [4, 6, 7, 8].

El **objetivo** principal de este trabajo es el desarrollo de un modelo general de apariencia de plumas basado en física, basado en la estructura multiescala de las plumas, así como de los parámetros biofísicos que definen su interacción luz-materia. Para ello, nos basaremos en el vasto conocimiento existente en el campo de la ornitología, donde la apariencia de las plumas y su funcionalidad se ha estudiado



Figura 1.1: Visión de la gran diversidad de colorido en el reino aviar. Fuente: [5]

extensivamente. En la Sección 3 realizamos un análisis profundo de la estructura de las plumas y de la coloración de las mismas; basados en dicho análisis, en la Sección 5 proponemos un modelo general de apariencia de plumas, que integramos en MITSUBA [9], un motor de simulación de transporte de luz basado en física.

Contribuciones: En concreto, y en orden de importancia, las contribuciones de este trabajo son:

- Un modelo de apariencia basado en física de la apariencia de plumas aviares, centrado en modelar la reflectancia y coloración de las plumas de forma estadística (Sección 5).
- Un análisis exhaustivo de la estructura, pigmentación, y mecanismos de coloración en las plumas de aves, basado en la extensa literatura en el campo de la ornitología y la óptica en sistemas biológicos (Sección 3).
- La implementación de dicho modelo en el software de simulación de transporte de luz de código abierto MITSUBA como modelo de shading (Sección 5.3.2).
- Un software de modelado procedural de geometría de plumas, que utilizamos para generar los resultados en este trabajo (Sección 4).

Contexto y alcance: El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha realizado dentro de un proyecto de investigación en el Graphics and Imaging Lab de la Universidad de Zaragoza, en el contexto de la línea de investigación en apariencias complejas dentro del grupo. El proyecto en concreto está liderado por el autor de este TFG, requiriendo la investigación en los campos de informática gráfica y ornitología, así como el diseño, implementación y pruebas del modelo, por parte del autor del presente trabajo. Se espera que los resultados del mismo sean enviados para revisión a una revista de alto impacto dentro del campo de la informática gráfica.

Capítulo 2

Trabajo Relacionado

En este capítulo hacemos una revisión del trabajo previo realizado en el modelado de la apariencia de plumas así como de materiales similares en cuanto a estructura y propiedades ópticas.

Apariencia de plumas El trabajo existente en modelado de apariencia de plumas es relativamente pequeño. La mayoría de esos trabajos, se centran en el modelado geométrico de la pluma, es decir, un modelo paramétrico que permita simular la estructura que tiene una pluma. En este aspecto, los autores se han basado en el uso de curvas de Bezier para modelar cada una de las estructuras y las diferencias principales están en la forma de generar las barbas, ya que generar miles de ellas de forma automatizada es crucial[4, 6, 7]. Si bien los resultados obtenidos son bastante correctos, el usuario juega una parte fundamental a la hora de dar la forma deseada a la pluma, lo que en algunos casos puede ser problemático. Además, los bárbulos en este aspecto han sido totalmente ignorados debido a la dificultad para generar cientos de miles de ellos. Recientemente, Baron *et al.* [8, 10] presentó un modelo para extraer estadísticamente la información necesaria para poder parametrizar las plumas de forma automática a partir de imágenes de plumas reales, y además incluye los bárbulos como un elemento geométrico más.

En cuanto a dotar de color a las plumas, los trabajos mencionados anteriormente se limitan al uso de texturas difusas más o menos complejas, pero donde el análisis físico subyacente es escaso. En este aspecto, algunos trabajos se centran en analizar las interacciones de la luz con las múltiples escalas estructurales que tienen las plumas. Harvey *et. al* [11], presentó un modelo que analiza la importancia de las micro-estructuras de la pluma en el color percibido final, en el ave *African Esmerald Cuckoo*, en la cuál los machos presentan un hermoso colorido iridiscente en sus plumas.

Apariencia basada en microestructuras Aunque el trabajo previo en plumas no sea tan extenso, múltiples materiales en los que las microestructuras juegan un papel fundamental en la reflectancia final han sido estudiados y modelados. Éstos se basan en modelos de microfacetas en los que se considera la superficie rugosa de las microestructuras. Entre estos, otras estructuras epidérmicas han sido bien estudiadas y modeladas en informática gráfica como el pelo humano [12, 13, 14] y el pelaje animal [15], en las cuales se asume cada fibra como micro-cilindros con los cuales la luz interacciona de diversas formas. También modelos de telas cuya composición de igual forma son cilindros entrelazados de distintos materiales [16]. Estos modelos sientan las bases para el modelado de plumas, ya que las barbas y bárbulos de las plumas no dejan de tener una forma cilíndrica como los pelajes o la tela, y es más su distribución y composición a escala nanoscópica la que marca la diferencia en la coloración resultante.

Materiales basados en difracción A diferencia del pelo o pelaje de los mamíferos, las plumas de las aves al igual que otras estructuras epidérmicas como las alas de mariposa o escamas de reptiles presentan fenómenos de difracción de la luz como la iridiscencia. Múltiples trabajos han investigado y modelado materiales basados en difracción de la luz, algunos centrados en modelos generales de BSDF sensibles a difracción [17] o patrones goniocromáticos debido a interferencia de *capa fina/delgada* [18, 19].

Capítulo 3

Sobre la apariencia de las plumas

La apariencia de las plumas es el resultado de las interacciones luz-materia a múltiples escalas. Está determinada tanto por la estructura de las mismas como de su composición química. La estructura y tipo de pluma afecta a su aspecto a alto nivel, mientras que la composición química y su estructura a escala micro- y nanoscópica afecta fundamentalmente a su coloración, opacidad y reflectancia. En esta sección describimos cada uno de estos factores de arriba-abajo: Primero nos centramos en la estructura de las plumas y cada una de sus partes. Después hacemos una taxonomía de la tipología de plumas y su función. Finalmente, describimos los mecanismos de coloración de las mismas.

3.1. Estructura

Aunque las plumas tienen una increíble diversidad en cuanto a forma y tamaño, todas están compuestas principalmente de queratina, una proteína presente en todas las estructuras epidérmicas de todos los vertebrados [20]. A diferencia de las estructuras epidérmicas de los mamíferos (p.ej., pelo o uñas) cuya componente principal es la *alfa-queratina*, las estructuras de aves y reptiles se basan en la *beta-queratina*, la cual les confiere mayor rigidez. Esta proteína está presente en todas las estructuras epidérmicas de las aves (pico, garras, plumas...) pero están compuestas por diferentes variantes para las distintas funciones que tienen. La variación de beta-queratina en la estructura de las plumas es biomecánicamente más flexible, dotando de propiedades únicas requeridas para el vuelo [21].

Las características principales de una pluma típica consisten en un eje largo y central en el cual se consideran dos partes [1, 22] (ver Figura 3.1, izquierda): La parte inferior de este eje, la cual se inserta en la piel, es más ancha y se denomina **cálamo** [3] y el resto del eje se denomina **raquis**. A ambos lados del raquis crece a manera de lámina

dividida en dos partes el **vexilo**. El vexilo esta formado por las **barbas**, que crecen a lo largo de todo el raquis de manera ramificada [2, 22] con ángulo θ_b variable a lo largo del raquis.

Cada barba a su vez consiste en un eje central generalmente cónico, que ramifica a ambos lados en filas de pequeños **bárbulos**. Estos bárbulos pueden ser **proximales** y **distales**: Los primeros tienen un pequeño flanco, mientras que los segundos cuentan con una serie de **ganchillos** para acoplarse a los bárbulos proximales. Este acople genera una superficie entrelazada pero flexible que juntos a las barbas componen los vexilos [1, 2]. En general los bárbulos proximales y distales ramifican de su respectiva barba con idéntico ángulo $\theta_{bp} = \theta_{bd} = 45^\circ$ para maximizar su superposición favoreciendo el agarre de los ganchillos [23].

Esta ramificación tiene como consecuencia características a múltiples escalas (ver Figura 3.1, derecha): mientras que el cálamo tiene un radio $r_c = [1, 2]$ mm, la base de la estructura cónica de las barbas es elíptica, con radio $r_b \in [10, 100]$ μm [media 20 μm , desviación estándar (d.e.) 8.86 μm] [24, 25], eccentricidad media de $e_b = 2,25$ (d.e. 0,72) [26] y separación entre barbas $\Delta_b \in [100, 600]$ μm (media 264 μm , d.e. 56 μm) [25]. Los bárbulos, por otro lado, tienen una anchura hasta un orden de magnitud más pequeña que las barbas [27].

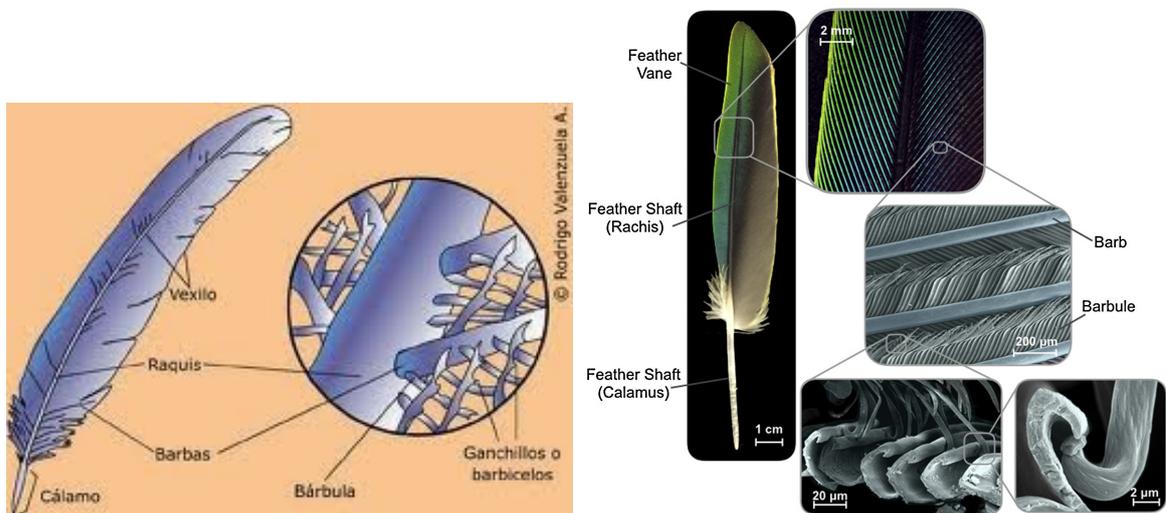


Figura 3.1: Estructura y partes de una pluma. **Izquierda** Vista esquemática de una pluma de contorno, con cada una de las partes. Fuente [28]. **Derecha** Vista a múltiples escalas de una pluma de vuelo real: Mientras que la pluma está en el orden del centímetro, las barbas son estructuras de unas decenas de micras de diámetro que se ramifican en centenas de bárbulos de tamaño microscópico. Fuente [29].

3.2. Tipos de plumas

La taxonomía de las plumas, basada exclusivamente en la estructura de la pluma, existe para clasificar un amplio rango de plumas de distintos tamaños, formas y tipos [22]. Una de las principales características para definir las plumas es el tipo de vexilo, que pueden ser plumáceos (difusos y suaves) o penáceos (firmes y rígidos) [20, 22]. La variación se debe principalmente a la presencia o ausencia de ganchillos que entrelazan las barbas adyacentes [20]. En función de esto, las plumas se clasifican generalmente en plumas de contorno, plumas de vuelo (de ala y cola), semiplumas, filoplumas, y cerdas. La Figura 3.2 muestra ejemplos de las mismas. En este trabajo, nos centramos en los dos primeros tipos de plumas, que pertenecen a la categoría de plumas penáceas. Más detalle sobre los tipos de plumas se puede encontrar en el Anexo B.

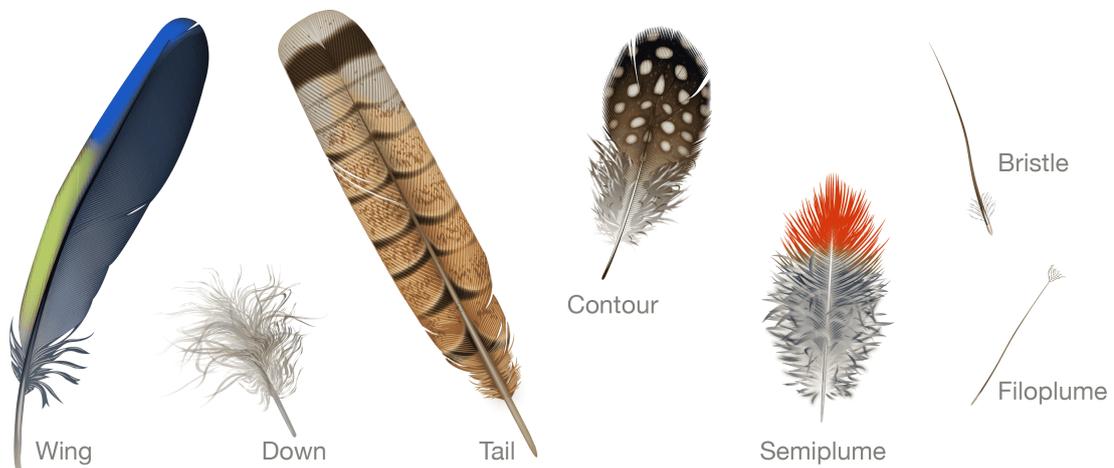


Figura 3.2: Clasificación taxonómica de las plumas. De izquierda a derecha podemos ver una visión general de ellas: Pluma de vuelo del ala, plumón, pluma de vuelo de la cola, pluma de contorno, semipluma, cerda y filopluma. Fuente [20].

3.3. Coloración

Las plumas combinan pigmentación y coloración estructural para crear colores más extraordinarios y variados, que para cualquier mamífero y la mayoría de vertebrados [30]. Los colores que tienen las plumas presentan una parte muy importante en las aves, ya que permiten a las aves funciones como camuflarse, el reconocimiento entre especies o exhibiciones de cortejo entre sexos [31].

De manera resumida, la coloración basada en pigmentos suspendidos en la queratina, que absorben la luz de forma definida por sus propiedades químicas. Los tonos negros, marrones, rojos y amarillos son causados fundamentalmente por la

pigmentación. Por otro lado, los colores estructurales dependen de la estructura interna de la pluma [32, 33, 34], y son causados por interacciones complejas luz-materia, incluyendo interferencia constructiva y destructiva. La coloración estructural es responsable de las tonalidades azules debidas a interferencia constructiva, así como de los fenómenos de iridiscencia. La Figura 3.3 muestra un ejemplo de los tres mecanismos fundamentales de coloración: basada en pigmentos, estructural difusa, y estructural iridiscente.

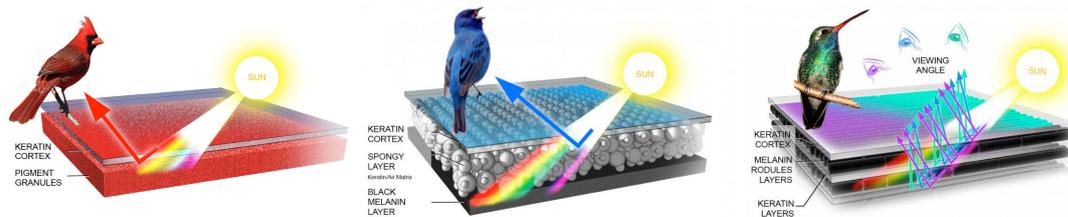


Figura 3.3: Tipos de coloración. **Izquierda:** Visión esquemática de la microestructura de una pluma pigmentada. Las longitudes de onda exceptuando la roja son absorbidas por los gránulos pigmentarios situados en la matriz de queratina. **Centro:** Visión esquemática de la microestructura de una pluma basada en coloración estructural difusa. El color azul es producido por la dispersión de la luz producida por la estructura interna de las barbas, los colores restantes son absorbidos por una capa de melanina. **Derecha:** Visión esquemática de la microestructura de una pluma basada en coloración estructural iridiscente. Las plumas cambian de color con diferentes ángulos de visión, efecto causado por arreglos complejos en la nano-estructura interna de los bárbulos de la pluma. Imágenes obtenidas de: [5]

3.3.1. Coloración basada en pigmentación

La coloración basada en pigmentos es la más común en los vertebrados, y está causada por la absorción de determinadas longitudes de onda (color). Los pigmentos son moléculas que absorben y reflejan cada una de las longitudes de onda de la luz, de ahí que se puedan asociar a un color. En el caso de la pluma estos colorantes son denominados biopigmentos y pueden ser endógenos (metabolizados por el organismo) o exógenos (derivados a través de la dieta). Estos pigmentos son depositados entre las láminas de queratina que componen las barbas, bárbulos y raquis [31]. Los pigmentos más prevalentes en las plumas son basados en melanina o en caroteno; sin embargo, otros pigmentos existen en determinadas especies. En las siguientes líneas, repasamos dichos pigmentos.

Melanina La melanina es el pigmento más común dentro de los vertebrados y está presente en todas las plumas de las aves, exceptuando las albinas, y producen una

amplia gama de colores, generalmente tonos marrones, grises y negros [35, 36, 37].

Hay dos tipos de variaciones químicas de melanina presentes en las plumas; la *eumelanina* y la *feomelaninas*. Todas las plumas melanizadas contienen estos dos tipos de pigmentos y es principalmente la proporción de ambos tipos de melanina en lo que determina el color [31, 35]. La eumelanina suele ser la responsable principal de los tonos negros, grises y marrón oscuro en el plumaje y la feomelanina es la responsable a tonos más cercanos al marrón rojizo ya sean más claros u oscuros [31, 37]. La combinación de ambos tipos de melaninas dan lugar a una gama de tonalidades y patrones muy extensa idóneas para camuflar al animal en su entorno.

Caroteno A diferencia de la melanina, los carotenoides no son sintetizadas por las aves si no que son obtenidos a través de la dieta [38]. Producen colores más vivos como rojos, amarillos y naranjas [31, 36, 39, 38, 40]. De forma general, una vez obtenidos los carotenoides se despositan en lípidos por lo que se distribuyen por todas las partes del cuerpo. Una vez en las células del folículo de la pluma, y de forma similar a la melanina, en el proceso de creación de la queratina el lípido se disuelve dispersando los carotenoides en las fibras de queratina, de nuevo pigmentándolas [31, 40]. Los carotenos juegan un papel fundamental en el cortejo entre sexos de los machos de aves que los poseen, puesto que un color más vivo y brillante producido por la adquisición de más carotenos suponen un signo de calidad y bienestar en el ave [40].

Porfirinas y psitacofulvinas Las porfirinas y psitacofulvinas son pigmentos menos comunes en las aves pero que producen ciertos tonos particulares en algunas especies. Similar a la melanina, las porfirinas son sintetizadas por el propio individuo, sin embargo, sólo las aves han sacado partido de las porfirinas para pigmentar sus estructuras basadas en queratina [41]. Las porfirinas producen un amplio rango de colores, incluyendo, rosados, marrones, rojos y verdes que esta presente en al menos trece especies de aves incluyendo búhos y abutardas [31], siendo el único pigmento conocido capaz de producir tonos verdosos por sí solo. Finalmente, las *psitacofulvinas* son un pigmento presente únicamente al orden de los psitaciformes (que incluyen loros, cacaúas, loris y loritos) de esos colores rojos, naranjas y amarillos que poseen y que las hace ser el grupo de aves con los plumajes más coloridos y vistosos [31, 41]. Al igual que la melanina y porfirina esta pigmentación es sintetizada por el propio individuo y formada directamente en la queratización de la pluma. Estos dos tipos de pigmentación a veces son confundidas con colores producidos por melaninas y carotenoides. Sin embargo, al contrario que la melanina o carotenoides, las porfirinas y psitacofulvinas

son fluorescentes, resultando en colores magenta al ser iluminados por luz ultravioleta [31, 41], resultando en un aumento significativo del brillo aparente de las plumas.



Figura 3.4: Ejemplos de coloración basados en pigmentación. **Izquierda:** Imagen de un búho real, donde el color de su plumaje está principalmente basado en pigmentos de melanina. **Centro:** Imagen de un macho de reinita gorginaranja, donde se puede observar una pigmentación basada en carotenos en plumas de la cabeza y pecho, produciendo un color amarillento. **Izquierda:** Imagen de un turaco crestirojo, en donde el color de las plumas verdes de su cuerpo es producido por una pigmentación basada en porfirinas. Imágenes obtenidas de [5].

3.3.2. Coloración estructural

La coloración estructural de las plumas de las aves es causada por los fenómenos de dispersión o interferencia de la luz al interactuar con la estructura nanoscópica de la pluma, que actúa como un cristal fotónico de origen natural [42].

La coloración estructural no depende de la absorción, sino en cómo la estructura de la pluma dispersa determinadas longitudes de onda. Así, dependiendo del tamaño y ordenación de las placas de queratina, los melanosomas, o las burbujas de aire embebidas en la queratina, se producirán tonos blancos o azules, o aspecto metálico o iridiscente¹ [32, 33, 36].

La coloración estructural se divide comúnmente en dos categorías: *los colores estructurales no-iridiscentes* y *los colores estructurales iridiscentes*. Los primeros se producen en las barbas de las plumas, como por ejemplo, las plumas azules de los loros, y los colores estructurales iridiscentes de las plumas de colibrís y pavos reales por ejemplo, que son producidos por la nano-estructura de los bábulos [31].

Coloración estructural no-iridiscente Hay dos clases de producción de coloración estructural difusa en las plumas; La primera es producida por queratina no estructurada y sin pigmentación, que produce blanco debido a la dispersión incoherente de todas las

¹La iridiscencia es un fenómeno óptico caracterizado por el comportamiento angular de la cromaticidad de una superficie.

ondas de luz incidentes, generalmente, por vacuolas de aire uniformemente distribuidas en la pluma. La segunda clase se produce por estructuras de queratina especializadas en las barbas, que crean una matriz pseudo-ordenada de queratina y burbujas de aire, conocida como capa esponjosa. En este caso, la coloración estructural de las barbas incluye tonos no-iridiscentes de azul, violeta y UV [33].

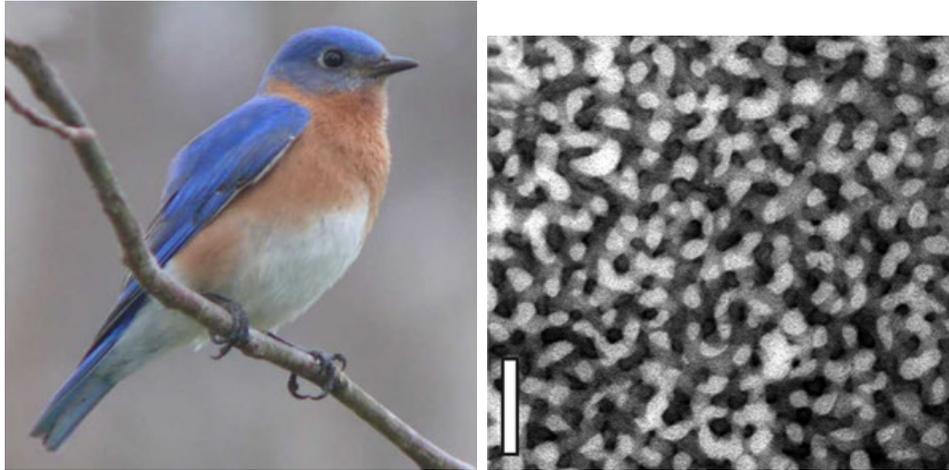


Figura 3.5: Coloración estructural azul difusa en un macho azulejo gorjicanelo (*S. Sialis*, Turdidae) **Izquierda:** Fotografía de un azulejo gorjicanelo. **Derecha:** Imagen TEM de la nanoestructura de las barbas de una pluma de contorno del azulejo gorjicanelo. La nanoestructura esta formada por una matriz pseudo-ordenada de β -queratina y burbujas aire produciendo un color estructural azul difuso en sus plumas. (Escala 500 nm). Imagen obtenida de [43].

Coloración estructural iridiscente La segunda clase de coloración estructural se produce en los bárbulos dando lugar a colores iridiscentes. Para producir colores iridiscentes, la pluma tiene que tener una estructura bien definida con una organización de componentes específica y ordenada con distintos índices de refracción. Los colores estructurales iridiscentes en las aves son generalmente producidos por matrices laminares o cristalinas de gránulos de melanina incrustadas en queratina. La luz se dispersa en las interfaces de estos materiales que difieren en índice de refracción [36]. Esta ordenación a escala nanoscópica produce un efecto denominado interferencia de capa fina (*thin-layer interference*), similar al que ocurre en las burbujas de jabón.

Coloración híbrida

Generalmente los pigmentos son responsables de la mayoría de colores no iridiscentes, sin embargo, algunos colores como azules, verdes y morados se crean por la estructura o en combinación de la estructura y los pigmentos. Por ejemplo, el color verde suele ser el resultado de la combinación de pigmentación amarillo con un color

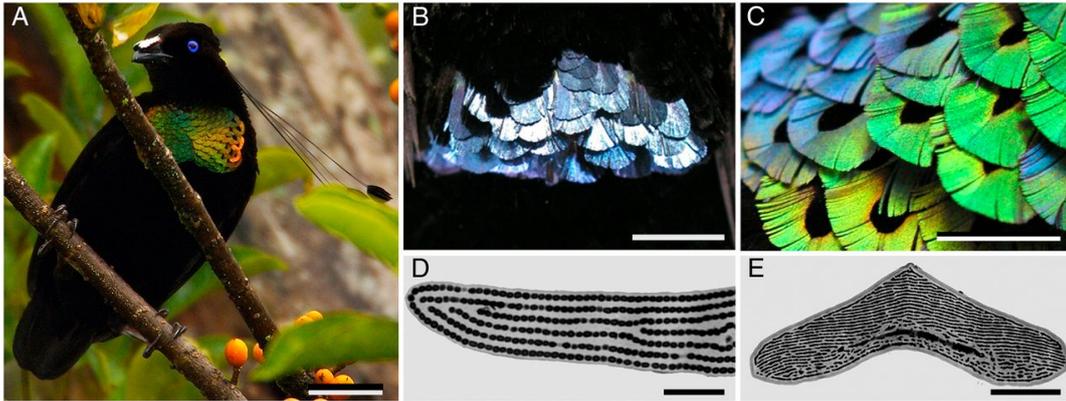


Figura 3.6: Iridiscencia en las plumas del cuello de un macho de ave del paraíso (*Lawes's Parotia*) utilizadas en funciones de cortejo. **A:** Visión general del ave. **B:** Fotografía del cuello, donde se puede ver como las plumas toman un color iridiscente de apariencia metálica. **C:** Cambiando el ángulo de visión e orientación, las plumas cambian de color drásticamente. **D:** Visión microscópica de la estructura interna de un bárbulo de una pluma de ave del paraíso, donde se muestra un arreglo extremadamente ordenado de gránulos de melanina. **E:** Vista de un corte transversal de un bárbulo de nuevo mostrando un arreglo extremadamente ordenado de gránulos de melanina. Imagen obtenida de [44].

estructural azul [38]. Además múltiples pigmentos también pueden ser combinados para crear otros como por ejemplo, rojo y amarillo para producir naranja, etc. Por último, la coloración estructural y/o pigmento en una parte de la pluma (barbas), y otra estructura o pigmentos en otra área (ej. bárbulos) cambia el resultado visto desde la distancia [6].

En cuanto a la distribución, la melanina está presente en todas las partes de la pluma exceptuando los ganchillos. Los colores no iridiscentes de melanina y carotenoides están presentes principalmente en el raquis y las barbas y a veces en los bárbulos. El cálamo no suele presentar ni melanina ni carotenoides y por tanto suele tener un color blanco o muy claro. Las finas estructuras necesarias para los colores iridiscentes están solo presente en los bárbulos [6].

Finalmente, los colores brillantes y llamativos suelen estar sólo en las partes visibles de las plumas de las aves y por tanto comunes en las plumas de contorno y de vuelo donde la parte de la pluma visible es mayormente penácea. En las partes de la pluma que no suelen estar a la vista y que comúnmente son plumáceas (como las semiplumas o el plumón) presentan colores más comunes como blanco, gris o marrón.

Capítulo 4

Modelado procedural de la geometría de las plumas

En este capítulo describimos el modelo procedural de generación de la geometría de plumas, sobre el cual aplicaremos nuestro modelo de apariencia. En primer lugar, se resumirá que partes de las plumas se modelaran, cómo y por qué, para posteriormente entrar en detalles de parametrización necesarios y la generación de la estructura más relevante; las barbas. Por último, se entrará en detalle de como se realiza la rasterización necesaria para el posterior renderizado y como se ha realizado la implementación de todo el proceso.

4.1. Modelado de la geometría de las plumas

El modelo está basado en trabajos previos de investigación en el modelado procedural de plumas que se basan en la idea de construir las distintas estructuras de la pluma mediante el uso de curvas de Bezier cúbicas¹. Éstas permiten la creación de formas curvilíneas complejas de manera simple [4, 7, 22].

El modelo diseñado se centra principalmente en la generación de plumas penáceas, puesto que como se ha comentado en el capítulo anterior, son las que resultan más interesantes en cuanto a diversidad de colores y patrones, y que además tienen una estructura mejor definida. Nuestro enfoque se puede dividir en 3 partes principales a modelar: Modelado del eje central, compuesto por el cálamo y el raquis; modelado de los vexilos a cada lado del raquis y por último, generación de las barbas. En la parte geométrica no se modelan los bárbulos ya que son de tamaño microscópico y por tanto se modelan de forma estadística en el modelo de apariencia.

¹Las curvas de Bezier son curvas paramétricas basadas en polinomios, que interpolan entre dos puntos de control con una tangente dada.

Cada una de estas partes se modela haciendo uso de curvas de Bezier. Primero, se modela el eje central que está compuesto por el cálamo y el raquis. Aunque sean partes diferenciadas en las plumas, la estructura en conjunto es la misma y por ello se modelan de manera conjunta. Tras esto se modelan los vexilos a ambos lados del raquis. Si bien el vexilo no es una estructura como tal, si no que es el conjunto de barbas lo que los forman, modelarlos permite obtener una visión general de la forma que tendrá la pluma lo que simplifica considerablemente la posterior generación de las barbas. Con esta visión general, se procede a modelar de forma automática las barbas a cada lado del raquis con las cuales ya tendremos definida la estructura geométrica de la pluma.

Parámetros Para modelar la geometría de la pluma definimos los siguientes parámetros:

- **Puntos de control del eje central** - cp_s : El eje central está compuesto por el raquis y el cálamo. Si bien se divide en dos partes, la estructura en conjunto es la misma. Para poder construir este eje, se deben definir los puntos de control de la curva de Bezier que definirán el eje. No hay un límite establecido en el número de puntos de control para modelar la curva, pero mínimo siempre serán dos, que definirán el inicio y final del eje.
- **Anchura del eje central** - r_{cb} y r_{ct} : El eje central de las plumas generalmente varía en grosor a lo largo de este. En las plumas, la parte del cálamo es la parte gruesa del eje y a medida que avanza el raquis se va estrechando hasta la punta del mismo. Por ello, se definen dos parámetros que describen la anchura al comienzo y final del eje. La anchura de todo el eje se computa mediante una interpolación lineal evaluando la curva de Bezier en un número de puntos determinado.
- **Longitud del cálamos** - c_l : Representa la longitud del cálamo en el eje central. La parte que no es cálamo es el raquis y por tanto basta con definir la longitud del cálamo, y el resto de la curva será la que constituya el raquis.
- **Puntos de control de los vexilos** - cp_{wl} y cp_{wr} : El vexilo de cada lado es una curva de Bezier con punto inicial y final igual al comienzo y fin del raquis, respectivamente. Por ello, sólo hay que definir los puntos de control intermedios para dar la curvatura deseada a los vexilos. Cada vexilo tiene sus puntos de control y se pueden definir cuántos sea necesario para dar la forma deseada al contorno de la pluma, lo que da la posibilidad de crear plumas de muy diversas formas.

- **Número de barbas** - N_b : Este parámetro es intuitivo y define el número de barbas que habrá en cada uno de los vexilos. La separación de estas se calcula a partir del número de barbas definido y la longitud del raquis.
- **Anchura de las barbas** - r_b : Define la anchura que tendrán cada una de las barbas. Por simplicidad, se asume que la anchura de las barbas es igual para cada una de ellas y en cada uno de los vexilos.
- **Ángulo de las barbas** - θ_{bl} y θ_{br} : Las barbas crecen desde el raquis con un ángulo determinado. θ_{bl} y θ_{br} permiten definir el ángulo que tomarán las barbas con respecto al punto desde dónde crecen del raquis para ambos lados de este, siendo θ_{bl} el correspondiente a las barbas del vexilo izquierdo y θ_{br} las del derecho.
- **Desplazamientos de los puntos de control de las barbas** - v_1, \dots, v_4 , que definen los puntos intermedios de la curva de Bezier de las barbas. Más detalles en la Sección 4.2.

4.2. Generación de las barbas

El proceso de creación de las barbas consiste en generar de forma automática un número de barbas N_b a cada lado del raquis. Como ya se ha mencionado, cada barba se corresponde a una curva de Bezier de orden cúbico, definida por 4 puntos de control $P_0..P_3$. Cada una de las barbas tiene la misma anchura r_b , que asumimos constante y separación a lo largo del raquis. Sin embargo, su forma varía respecto de la longitud de cada una de ellas.

Para generar las barbas, primero definimos su origen en el raquis P_0 , uniformemente distribuido en la curva que define el raquis. Después, calculamos el punto final P_3 , que corresponde con la intersección de la barba con el vexilo de su lado correspondiente. Para ello, trazamos una línea recta desde P_0 , con dirección definida por el ángulo θ_b respecto de la dirección tangente del raquis en P_0 .

Finalmente, calculamos los puntos intermedios utilizando una parametrización similar al usado por Walter y colegas [7], introduciendo los parámetros v_1, \dots, v_4 . Estos parámetros definen P_1 y P_2 como el desplazamiento horizontal y vertical respecto de P_0 y P_3 respectivamente, en coordenadas locales de la barba, como

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 + (v_1 * d * w) + (v_2 * d * w'), \\ P_2 &= P_0 + (d - v_3 * d * w) + (v_4 * d * w'), \end{aligned} \tag{4.1}$$

donde d es la distancia entre el punto P_0 y P_3 , w es la dirección entre P_0 y P_3 , y w' la tangente a ésta (ver Figura 4.1). Este proceso repetido en cada una de las barbas a

ambos lados del raquis, permite la creación de miles de ellas de forma automática con unos pocos parámetros.

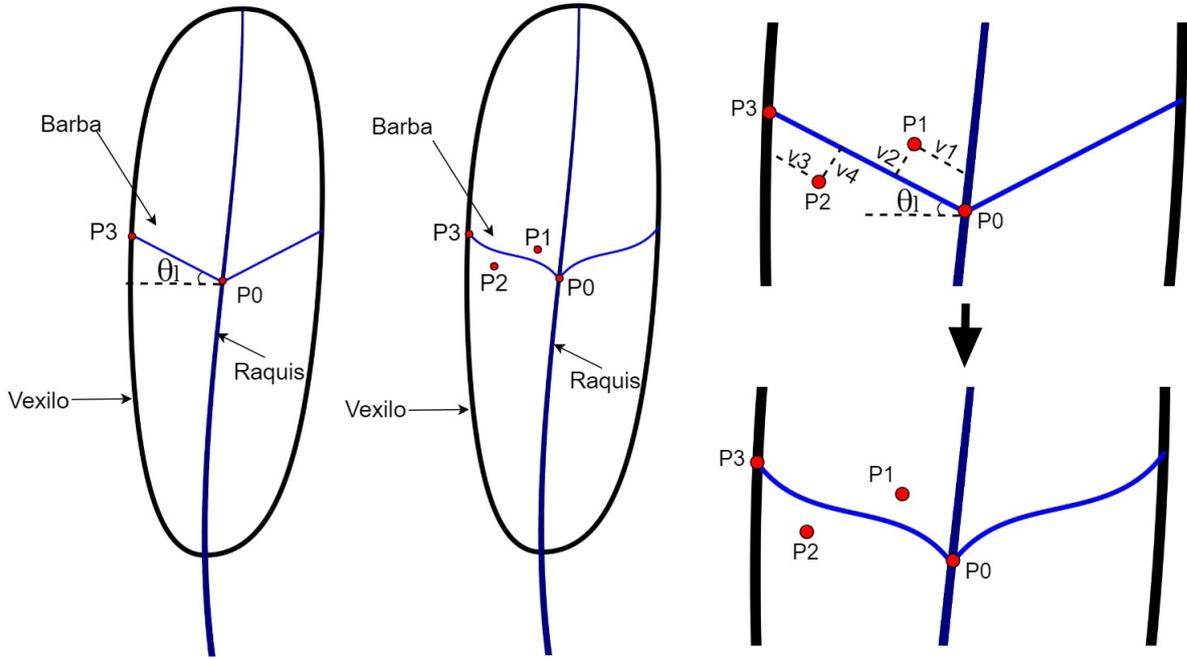


Figura 4.1: Visión esquemática modelado de las barbas. **Izquierda:** La barba inicialmente se traza como una recta entre el punto del raquis y el correspondiente en el vexilo con el ángulo dado. **Centro:** Añadiendo los puntos de control restantes se le da la forma deseada a la barba. **Derecha:** Visión ampliada del proceso de creación de las barbas explicado en detalle en la sección 4.2.

4.3. Rasterización de la geometría

Una vez computadas las barbas como splines, éstas podrían ser renderizadas como curvas explícitas, de la misma forma que p.ej. el pelo [12]. Sin embargo, para simplificar el manejo de geometría, y dada la estructura planar de las plumas, decidimos codificar dicha geometría en una textura (una imagen 2D), que se aplicará directamente sobre un plano representando la geometría de la pluma.

En esta sección describimos el proceso en el que rasterizamos en una textura la información necesaria para posteriormente evaluar la reflectancia de cada barba, a partir de las curvas generadas.

En la rasterización, sólo se representarán el eje central, compuesto por el cálamo y el raquis, y las barbas, ya que el modelado de los vexilos es una manera de simplificar la tarea de generación de las barbas para adquirir la forma global deseada. Como se ha comentado, el eje central va variando en anchura mediante una interpolación lineal entre los parámetros r_{cb} y r_{ct} . El procedimiento para dibujar el raquis consiste en

evaluar la curva de Bezier que lo representa en un número determinado de veces y trazar cada una a la anchura correspondiente en dicho punto. La representación de las barbas al ser de anchura constante fijada por el parámetro r_b consiste en trazar la curva de Bezier correspondiente con la anchura dada.

Además, en la rasterización utilizamos el color de representación de cada una de las partes para guardar información relevante que necesitaremos emplear en el renderizado de la pluma, utilizando el formato RGB para ello. En primer lugar, utilizamos el canal B como máscara de píxeles para poder diferenciar las partes que son de la pluma y las que no, y dentro de la pluma poder diferenciar entre barbas y eje central. Considerando cada canal de color en formato decimal, es decir, cada canal se representa con un número entre 0 y 1, guardamos $B = 0$ como píxel que no es de la pluma, $B = 0,5$ cuando se trata de un punto correspondiente al eje central y $B = 1$ cuando se corresponde con el de una barba. Por último, utilizamos el canal R y G para guardar información acerca del mapa de direcciones que tiene una barba en un punto determinado, lo que nos permitirá saber posteriormente la direccionalidad de cada una de ellas. En concreto, guardamos la dirección tangente de cada punto de la curva de Bezier rasterizado. Para ello, usamos los canales R y G de la textura para codificar las componentes del vector, normalizados en el rango $[0,1]$. La Figura 4.2 podemos ver un ejemplo del resultado que obtenemos tras aplicar todo el modelo.

4.4. Detalles de implementación

Nuestro modelo procedural se ha implementado en Python, utilizando librerías externas para facilitar las operaciones matemáticas. En concreto, se ha usado la librería *NumPy* [45] para la rasterización, y la librería *bezier* [46] para la construcción vectorial y evaluación de curvas de Bezier de forma sencilla.

Para facilitar la generación de plumas, parametrizamos cada una de ellas usando un fichero JSON definido por el usuario. Usamos JSON ya que permite la identificación directa de los parámetros en formato $\langle \text{clave}, \text{valor} \rangle$. Finalmente exportamos la textura resultante en formato jpeg. Actualmente, de cara a generar cada curva introducimos manualmente mediante puntos de control las curvas de Bezier sobre una imagen de la pluma objetivo. Automatizar esa tarea queda fuera del alcance de este proyecto.

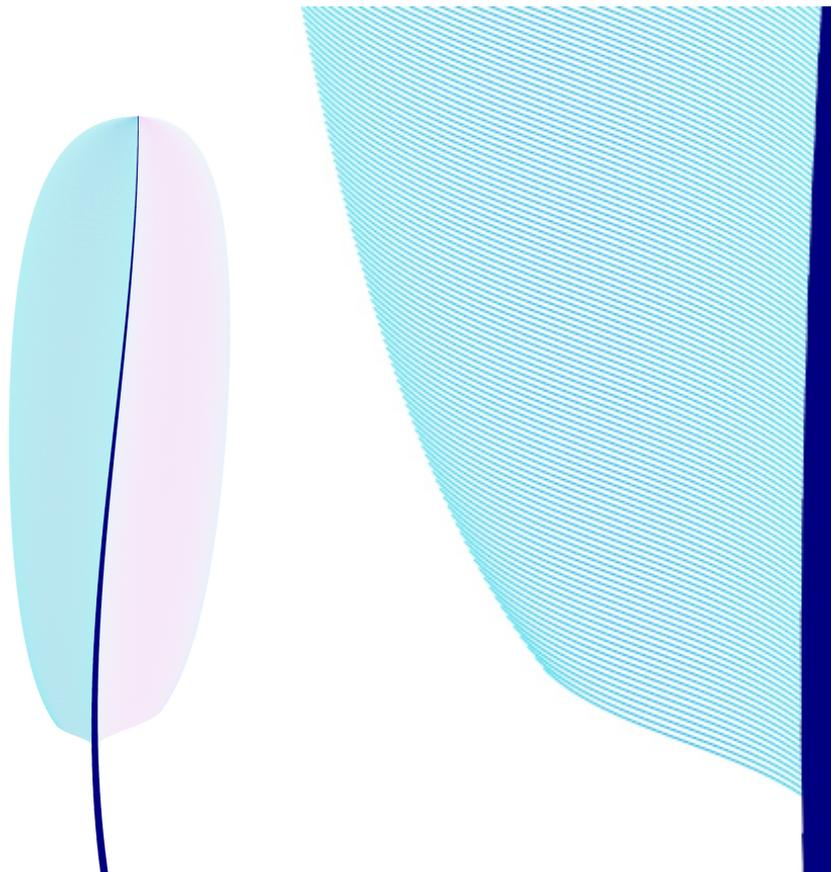


Figura 4.2: Resultado obtenido en la rasterización de una pluma. **Izquierda:** Vista completa de una pluma rasterizada. **Derecha:** Vista ampliada del véxilo izquierdo de la pluma rasterizada con el fin de mostrar el modelado de las barbas y como estas dan la forma a los vexilos.

Capítulo 5

Modelo de apariencia de plumas basado en física

En este capítulo se presenta el modelo físico desarrollado que permite simular la apariencia de plumas, resultante de las interacciones a diferentes escalas que tiene la luz con la superficie de estas. En primer lugar, se hará un breve repaso de los conceptos teóricos necesarios para entender el modelo desarrollado, para así proceder con la introducción y explicación en detalle del modelo, centrado en modelar la reflectancia y coloración de las plumas de forma estadística. Por último, se describirá la integración del modelo desarrollado en el motor de render basado en física MITSUBA [9].

5.1. Marco teórico

El renderizado basado en física se basa en simular el transporte de luz teniendo en cuenta las interacciones luz-materia a partir de principios físicos. La unidad básica que mide la cantidad de luz en un punto es la radiancia. En una superficie, la radiancia reflejada por la misma se modela siguiendo la *Ecuación de Render* [47], que define la radiancia saliente $L_o(x, w_o)$ de un punto x de una superficie en dirección w_o , como la suma de la radiancia emitida $L_e(x, w_o)$ y la radiancia reflejada por la superficie. En términos matemáticos esta ecuación se define como:

$$L_o(x, w_o) = L_e(x, w_o) + \int_{\Omega} L_i(x, w_i) f_r(x, w_i, w_o) |n \cdot w_i| dw_i, \quad (5.1)$$

donde el segundo sumando es la radiancia dispersada por la superficie, definida como la integral de la luz reflejada incidiendo desde toda la esfera de dimensiones Ω , con $L_i(x, w_i)$ la radiancia incidente al punto x desde la dirección w_i , $f_r(x, w_i, w_o)$ la función de distribución de dispersión bidireccional (*Bidirectional Scattering Distribution Function* o *BSDF*) que define la dispersión angular de la luz en la superficie, y con el producto escalar $|n \cdot w_i|$ entre w_i y la normal n en x , modelando la atenuación

geométrica (ley de Lambert).

Métodos de Monte Carlo La Ecuación de Render no tiene solución analítica. Por ello, esta ecuación se suele aproximar empleando métodos numéricos estocásticos de Monte Carlo. El algoritmo de Monte Carlo se basa en aproximar el valor de una integral de dimensión arbitraria mediando la contribución de un conjunto de muestras aleatorias del integrando. Así, el estimador de Monte Carlo de la Ecuación 5.1 es

$$L_o(x, w_o) \approx L_e(x, w_o) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{L_i(x, w_i) f_r(x, w_i, w_o) |n \cdot w_i|}{p(w_i)}, \quad (5.2)$$

con N el número de muestras, y $p(w_i)$ la función de densidad de probabilidad o pdf (*probability density function*) con la que las muestras w_i han sido generadas.

Bidirectional Scattering Distribution Function La BSDF modela la distribución angular de radiancia de una superficie respecto de una dirección incidente, y define la apariencia de la misma. En general, éstas modelan el comportamiento a escala microscópica de las interacciones luz-materia, abstrayendo la complejidad de la superficie en una función bidireccional. Para que una BSDF sea físicamente correcta debe cumplir dos principios básicos: El principio de conservación de la energía, por el cual la radiancia saliente debe ser igual o menor a la radiancia incidente, y el principio de reciprocidad de los rayos de luz por el cuál la evaluación de la dirección incidente y saliente en una BSDF puede invertirse sin verse afectado en el resultado.

En el marco de este trabajo, el objetivo es definir un modelo basado en física que permita determinar la apariencia de las plumas, es decir, construir una BSDF para plumas que defina cómo la luz es reflejada en las interacciones con la superficie de la pluma, y que abstraiga de forma paramétrica la complejidad de las interacciones con las estructuras a escala micro- y nanoscópica.

5.2. Nuestro modelo

Para construir un método genérico para el modelado de plumas hay que tener en cuenta las distintas estructuras de las plumas que contribuyen a la apariencia final de esta. Por un lado, está el eje central, compuesto por el cálamo, caracterizado por la ausencia de melanina y el raquis que como consecuencia del crecimiento de las barbas a ambos lados recibe cierta pigmentación. Sin embargo, y al no ser la estructura que más contribuye en la apariencia final de la pluma y por simplicidad, se asume una BSDF difusa.

Más interesante es la apariencia en los vexilos, resultante de las interacciones de la luz con barbas y bárbulos, y responsable fundamental de la apariencia y coloración de las plumas. En el resto del capítulo nos centramos en describir la BSDF que modela dicha apariencia, modelando de forma estadística tanto las barbas como los bárbulos.

Asunciones Para definir nuestro modelo, realizamos una serie de asunciones y simplificaciones:

- Tanto barbas como bárbulos se pueden representar como cilindros de queratina en los que ni el cortex ni los váculos de aire tienen relevancia en la dispersión de la luz.
- No existen oclusiones entre barbas y bárbulos, de modo que el efecto de cada uno es una función únicamente del porcentaje de área ocupada por cada uno.
- En el diferencial de superficie representado por la BSDF, podemos asumir que localmente las barbas, bárbulos distales, y bárbulos proximales, son respectivamente paralelos entre sí.
- El efecto de la difracción es insignificante, de modo que la dispersión se puede modelar como dispersión por cilindros usando óptica de rayos.

Nuestra BSDF Basado en las asunciones previas, modelamos la apariencia de las plumas utilizando una BSDF que combina la contribución de las barbas, los bárbulos distales, y los bárbulos proximales, como

$$\begin{aligned}
 f_r(x, w_i, w_o) = & w_b f_b(x, w_i, w_o) \\
 & + w_{bp} f_{bp}(x, w_i, w_o) + w_{bd} f_{bd}(x, w_i, w_o) \\
 & + w_t \delta(1 - w_i \cdot w_o),
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

donde f_b , f_{bp} , y f_{bd} modelan BSDFs locales de las barbas, y los bárbulos proximales y distales, respectivamente, y w_b , w_{bp} y w_{bd} el porcentaje de área ocupado por barbas y bárbulos, respectivamente. Nótese que este porcentaje de área debe cumplir que $w_b + w_{bp} + w_{bd} \leq 1$. Finalmente, el último sumando modela la luz que atraviesa la pluma sin interactuar con barbas o bárbulos, con $w_t = 1 - (w_b + w_{bp} + w_{bd})$ y δ la función delta de Dirac. Nótese que las direcciones w_i y w_o se encuentran definidas en el marco de referencia local del punto x .

Para implementar la BSDF de barbas y bárbulos, asumimos que en todos los casos los podemos aproximar por un conjunto de cilindros dieléctricos. Eso nos permite modelar su dispersión utilizando modelos existentes de dispersión en fibras como pelo o

ropa; las denominadas *bidirectional curve scattering distribution function*, o BCSDFs. Así, para calcular la dispersión en una barba, primero definimos un cilindro orientado en la dirección de la barba, siguiendo la dirección tangente local de la misma $\omega_b(x)$ (ver Capítulo 4 para detalles), y utilizamos la función de dispersión del cilindro para calcular la dispersión de la misma $S(\theta_i, \theta_o, \phi)$, definida por los ángulos longitudinales respecto de la dirección de la fibra θ_i y θ_o , con $\theta_i = \arccos(\omega_b(x) \cdot w_i)$, y ϕ el ángulo diferencia entre w_i y w_o en el marco de referencia de la barba $\phi = \angle_{\omega_b(x)}(w_i, w_o)$. Por tanto, la BSDF de la barba tiene forma

$$f_b(x, w_i, w_o) = S(\arccos(\omega_b(x) \cdot w_i), \arccos(\omega_b(x) \cdot w_o), \angle_{\omega_b(x)}(w_i, w_o)). \quad (5.4)$$

Análogamente computamos f_{bp} y f_{bd} para las direcciones de los bárbulos proximales y distales $\omega_{bp}(x)$ y $\omega_{bd}(x)$ respectivamente. Cada uno de estos cilindros está parametrizado por el índice de refracción η de la queratina, por la cantidad de pigmentación definida por el coeficiente de absorción espectral $\sigma_a(\lambda)$, y por la rugosidad del cilindro definida por el parámetro β . En la siguiente subsección describimos el modelo de dispersión en cilindros utilizado.

5.2.1. Modelo de cilindros dieléctricos

Teniendo en cuenta el extenso trabajo previo realizado en el modelado de pelo y pelaje basado en física, y considerando que las barbas/bárbulos son otra estructura epidérmica con forma similar a las fibras de pelo humano y animal se ha seguido un enfoque basado en estos métodos, que asumen cada fibra como un cilindro dieléctrico con superficie rugosa. En concreto, nos basamos en la versión del modelo propuesto por Chiang *et al.* [13] que teóricamente es muy similar a otros propuestos anteriormente [12], pero orientado a una mejor parametrización y eficiencia del modelo para facilitar su uso en render.

Modelo de reflectancia El modelo se basa en calcular la dispersión separando por un lado la reflectancia en el plano longitudinal, es decir, usando una vista lateral de la fibra y la reflectancia en el plano azimutal, usando la vista transversal (plano normal) de la fibra. La luz incidente que llega a la superficie de la fibra puede ser dispersada una o más veces en su interior antes de abandonarla según su índice de refracción η . Usamos p para definir el número de caminos que la luz toma dentro de la fibra antes de ser dispersada de vuelta al medio natural.

Consideraremos cuatro posibles caminos principales, calculando los de mayor orden como una contribución estadística global. Estos caminos se denotan como $p \in \{R = 0, TT = 1, TRT = 2, TRRT = 3, \dots\}$. Siendo R una reflexión singular, TT dos

transmisiones, es decir, se refracta al llegar a la superficie de la fibra y vuelve a salir al incidir por el otro lado, TRT igual a transmisión luego reflexión y de nuevo transmisión, $TRRT$ transmisión, doble reflexión y de nuevo transmisión, etc. En la Figura 5.1 se muestra una visión esquemática de estos caminos.

De esta forma, la función de reflectancia $S(\theta_i, \theta_o, \phi)$, se computa como una suma de la contribución de todos los caminos que la luz puede recorrer dentro del cilindro dieléctrico antes de salir, como

$$S(\theta_i, \theta_o, \phi) = \sum_{p=0}^{\infty} S_p(\theta_i, \theta_o, \phi), \quad (5.5)$$

siendo S_p la contribución del camino p evaluado. Cada una de estas p contribuciones es factorizada en una función de dispersión longitudinal M_p y una función de dispersión azimutal N_p , tal que

$$S_p(\theta_i, \theta_o, \phi) = M_p(\theta_i, \theta_r) N_p(\theta_i, \theta_r, \phi). \quad (5.6)$$

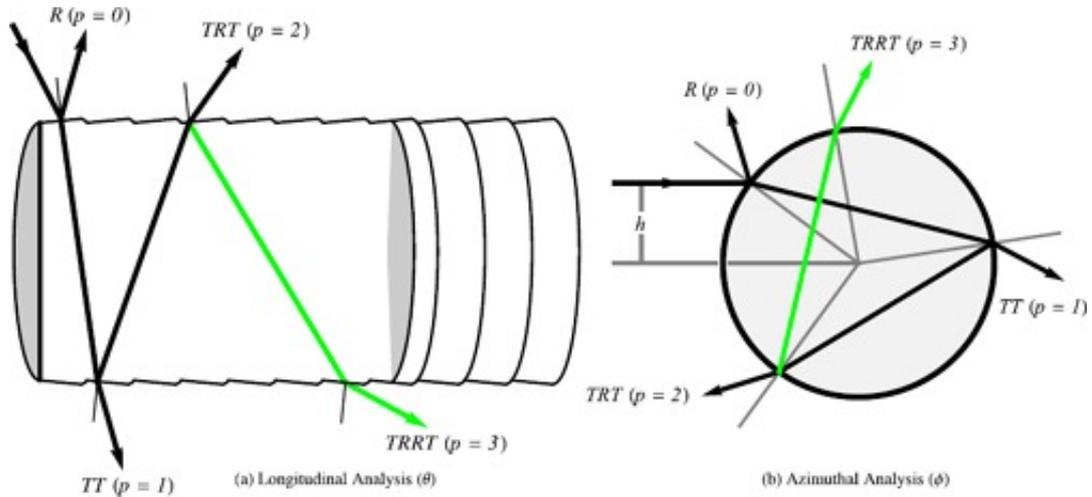


Figura 5.1: Visión esquemática de la posibilidad de caminos que toma la luz al interactuar con la superficie de una fibra. (a): Visión longitudinal de la fibra. (b): Visión azimutal de la fibra. Imagen obtenida de [12].

Dispersión Longitudinal La dispersión longitudinal es la responsable del lóbulo especular a lo largo de la longitud de la fibra y la rugosidad longitudinal, la cuál denotamos por β_m que controla el tamaño de la reflexión. Siguiendo el enfoque propuesto por [12] y [13] modelamos M_p tal que:

$$M_p(v, \theta_i, \theta_r) = \frac{\cosh(1/v)}{2v} e^{\frac{\sin(-\theta_i)\sin\theta_o}{v}} I_o\left[\frac{\cos(-\theta_i)\cos\theta_r}{v}\right], \quad (5.7)$$

dónde, $v = \beta_m^2$ es la varianza de la rugosidad y $I_o(x)$ es la función de Bessel modificada del primer tipo.

Dispersión Azimutal La dispersión azimutal evalúa la reflectancia de la fibra sobre la anchura de esta. Este comportamiento es muy variable y difícil de capturar por no conocer el punto exacto donde la luz intersecta en la visión azimutal de la fibra, por lo que se calcula como una integración uniforme sobre el ancho de la fibra tal que:

$$N_p(\phi) = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 A_p(h) D_p(\phi - \Phi(p, h)) dh, \quad (5.8)$$

dónde, $h \in [-1, 1]$ describe el desplazamiento (offset) dónde la luz incide en el eje de la fibra. A es el término de atenuación producido por la absorción de los pigmentos en la fibra, Φ es el azimut saliente asumiendo una superficie idílica lisa y D es un *detector Gaussiano* que tiene en cuenta la rugosidad de la superficie.

El término Φ se calcula como $\Phi(p, h) = 2p\gamma_t - 2\gamma_i + p\pi$, siendo $\gamma_t = \arcsin(h)$ y $\gamma_i = \arcsin(\frac{h}{\eta'})$, dónde η' es el índice de refracción modificado de la fibra para considerarlo en el plano normal $\eta' = \frac{\sqrt{\eta^2 - \sin^2\theta_o}}{\cos\theta_o}$.

Atenuación de los caminos El término A_p en la ecuación 5.8 describe cuanta de la luz incidente es afectada por cada una de las dispersiones de los caminos p . Incorpora dos efectos modelados con las ecuaciones de Fresnel, que son la reflexión y la transmisión/refracción de la luz en los límites entre la superficie de la fibra y el medio en el que se encuentra. Esta absorción es lo que le dará color a la fibra y es causada por el coeficiente de absorción espectral σ_a . Para $p = 0$, es un caso especial ya que la luz se refleja directamente en la superficie de la pluma y se puede calcular mediante una reflexión de Fresnel con el ángulo medio

$$A(0, h) = F(\eta, \frac{1}{2} \arccos(w_i \cdot w_r)). \quad (5.9)$$

Para el resto de términos $p > 0$ se obtienen como

$$A(p, h) = (1 - f)^2 f^{p-1} T^p. \quad (5.10)$$

dónde f y T son los factores de Fresnel y transmitancia respectivamente.

5.3. Integración del modelo en Mitsuba

El modelo desarrollado ha sido integrado en el motor de renderizado Mitsuba (detalles en el Anexo A). Para ello, se creará un nuevo plugin que permita calcular

la BSDF de la pluma, siguiendo el modelo de la clase abstracta que ofrece. La implementación del modelo se corresponde con la explicada en la sección anterior teniendo en cuenta algunas decisiones de diseño y simplificaciones adoptadas.

5.3.1. Decisiones de diseño

En primer lugar, en el software para el modelado procedural de la geometría de las plumas el resultado obtenido es una imagen que contiene la pluma rasterizada que se pretende renderizar. En esa rasterización, tenemos almacenada toda la información relativa a la estructura de una pluma. De esta forma, no es necesario definir ninguna estructura geométrica adicional para modelar una pluma, si no que esta imagen se cargará en forma de textura sobre una geometría rectangular de dimensiones definidas por la relación de resolución de la pluma rasterizada. De esta forma, nuestra pluma será renderizada sobre el rectángulo, el motivo es obvio, y es que la rasterización de la pluma produce una imagen rectangular.

Otra decisión de diseño importante, es la forma en la que daremos color a las plumas. Como se ha explicado anteriormente, las plumas además de ofrecer una gran variedad de colores y por distintos mecanismos de coloración, una pluma individual puede tener un patrón y gamas de colores a lo largo de ella. Por ello, se han decidido utilizar varias formas distintas de establecer el color general que queremos adquirir.

En primer lugar, siguiendo el modelo de fibras dieléctricas, la forma físicamente más correcta es definir el color a partir de las concentraciones de eumelanina y feomelanina, obteniendo la absorción espectral que estos tipos de pigmentación producen y que es bien conocida la forma de calcularla en el pelo de los mamíferos. Sin embargo, como las barbas y bárbulos de las plumas contienen otros tipos de pigmentos y coloraciones imposibles de obtener a partir de melanina, con el fin de obtener plumas de estos colores se ha introducido el mecanismo propuesto por Chiang *et al.* en [13] por el cuál a partir de un color en formato RGB obtiene una simulación del coeficiente de absorción espectral que permite obtener de forma bastante precisa el color deseado.

Por último, para conseguir los patrones que poseen las plumas la última forma de obtener el color de las barbas es a partir de una imagen de una pluma real la cuál se usa como textura y con el mecanismo anterior se obtiene el coeficiente de absorción espectral que debe tomar la pluma en cada punto. Este será el método empleado para el renderizado de los resultados expuestos en la Sección 6.

5.3.2. Implementación del modelo

El motor de renderizado, obtiene la radiancia para cada píxel que compone una escena trazando rayos desde un sensor y calculando la reflectancia con los materiales con los que se encuentra. En el cálculo de nuestra BSDF, para cada punto en el que un rayo intersecta con el rectángulo que almacena la textura de la pluma extraeremos el color de la textura en formato RGB en ese punto y veremos de que parte de la pluma se trata. Como se ha explicado en la sección 4, el tipo de estructura en un píxel se puede diferenciar analizando el canal B de la textura, siendo $B = 0,0$ un punto que no pertenece a la pluma (se omite el punto), $B = 0,5$ un punto que pertenece al eje central de la pluma (BSDF difusa), y $B = 1,0$ un punto que corresponde a una barba (nuestro modelo).

Implementación estadística de las barbas El aspecto principal en la implementación del modelo, es cómo se define el modelo de cilindros dieléctricos sobre la textura que contiene la geometría de la pluma y que permite modelar cada barba de forma individual, con el marco de referencia local de cada barba codificado en las componentes R y G de la textura.

Computando la dispersión en el cilindro Para calcular la dispersión en cada cilindro, precomputamos algunos de los parámetros más costosos siguiendo la propuesta de Chiang *et al.*. Además, de cara a calcular la integral en la Ecuación 5.8 utilizamos integración por cuadratura para evitar introducir varianza adicional debido a un nuevo muestreo.

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo mostramos los resultados obtenidos de nuestro modelo con la implementación en el renderizador Mitsuba. Para el desarrollo de estos resultados, hemos escogido una serie de imágenes de plumas reales extraídas de "The Feather Atlas"[48], el cuál es como una base de datos dónde se pueden encontrar imágenes de plumas de vuelo reales junto con datos de relevancia de la mayoría de especies de aves de Norte América. Para cada una de ellas, primero se ha intentado replicar la forma de la estructura a través del software de modelado procedural para su posterior renderizado con el modelo físico desarrollado, con el fin de poder realizar una comparación entre la fotografía de la pluma real y la nuestra.

En la siguientes imágenes se presenta una comparación entre la pluma renderizada aplicando nuestro modelo (imagen **superior**) y la fotografía de la pluma real en las que están basadas (imagen **inferior**).



Figura 6.1: Pluma de cola de la especie Arrendajo de Steller (Stellers Jay, *Cyanocitta stelleri*) cuya coloración está basada principalmente en una coloración estructural azulada difusa.



Figura 6.2: Pluma de cola de la especie Urogallo Fuliginoso (Sooty Grouse, *Dengredagapus fuliginosus*) cuya coloración está basada en la combinación de melaninas.

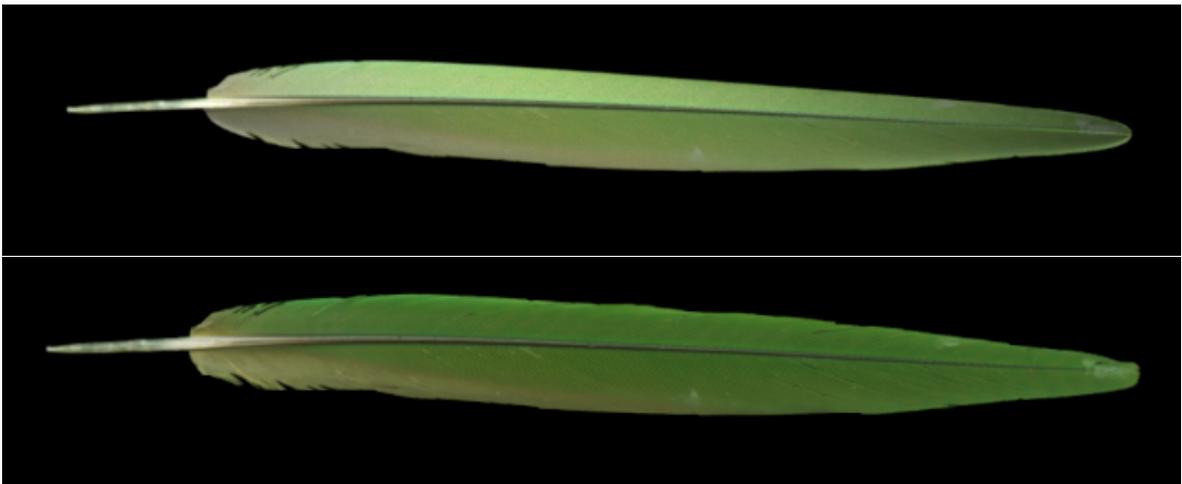


Figura 6.3: Pluma de cola de la especie Aratinga Verde, comúnmente conocida como Periquito Verde (*Psittacara holochlorus*), cuya coloración es el resultado de carotenos amarillos (de ahí que tenga un cierto toque amarillento) y coloración estructural difusa, dando como resultado una coloración verdosa.



Figura 6.4: Pluma primaria de vuelo de la especie Lechuza Norteña (Northern Saw-Whet Owl, *Aegolius acadicus*) cuya coloración está basada en la combinación de melaninas.

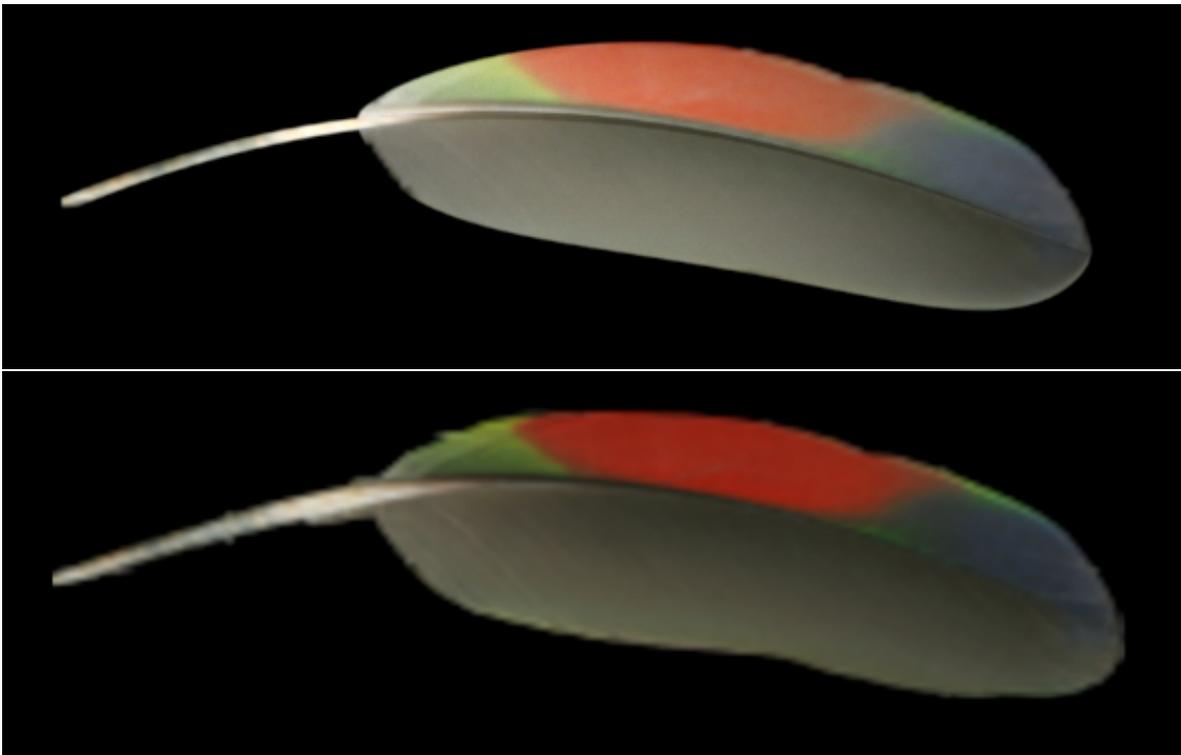


Figura 6.5: Pluma secundaria de vuelo de la especie Loro Tamaulipeco (Red-crowned Parrot, *Amazona viridigenalis*) en cuyas plumas podemos ver el resultado de la combinación de múltiples mecanismos de coloración, siendo la parte azulada producida por coloración estructural difusa, parte rojiza y verde por pigmentación basada en porfirinas y psitacofulvinas, y la parte grisácea producida por melaninas.

Por completitud, se añade un imagen de una vista ampliada renderizada con alta resolución que muestra la apariencia estadística de las barbas y bárbulos mediante el modelo de cilindros, así como una imagen que recoge las plumas renderizadas expuestas en este capítulo con una vista vertical de las plumas.



Figura 6.6: Vista ampliada del modelo de cilindros dieléctricos en la pluma renderizada de la figura 6.3 que modelan de forma estadística las barbas y bárbulos de las plumas.

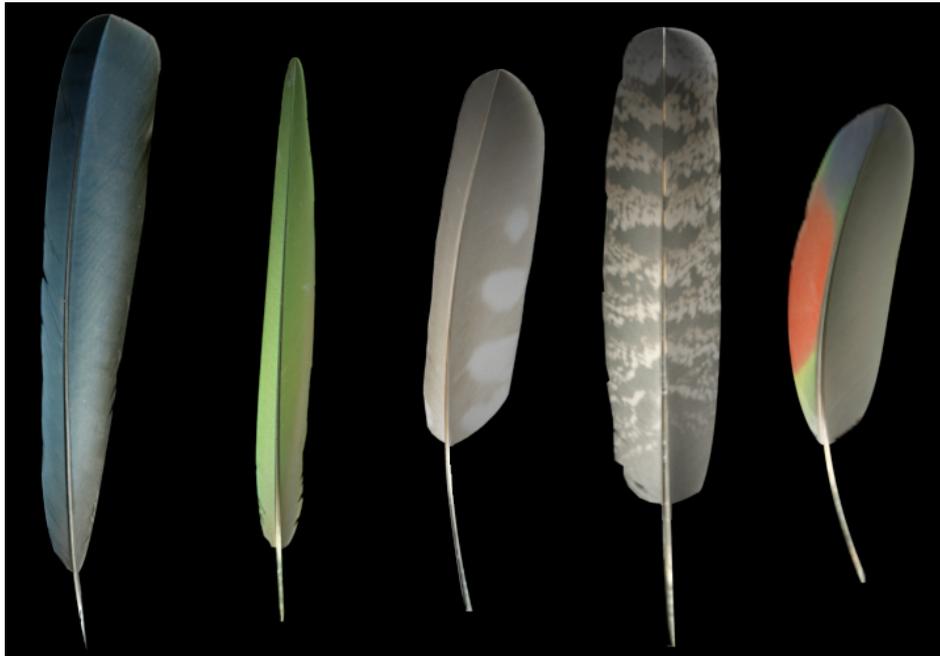


Figura 6.7: Vista vertical de las plumas renderizadas presentadas en este apartado.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se ha desarrollado un modelo basado en física para la apariencia de las plumas. Para ello, ha sido necesario un exhaustivo trabajo de investigación tanto en el campo de la ornitología como en el campo de desarrollo en informática gráfica. Además, se ha implementado un modelo procedural para el modelado de la estructura geométrica de estas estructuras y la integración del modelo dentro del motor de renderizado Mitsuba, con el que poder generar imágenes sintéticas de estas tan peculiares estructuras. Las imágenes renderizadas presentadas como resultados, dan un aspecto realista a las plumas, y pueden ser aplicadas a un conjunto amplio de plumas.

Trabajo Futuro y limitaciones El modelo desarrollado tiene sus limitaciones. En primer lugar, asumimos que barbas y bárbulos no se ocluyen entre ellos, lo que puede dar a una sobreestimación de la contribución de cada uno de ellos, especialmente en el caso de los bárbulos que en plumas reales se solapan formando una red. Otro aspecto a recalcar, es que no ha sido posible introducir irisdiscencia dentro del modelo de dispersión de cilindros, y sólo efectos no-direccionales se han incluido. En trabajo futuro será una de las metas principales a cubrir y pensamos que podría introducirse añadiendo una contribución estadística al color resultante siguiendo alguno de los enfoques presentados en la Sección 2 de materiales basados en difracción.

Además, se ha simplificado la tarea de incluir la coloración estructural difusa y otros pigmentos que no sean melaninas mediante la inclusión del método de Chiang *et al.*, calculando el color deseado de forma estadística. La exclusión de la coloración estructural limita parte del brillo resultante en este tipo de plumas. Pensamos que una forma simple de incluirla, podría ser añadiendo una componente difusa a la componente *TRT* descrita en la Sección 5.2.1.

7.1. Conclusiones personales

Este trabajo ha supuesto un gran reto personal, tanto a nivel de comprensión e investigación, cómo en el desarrollo informático en un motor de renderizado tan potente como Mitsuba. Escogí este área de conocimiento por que me pareció muy interesante, bien planteada y organizada la asignatura de Informática Gráfica y quería indagar más en el tema. De los temas que me propuso Adrián, decidí escoger el modelado de la apariencia de plumas por que desde pequeño me han llamado mucho la atención las aves rapaces y pensé que era una gran oportunidad para investigar más acerca del mundo aviar. Sin duda ha sido todo un descubrimiento el gran abanico de posibilidades y la complejidad de las plumas de estos animales siendo, sin duda, una de las estructuras epidérmicas más increíbles en el reino animal.

Considero que este trabajo indaga en la mayoría de los conocimientos técnicos desarrollados a lo largo de la carrera, tanto en la comprensión e investigación de nuevas áreas de conocimiento, la aplicación estadística, física y matemática con el fin de modelar la complejidad del mundo real y el desarrollo software en el desarrollo de una herramienta de prototipado (en Python) y la integración del modelo en un motor de renderizado (en C++).

Si algo me queda en claro, es que el mundo real que percibimos de manera tan simple con la vista, es mucho más complejo de lo que consideramos en el día a día, y el campo de la Informática Gráfica me parece un área de conocimiento muy interesante y con un sin fin de oportunidades de exploración e investigación.

7.2. Planificación temporal

Este proyecto se planificó para realizarse desde aproximadamente el inicio del segundo semestre del curso anterior (concretamente segunda quincena de Marzo) hasta la presentación el mismo en Septiembre, aunque por problemas personales del autor de este TFG, hubo que atrasar el plazo hasta la siguiente entrega en Noviembre.

Inicialmente, se identificaron las fases del trabajo a realizar de la siguiente manera:

1. Estudio del estado del arte en el modelado y renderizado de plumas de ave y modelos matemáticos de transporte de luz.
2. Estudio de la literatura en la estructura y propiedades ópticas de las plumas de ave.
3. Desarrollo de una herramienta de prototipado para plumas.

4. Desarrollo del modelo óptico-matemático para el modelado de la apariencia de plumas.
5. Integración del modelo desarrollado en Mitsuba.
6. Evaluación, pruebas y documentación.

En la práctica, si bien se establecieron los objetivos del TFG a principio de Marzo, debido a la carga de trabajo durante el semestre, se avanzó de forma muy pausada, limitando a asentar unas buenas bases para el trabajo y dedicando el tiempo a la investigación de las plumas, así como a la instalación y preparación del motor de renderizado Mitsuba. Con el fin del semestre en Mayo, se comenzó a recapitular toda la información extraída acerca de la estructura y propiedades ópticas de las plumas y se empezó con el trabajo de prototipado para el modelado geométrico de plumas. A finales de Junio se obtuvo una primera versión de la herramienta de prototipado, la cuál hubo que formatear en varias ocasiones. Mientras tanto, se comenzó a discutir como desarrollar el modelado de la apariencia de las plumas. Durante los dos siguientes meses no se avanzó demasiado por causas mayores y a finales de Agosto se decidió aplazar la entrega del TFG a la siguiente convocatoria. Desde entonces hasta la entrega del proyecto se ha dedicado al desarrollo e integración en Mitsuba del modelo para la apariencia de plumas, dedicando las últimas semanas a corrección de bugs, renderizado de los resultados y documentación de la memoria. En todas las fases del proyecto, excluyendo alguna semana puntual y el mes de Julio se ha realizado al menos una reunión semanal con el director del trabajo, donde se discutían los avances realizados y los próximos pasos a seguir. A continuación, se muestra el diagrama de Gantt del proyecto.

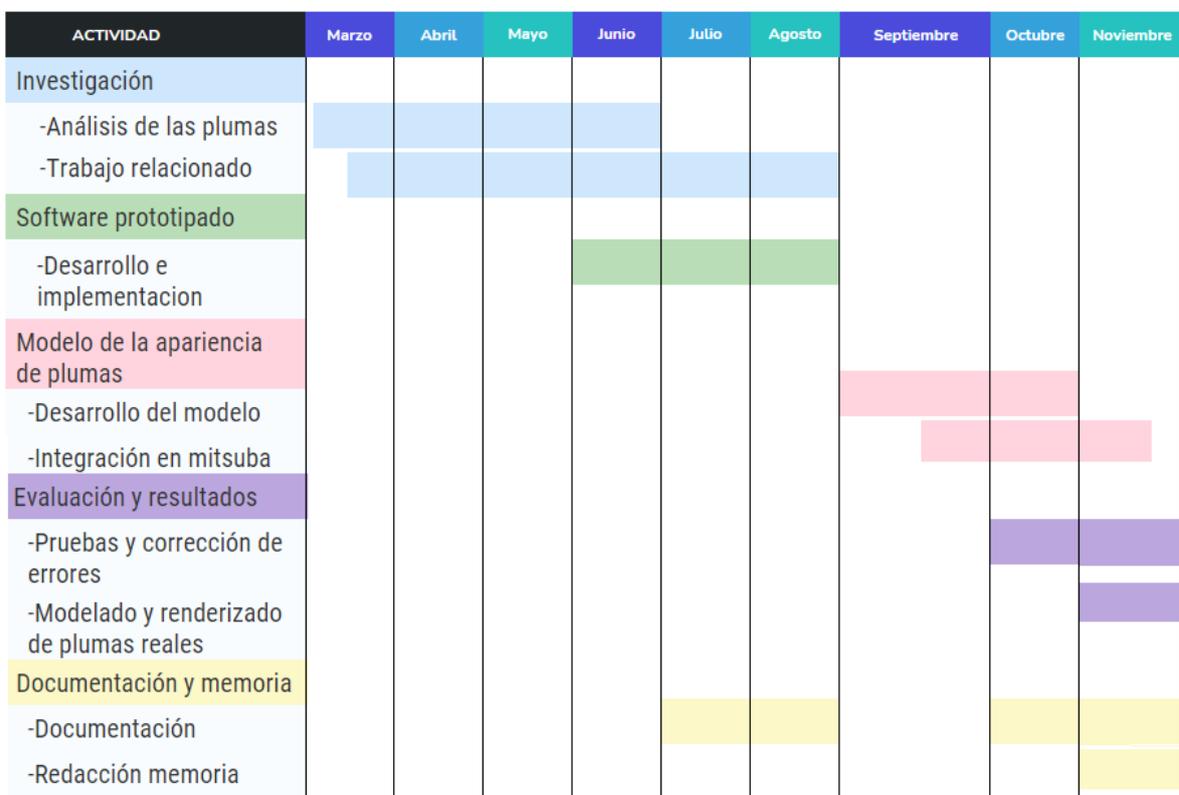


Figura 7.1: Cronograma del proyecto, con las fases y su desarrollo aproximado.

Capítulo 8

Bibliografía

- [1] Si Aves. Plumas de las aves. <https://es.avianreport.com/plumas-de-las-aves/>.
- [2] Biblioteca Digital. Plumas y plumajes. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/138/htm/sec_8.htm.
- [3] Gimena Gómez. Plumas de las aves, características, estructura y tipos. <https://aves.paradis-sphinx.com/temas/plumas-de-las-aves.htm>, 2018.
- [4] Yanyun Chen, Yingqing Xu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. Modeling and rendering of realistic feathers. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 21(3):630–636, 2002.
- [5] How birds make colorful feathers. <https://academy.allaboutbirds.org/how-birds-make-colorful-feathers/>, 2015.
- [6] Lisa Marie Streit. *Modelling of Feather Coat Morphogenesis for Computer Graphics*. PhD thesis, 2003.
- [7] Cristiano Franco and Marcelo Walter. Modeling and Rendering of Individual Feathers. *Brazilian Symposium of Computer Graphic and Image Processing*, 2002:293–299, 2002.
- [8] Jessica Baron and Eric Patterson. Procedurally Generating Biologically Driven Feathers. 11542:342–348, 2019.
- [9] Wenzel Jakob. Mitsuba renderer. <http://mitsuba-renderer.org/>, 2010.
- [10] Jessica Baron and Eric Patterson. Computer-Aided Visual Analysis of Feathers. 2021.

- [11] Todd Alan Harvey and Kimberly S. Bostwick y Steve Marschner. Directional reflectance and milli-scale feather morphology of the African Emerald Cuckoo, *Chrysococcyx cupreus*. *Journal of the Royal Society Interface*, 2013.
- [12] Eugene d’Eon, Guillaume François, Martin Hill, Joe Letteri, and Jean-Marie Aubry. An Energy-Conserving Hair Reflectance Model. *Computer Graphics Forum*, 30, 2011.
- [13] Matt Jen-Yuan Chiang, Benedikt Bitterli, Chuck Tappan, and Brent Burley. A Practical and Controllable Hair and Fur Model for Production Path Tracing. 35(2), 2015.
- [14] Matt Pharr. 01 the implementation of a hair scattering model. 2016.
- [15] Ling-Qi Yan, Henrik Wann Jensen, and Ravi Ramamoorthi. An Efficient and Practical near and Far Field Fur Reflectance Model. *ACM Trans. Graph.*, 36(4), 2017.
- [16] Iman Sadeghi, Oleg Bisker, Joachim De Deken, and Henrik Wann Jensen. A Practical Microcylinder Appearance Model for Cloth Rendering. *ACM Trans. Graph.*, 32(2), April 2013.
- [17] Tom Cuypers, Tom Haber, Philippe Bekaert, Se Baek Oh, and Ramesh Raskar. Reflectance Model for Diffraction. *ACM Trans. Graph.*, 31(5), 2012.
- [18] Ibón Guillén, Julio Marco, Diego Gutierrez, Wenzel Jakob, and Adrian Jarabo. A General Framework for Pearlescent Materials. *ACM Transactions on Graphics*, 39(6), 2020.
- [19] Laurent Belcour and Pascal Barla. A Practical Extension to Microfacet Theory for the Modeling of Varying Iridescence. *ACM Transactions on Graphics*, 36(4), 2017.
- [20] Mya Thompson. Everything you need to know about feathers. <https://academy.allaboutbirds.org/feathers-article/>, 2004.
- [21] Yanhong Pan, Wenxia Zheng, Roger H. Sawyer, Michael W. Pennington, Xiaoting Zheng, Xiaoli Wang, Min Wang, Liang Hu, Jingmai Connor, Tao Zhao, Zhiheng Li, Elena R. Schroeter, Feixiang Wu, Xing Xu, Zhonghe Zhou, and Mary H. Schweitzer. The molecular evolution of feathers with direct evidence from fossils. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(8):3018–3023, 2019.

- [22] Lisa Marie Streit and W. Heidrich. A Biologically-Parametrized Feather Model. 21(3), 2002.
- [23] A Ennos, J Hickson, and ANNA Roberts. Functional morphology of the vanes of the flight feathers of the pigeon columba livia. *The Journal of experimental biology*, 198(5):1219–1228, 1995.
- [24] Arie M Rijke and William A Jesser. The water penetration and repellency of feathers revisited. *The Condor*, 113(2):245–254, 2011.
- [25] Peter L Pap, Gergely Osvath, Krisztina Sandor, Orsolya Vincze, Lőrinc Bărbos, Attila Marton, Robert L Nudds, and Csongor I Vagasi. Interspecific variation in the structural properties of flight feathers in birds indicates adaptation to flight requirements and habitat. *Functional Ecology*, 29(6):746–757, 2015.
- [26] Devi Stuart-Fox, Elizabeth Newton, Raoul A Mulder, Liliana D’Alba, Matthew D Shawkey, and Branislav Igic. The microstructure of white feathers predicts their visible and near-infrared reflectance properties. *PloS one*, 13(7):e0199129, 2018.
- [27] Rafael Maia, Liliana D’Alba, and Matthew D Shawkey. What makes a feather shine? a nanostructural basis for glossy black colours in feathers. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1714):1973–1980, 2011.
- [28] Tipos de plumas en las aves. <http://entrepinosysembrados.blogspot.com/2014/11/tipos-de-plumas-en-las-aves.html>.
- [29] Tarah N. Sullivan, Bin Wang, Horacio D. Espinosa, and Marc A. Meyers. Extreme lightweight structures: avian feathers and bones. *Materials Today*, 20(7):377–391, 2017.
- [30] Geoffrey E Hill, Geoffrey Edward Hill, Kevin J McGraw, J Kevin, et al. *Bird coloration: mechanisms and measurements*, volume 1. Harvard University Press, 2006.
- [31] R. Riedler, C. Pesme, J. Druzik, M. Gleeson, and E. Pearlstein. A review of color-producing mechanisms in feathers and their influence on preventive conservation strategies. *Journal of the American Institute for Conservation*, 53(1):44–65, 2014.
- [32] Clyde W. Mason. Structural colors in feathers i. 1922.
- [33] Richard O. Prum. The anatomy and physics of avian structural colours. 1999.

- [34] Alejandra Piro. El color en las plumas. http://descubriendo.fisica.unlp.edu.ar/descubriendo/index.php/El_color_en_las_plumas.
- [35] Liliana D'Alba, Caroline Van Hemert, Karen A. Spencer, Britt J. Heidinger, Lisa Gill, Neil P. Evans, Pat Monaghan, Colleen M. Handel, and Matthew D. Shawkey. Melanin-based color of plumage: Role of condition and of feather´s microstructure. *Society for Integrative and Comparative Biology*, 54(4):633–644, 2014.
- [36] Shawkey MD and D´Alba. Interactions between colour-producing mechanisms and their effects on the integumentary colour palette. 2017.
- [37] Lorenzo Pérez-Rodríguez. Expresión y función del color del plumaje. primera parte: Melaninas. 2010.
- [38] Maria M. Mendes-Pinto, Amy M. LaFountain, Mary Caswell Stoddard, Richard O. Prum, and Harry A. Frank y Bruno Robert. Variation in carotenoid–protein interaction in bird feathers produces novel plumage coloration. 2012.
- [39] N.Walsh, J.Dale, K.J. McGraw, M.A. Pointer, and N.I. Mundy. Candidate genes for carotenoid coloration in vertebrates and their expression profiles in the carotenoid-containing plumage and bill of a wild bird. 2011.
- [40] Lorenzo Pérez-Rodríguez. Expresión y función del color del plumaje. segunda parte: Carotenoides. 2011.
- [41] Lorenzo Pérez-Rodríguez. Expresión y función del color del plumaje. cuarta parte: Porfirinas. 2011.
- [42] Freyer P, Wilts BD, and Stavenga DG. Reflections on iridescent neck and breast feathers of the peacock, pavo cristatus. 2018.
- [43] Vinod Saranathan, Jason Forster, Heeso Noh, Seng Fatt Liew, Simon Mochrie, Hui Cao, Eric Dufresne, and Richard Prum. Structure and optical function of amorphous photonic nanostructures from avian feather barbs: A comparative small angle x-ray scattering (saxs) analysis of 230 bird species. *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, 9:2563–80, 05 2012.
- [44] Bodo D. Wilts, Kristel Michielsen, Hans De Raedt, and Doekele G. Stavenga. Sparkling feather reflections of a bird-of-paradise explained by finite-difference time-domain modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(12):4363–4368, 2014.

- [45] Numpy: The fundamental package for scientific computing with python. <https://numpy.org/>.
- [46] Bezier: Helper for bézier curves, triangles, and higher order objects. <https://bezier.readthedocs.io/>.
- [47] James T. Kajiya. The Rendering Equation. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 20(4):143–150, August 1986.
- [48] The Feather Atlas. <https://www.fws.gov/lab/featheratlas/>.
- [49] Doekele G. Stavenga, Hein L. Leertouwer, Daniel C. Osorio, and Bodo D Wilts. High refractive index of melanin in shiny occipital feathers of a bird of paradise. 2015.
- [50] Doekele G. Stavenga, Hein L. Leertouwer, N. Justin Marshall, and Daniel Osorio. Dramatic colour changes in a bird of paradise caused by uniquely structured breast feather barbules. 278:2098–2104, 2010.
- [51] Lorenzo Pérez-Rodríguez. Expresión y función del color del plumaje. tercera parte: Colores estructurales. 2011.
- [52] Dakota E. McCoy, Allison J. Shultz, Charles Vidoudez, Emma van der Heide, Jacqueline E. Dall, and Sunia A. Trauger y David Haig1. Microstructures amplify carotenoid plumage signals in tanagers. 2021.
- [53] Kate St. John. Anatomy: Parts of a feather. <https://www.birdsoutsidemywindow.org/2010/07/02/anatomy-parts-of-a-feather/>, 2010.
- [54] Miguel Barral. El secreto del colorido plumaje de las aves. <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/biociencias/el-secreto-del-colorido-plumaje-de-las-aves/>, 2018.
- [55] Python. <https://www.python.org/>.

Lista de Figuras

1.1.	Visión de la gran diversidad de colorido en el reino aviar. Fuente: [5] . . .	2
3.1.	Estructura y partes de una pluma. Izquierda Vista esquemática de una pluma de contorno, con cada una de las partes. Fuente [28]. Derecha Vista a múltiples escalas de una pluma de vuelo real: Mientras que la pluma está en el orden del centímetro, las barbas son estructuras de unas decenas de micras de diámetro que se ramifican en centenas de bárbulos de tamaño microscópico. Fuente [29].	8
3.2.	Clasificación taxonómica de las plumas. De izquierda a derecha podemos ver una visión general de ellas: Pluma de vuelo del ala, plumón, pluma de vuelo de la cola, pluma de contorno, semipluma, cerda y filopluma. Fuente [20].	9
3.3.	Tipos de coloración. Izquierda: Visión esquemática de la microestructura de una pluma pigmentada. Las longitudes de onda exceptuando la roja son absorbidas por los gránulos pigmentarios situados en la matriz de queratina. Centro: Visión esquemática de la microestructura de una pluma basada en coloración estructural difusa. El color azul es producido por la dispersión de la luz producida por la estructura interna de las barbas, los colores restantes son absorbidos por una capa de melanina. Derecha: Visión esquemática de la microestructura de una pluma basada en coloración estructural iridiscente. Las plumas cambian de color con diferentes ángulos de visión, efecto causado por arreglos complejos en la nano-estructura interna de los bárbulos de la pluma. Imágenes obtenidas de: [5]	10

3.4.	Ejemplos de coloración basados en pigmentación. Izquierda: Imagen de un búho real, donde el color de su plumaje está principalmente basado en pigmentos de melanina. Centro: Imagen de un macho de reinita gorginaranja, donde se puede observar una pigmentación basada en carotenos en plumas de la cabeza y pecho, produciendo un color amarillento. Izquierda: Imagen de un turaco crestirojo, en donde el color de las plumas verdes de su cuerpo es producido por una pigmentación basada en porfirinas. Imágenes obtenidas de [5].	12
3.5.	Coloración estructural azul difusa en un macho azulejo gorjicanelo (<i>S. Sialis</i> , Turdidae) Izquierda: Fotografía de un azulejo gorjicanelo. Derecha: Imagen TEM de la nanoestructura de las barbas de una pluma de contorno del azulejo gorjicanelo. La nanoestructura esta formada por una matriz pseudo-ordenada de β -queratina y burbujas aire produciendo un color estructural azul difuso en sus plumas. (Escala 500 nm). Imagen obtenida de [43].	13
3.6.	Iridiscencia en las plumas del cuello de un macho de ave del paraíso (<i>Lawes's Parotia</i>) utilizadas en funciones de cortejo. A: Visión general del ave. B: Fotografía del cuello, dónde se puede ver como las plumas toman un color iridiscente de apariencia metálica. C: Cambiando el ángulo de visión e orientación, las plumas cambian de color drásticamente. D: Visión microscópica de la estructura interna de un bárbulo de una pluma de ave del paraíso, donde se muestra un arreglo extremadamente ordenado de gránulos de melanina. E: Vista de un corte transversal de un bárbulo de nuevo mostrando un arreglo extremadamente ordenado de gránulos de melanina. Imagen obtenida de [44].	14
4.1.	Visión esquemática modelado de las barbas. Izquierda: La barba inicialmente se traza como una recta entre el punto del raquis y el correspondiente en el vexilo con el ángulo dado. Centro: Añadiendo los puntos de control restantes se le da la forma deseada a la barba. Derecha: Visión ampliada del proceso de creación de las barbas explicado en detalle en la sección 4.2.	18
4.2.	Resultado obtenido en la rasterización de una pluma. Izquierda: Vista completa de una pluma rasterizada. Derecha: Vista ampliada del véxilo izquierdo de la pluma rasterizada con el fin de mostrar el modelado de las barbas y como estas dan la forma a los vexilos.	20

5.1. Visión esquemática de la posibilidad de caminos que toma la luz al interactuar con la superficie de una fibra. (a) : Visión longitudinal de la fibra. (b) : Visión azimutal de la fibra. Imagen obtenida de [12]. . . .	25
6.1. Pluma de cola de la especie Arrendajo de Steller (Stellers Jay, <i>Cyanocitta stelleri</i>) cuya coloración está basada principalmente en una coloración estructural azulada difusa.	29
6.2. Pluma de cola de la especie Urogallo Fuliginoso (Sooty Grouse, <i>Dengredagapus fuliginosus</i>) cuya coloración está basada en la combinación de melaninas.	30
6.3. Pluma de cola de la especie Aratinga Verde, comúnmente conocida como Periquito Verde (Green Parakeet, <i>Psittacara holochlorus</i>), cuya coloración es el resultado de carotenos amarillos (de ahí que tenga un cierto toque amarillento) y coloración estructural difusa, dando como resultado una coloración verdosa.	30
6.4. Pluma primaria de vuelo de la especie Lechuza Norteña (Northern Saw-Whet Owl, <i>Aegolius acadicus</i>) cuya coloración está basada en la combinación de melaninas.	31
6.5. Pluma secundaria de vuelo de la especie Loro Tamaulipeco (Red-crowned Parrot, <i>Amazona viridigenalis</i>) en cuyas plumas podemos ver el resultado de la combinación de múltiples mecanismos de coloración, siendo la parte azulada producida por coloración estructural difusa, parte rojiza y verde por pigmentación basada en porfirinas y psitacofulvinas, y la parte grisácea producida por melaninas.	31
6.6. Vista ampliada del modelo de cilindros dieléctricos en la pluma renderizada de la figura 6.3 que modelan de forma estadística las barbas y bárbulos de las plumas.	32
6.7. Vista vertical de las plumas renderizadas presentadas en este apartado.	32
7.1. Cronograma del proyecto, con las fases y su desarrollo aproximado. . .	36

A.1. Diagrama de clases de Mitsuba simplificado para la biblioteca **librender**. Los plugins se encuentran dentro de módulos como clases concretas que implementan la funcionalidad siguiendo la interfaz de las clases abstractas definidas en el módulo librender. Existen multitud de más plugins de cada clase abstracta, pero se han incluido ejemplos utilizados en el desarrollo del proyecto para mayor claridad. El resto de bibliotecas se han omitido por simplicidad y porque no han sido utilizadas en el marco de este TFG. 53

Lista de Tablas

B.1. Resumen de los parámetros estructurales de las barbas en plumas de vuelo para un conjunto de especies, incluyendo el radio de las barbas r_b , la distancia entre barbas Δ_b , y el porcentaje de área ocupado por barbas. Datos de [25].	57
---	----

Anexos

Anexos A

Mitsuba

Mitsuba [9] es un motor de renderizado *open source* basado en física y orientado a la investigación escrito en C++. Mitsuba es extremadamente modular: consta de un pequeño conjunto de bibliotecas centrales y más de 100 plugins diferentes que implementan funcionalidades que van desde materiales y fuentes de luz hasta algoritmos de renderizado completos.

Para la implementación de un nuevo modelo para la apariencia de plumas, es fundamental un motor de renderizado, ya que para poder renderizar las plumas son necesarios una serie de componentes básicos como: sensores que capturen la escena, emisores de luz, algoritmos de transporte de luz, geometrías... lo cuál sería inviable de desarrollar por completo en el marco de este TFG. Mitsuba es el candidato idóneo, porque además de dar soporte a una amplia gama de todos los elementos necesarios para renderizar, permite la creación e integración de nuevos métodos según el objetivo a realizar.

A.1. Arquitectura de Mitsuba

Mitsuba es un sistema de renderizado modular basado en complementos/plugins, para que la extensión a otras áreas de aplicación sea simple. Con esta finalidad, Mitsuba se divide en 5 bibliotecas de soporte básicas para crear renderizadores: **libcore** que implementa funciones relacionadas con E/S, estructuras de datos básicas y carga de plugins, **librender** que contiene abstracciones de los componentes necesarios para representar una escena(sensores,materiales,fuentes de luz...) y su renderizado, **libhw** que implementa abstracciones y funcionalidades para la eficiencia del hardware en el renderizado, **libidir** con el fin de dar soporte a algoritmos de trazado de rayos bidireccionales y por último **libpython** que contiene los elementos básicos para crear *bindings* entre Mitsuba y Python.

Los plugins son las clases concretas que implementan la funcionalidad a partir de

la interfaz definida por las abstracciones de las bibliotecas. En el marco de este TFG la biblioteca utilizada y estudiada es **librender**, que nos ofrece todo lo necesario para la creación de escenas para el renderizado. A continuación, se incluyen las clases abstractas que ofrece Mitsuba como componentes básicos de un renderizador para conformar una escena:

- **Integradores** (*Integrator*): son los distintos algoritmos de renderizado que resuelven la ecuación del transporte de luz. Por ejemplo, *path tracing* o *photon mapper*.
- **Sensores** (*Sensor*): capturan la escena y procesan la radianza en cada píxel para dar el resultado del renderizado. Pueden ser cámaras de perspectiva, ortogonales, etc.
- **Emisores** (*Emitter*): son las fuentes de luz que iluminan la escena. Pueden ser luces puntuales asignados en un punto de la escena (luz puntual), geometrías convertidas en fuentes de luz (luz de área), o emisores direccionales o de entorno.
- **Geometrías** (*Shape*): definen las superficies sobre las cuales la luz incide. Pueden variar desde geometrías simples como esferas a geometrías muy complejas construidas con mallas de triángulos.
- **BSDF** (*BSDF*): funciones de dispersión de la luz que describen la manera en la que la luz interacciona con los elementos geométricos de la escena. Existen multitud de ellas, desde funciones simples para modelar materiales difusos hasta más complejos como para modelar telas realistas.

A partir de estas clases abstractas, Mitsuba ofrece un amplio rango de opciones y da la posibilidad de crear cualquier tipo de plugin que implemente una nueva funcionalidad. Por ejemplo, dada la interfaz general de una *BSDF*, Mitsuba ofrece plugins para multitud de materiales como difusos, dieléctricos, metálicos, etc. Los plugins son compilados como librerías dinámicas que son cargadas por el programa principal según los componentes de la escena que se vaya a renderizar.

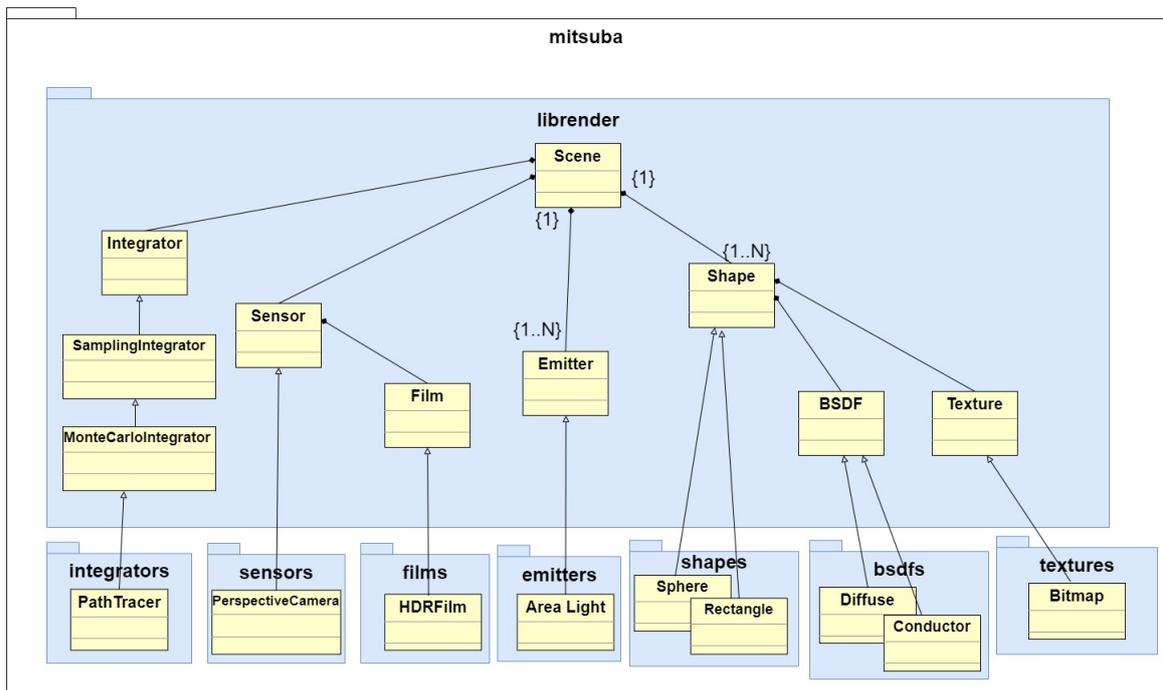


Figura A.1: Diagrama de clases de Mitsuba simplificado para la biblioteca **librenderer**. Los plugins se encuentran dentro de módulos como clases concretas que implementan la funcionalidad siguiendo la interfaz de las clases abstractas definidas en el módulo **librenderer**. Existen multitud de más plugins de cada clase abstracta, pero se han incluido ejemplos utilizados en el desarrollo del proyecto para mayor claridad. El resto de bibliotecas se han omitido por simplicidad y porque no han sido utilizadas en el marco de este TFG.

Anexos B

Tipos de plumas

La taxonomía de las plumas, basada exclusivamente en la estructura de la pluma, existe para clasificar un amplio rango de plumas de distintos tamaños, formas y tipos [22]. Una de las principales características para definir las plumas es el tipo de vexilo, que pueden ser plumáceos (difusos y suaves) o penáceos (firmes y rígidos) [22, 20]. La variación se debe principalmente a la presencia o ausencia de ganchillos que entrelazan las barbas adyacentes [22, 20]. En función de esto, las plumas se clasifican generalmente en:

- **Plumas de contorno** (*Contour feathers*): también denominadas como plumas del cuerpo, cubren la mayor parte del cuerpo de un ave y suelen ser cortas y bastante simétricas [3, 1]. Se componen generalmente de dos secciones; por un lado, en la base del raquis se caracterizan por ser de tipo plumáceo compuestas por barbas y bárbulos sueltos y por otro lado en la parte superior por ser de tipo penáceo con barbas entrelazadas y firmes por los ganchillos de los bárbulos [22, 1].
- **Plumas de vuelo**: son plumas largas, anchas, rígidas y prácticamente penáceas en su totalidad [1, 20]. Estas plumas cumplen, principalmente, funciones aerodinámicas y tienen poca importancia en el mantenimiento de la temperatura corporal [1]. Se distribuyen en las alas y colas de las aves y presentan distintas variaciones; Por un lado están las plumas primarias de vuelo situadas en la parte más posterior del ala del ave, cuya función es la de dar el empuje necesario que permite a las aves mantener el vuelo. Estas plumas tienen vexilos asimétricos a ambos lados del raquis, es decir, el vexilo del lado anterior de la pluma es estrecho y rígido mientras que el vexilo del lado posterior es más ancho y algo más suave y flexible. En la parte del ala más próxima al cuerpo, se encuentran las plumas de vuelo secundarias cuya función principal es generar la elevación durante el vuelo. Por último, están las plumas de la cola o rectrices. Estas poseen un raquis largo y

por lo general, vexilos muy simétricos a ambos lados. Contribuyen principalmente con la dirección y el frenado durante el vuelo [1, 20, 22].

- **Plumón** (*Down feathers*): son puramente plumáceas, no tienen raquis o es muy corto, tienen las barbas sueltas, desordenadas y suaves. [1, 20, 2]. Su función es evitar la pérdida de calor y se encuentran generalmente debajo de las plumas de contorno [1].
- **Semiplumas** (*Semiplumes*): son plumas intermedias entre las de contorno y el plumón, tienen el raquis más largo que las barbas, pero estas están sueltas y desordenadas como en el plumón [20, 1, 2].
- **Filopluma** (*Filoplume*): plumas suaves con barbas únicamente en el extremo final [3]. Tienen funciones sensoriales y ornamentales [1].
- **Cerda** (*Bristle*): son plumas de raquis rígido y pocas barbas situadas principalmente en la base. Su función es principalmente sensorial [1].

Tabla B.1: Resumen de los parámetros estructurales de las barbas en plumas de vuelo para un conjunto de especies, incluyendo el radio de las barbas r_b , la distancia entre barbas Δ_b , y el porcentaje de área ocupado por barbas. Datos de [25].

Species	Radio de la barba r_b [m]	Δ_b [m]	% área barba
<i>Accipiter gentilis</i>	13,5	432	3
<i>Accipiter nisus</i>	21,5	325	6,2
<i>Acrocephalus arundinaceus</i>	15	278	5,1
<i>Acrocephalus palustris</i>	13,5	244	5,2
<i>Acrocephalus schoenobaenus</i>	15	231	6,1
<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	16	230	6,5
<i>Aegithalos caudatus</i>	12	225	5,1
<i>Alauda arvensis</i>	19	240	7,3
<i>Alcedo atthis</i>	15	190	7,3
<i>Anas crecca</i>	26	174,9	12,9
<i>Anas platyrhynchos</i>	31,5	239	11,6
<i>Anas querquedula</i>	18	208	8
<i>Anser albifrons</i>	25,5	327	7,2
<i>Anthus campestris</i>	16	272	5,6
<i>Anthus spinoletta</i>	18	244	6,9
<i>Anthus trivialis</i>	15,7	236	6,2
<i>Aquila chrysaetos</i>			
<i>Ardea cinerea</i>	20	384	5
<i>Asio flammeus</i>	47	225	17,3
<i>Asio otus</i>	33	245	11,9
<i>Athene noctua</i>	28,5	253	10,1
<i>Aythya ferina</i>	24	193	11,1
<i>Aythya fuligula</i>	28,5	165	14,7
<i>Bombycilla garrulus</i>	19	227,3	7,7
<i>Botaurus stellaris</i>	17	320	5
<i>Branta ruficollis</i>	20	344	5,5
<i>Bubo bubo</i>	85	234	26,6
<i>Buteo buteo</i>	29,5	435	6,4
<i>Buteo lagopus</i>	19,5	462	4
<i>Carduelis cannabina</i>	17	221	7,1
<i>Carduelis carduelis</i>	13	213	5,8
<i>Carduelis chloris</i>	17	251	6,3
<i>Carduelis spinus</i>	13,3	221,5	5,7
<i>Carpodacus erythrinus</i>	19	206	8,4
<i>Cecropis daurica</i>	10	236	4,1
<i>Certhia familiaris</i>	19	232	7,6
<i>Chroicocephalus ridibundus</i>	15	312	4,6
<i>Cinclus cinclus</i>	20,5	244	7,8
<i>Circaetus gallicus</i>	20	516	3,7
<i>Circus cyaneus</i>			
<i>Coccothraustes coccothraustes</i>	15	273	5,2
<i>Columba livia</i>	19,5	291	6,3
<i>Coracias garrulus</i>	20,5	288	6,6
<i>Corvus frugilegus</i>	10,5	390	2,6
<i>Corvus monedula</i>	15	347	4,1
<i>Crex crex</i>	18,5	256	6,7
<i>Cuculus canorus</i>	24	300	7,4
<i>Cyanistes caeruleus</i>	16,5	241	6,4