

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TEXTIL Y PAPELERA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**COLOR Y MÚSICA: ESTUDIO DE LAS
RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS
ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO**

Joaquín Pérez Fuster

Julio 2014

Directores:

Dr. Eduardo J. Gilabert Pérez
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dr. Fco. Miguel Martínez Verdú
UNIVERSIDAD DE ALICANTE

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA TEXTIL Y PAPELERA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

COLOR Y MÚSICA: ESTUDIO DE LAS RELACIONES FÍSICAS Y
PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

Autor:

Joaquín Pérez Fuster

Dirigida por:

Dr. Eduardo J. Gilabert Pérez
Catedrático de Escuela Universitaria
Dpto. de Ingeniería Textil y Papelera
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dr. Fco. Miguel Martínez Verdú
Profesor Titular de Universidad
Dpto. de Óptica, Farmacología y Anatomía
UNIVERSIDAD DE ALICANTE

Julio 2014

COLOR Y MÚSICA: ESTUDIO DE LAS RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

RESUMEN

El objetivo de este trabajo ha sido buscar y demostrar la existencia de una concordancia entre las variables del color (*hue*, *value*, y *chroma*) y las dimensiones físicas del sonido (*altura*, *volumen* y *timbre*) respectivamente.

En primer lugar, y como fase preparatoria, se ha estudiado el *timbre* de instrumentos musicales tradicionales con el objetivo de obtener un ordenamiento relativo a la pureza de sonido. Se han analizado los sonidos del violonchelo, corno, fagot y piano, obteniéndose sus espectros con los 16 primeros armónicos de las notas musicales comunes dentro de sus tesituras. Se han analizado las notas centrales A2, E3 y B3 de la tesitura de los instrumentos y se ha obtenido la *sensación de sonoridad S* de cada armónico. Se ha evaluado matemática y gráficamente la sonoridad de sus armónicos y se ha establecido un orden y grado de pureza de los instrumentos; para lo cual, se han introducido los conceptos de "*valor de importancia de armónicos*", "*sonoridad valorada*" y "*envolvente ideal armónica*".

En una segunda parte se ha realizado una propuesta de concordancia entre *hue* y tonos musicales. Partiendo de la correspondencia de las longitudes de onda del espectro con las notas musicales de la escala temperada ($\lambda_c = 72,135 \cdot \ln(\lambda_m) + 577,76$), se han ajustado los tonos de colores del espectro de luz a colores Munsell. Se han generado series de notas musicales armónicas emitidas por distintos instrumentos y se han formado series de colores armónicos relacionándolas con las series de notas musicales armónicas; teniendo en cuenta el grado de pureza de timbre obtenida en la primera parte del trabajo y el *chroma* del color. De esta manera, se han relacionado series de colores con variación de *hue* en dirección del rojo al azul con series de notas musicales (notas de acordes, quintas y octavas) emitidas por un mismo instrumento y en dirección del tono grave al agudo.

Habiendo definido la pureza de timbre y propuesto la relación entre *hue* y tonos musicales, la tercera parte del trabajo analiza y correlaciona el *chroma* con el timbre musical. Se han relacionado colores del mismo *hue* y *value* y distinto *chroma* con diversos instrumentos musicales emitiendo una misma nota musical a igual intensidad.

En la cuarta parte del trabajo se ha analizado la concordancia entre *value* e intensidad de sonido. Para ello, se han propuesto ejemplos de correlación entre series de colores con el mismo *hue* y *chroma* y variación de *value* con series de sonidos de una nota musical emitida por el mismo instrumento variando su intensidad.

Como última parte del trabajo, y buscando la validación psicofísica a partir de un estudio poblacional de lo desarrollado previamente a nivel teórico, se ha elaborado

un test de comparación entre colores y notas musicales según las propuestas de los estudios precedentes buscando las posibles relaciones entre las variables. El test se encuentra ubicado en <http://clapton.alc.upv.es/jperez/>. Se invitó a participar a un grupo diverso de personas, se recogieron y analizaron los resultados, de cuyos valores se obtienen las siguientes conclusiones:

- Existe una mayor tendencia a relacionar los tonos de color de longitudes de onda larga, media y corta con las notas musicales de longitudes de onda larga, media y corta respectivamente. Es decir, una correlación positiva entre el *hue* y el tono musical (altura).
- Existe una mayor tendencia en relacionar las notas musicales más puras con los colores más cromáticos. Es decir, correlación positiva ente el *chroma* y el timbre.
- Para un color relacionado (color sobre soporte blanco), existe una mayor tendencia a relacionar una mayor intensidad de volumen con una menor claridad. Es decir, una correlación negativa ente la claridad y la intensidad.

Por consiguiente, se ha demostrado por primera vez que existe una relación entre estímulos visuales y auditivos de longitudes de onda proporcionales y con la misma dirección. Y, aun cuando un tono de color pueda vibrar en armonía con una misma nota musical emitida por diversos instrumentos musicales, la sensación de bienestar, en el receptor de ambos estímulos, estará más presente en cuanto exista una mayor concordancia del croma del color con la pureza del timbre del sonido musical. Así mismo, la mayor o menor intensidad de ese sonido se percibirá mejor concordada junto con una menor o mayor claridad de ese mismo color.

Palabras clave: Color y música, percepción, visión, audición, armonía.

COLOR & MUSIC: A STUDY OF THE PHYSICAL AND PSYCHOLOGICAL RELATIONSHIP BETWEEN COLOR AND SOUND

ABSTRACT

Objective of this work has been to find and prove the existence of a correlation between color variables (hue, value, and chroma) and physical dimensions of sound (height, volume and timbre) respectively.

First, and as a preparatory phase, we have studied the timbre of traditional musical instruments in order to obtain a ranking on the purity of sound. Sounds of cello, horn, bassoon and piano, were analyzed to obtain their spectra with the first 16 harmonics of common musical notes in their tessitura. Central notes (A2, B3 and E3) in this instruments tessitura were analyzed and has been obtained sonority sensation S of each harmonic. It has been evaluated, mathematically and graphically, sonority of their harmonics establishing an order and purity ranking of the instruments; for which, we have introduced concepts of "harmonic importance value", "valued sonority" and "harmonic ideal surround".

In a second part, a proposal of agreement has been made between hue and musical tones. Based on the correspondence of spectrum wavelengths with musical notes of tempered scale ($\lambda_c = 72,135 \cdot \ln(\lambda_m) + 577,76$), colors tones of the light spectrum have been adjusted to Munsell colors. Series of harmonic musical notes issued by different instruments were generated and series of harmonic colors were formed relating them with the harmonic series of musical notes; considering purity rank obtained in the first part of the work and color chroma. Thus, color series with varying hue towards red to blue have been associated with series of musical notes (chords, fifths and octaves) issued by the same instrument from low to high pitch.

Having defined timbre purity and proposed a relationship between hue and musical tones, third part of this paper analyzes and correlates chroma with musical timbre. Colors with same hue and value but different chroma have been associated with different musical instruments issuing same single musical note at equal intensity.

Fourth part of this paper analyzes correlation between value and intensity of sound. For this, examples of correlation between sets of colors (same hue and chroma but value variation) with sound series of a musical note issued by the same instrument (varying intensity) are proposed.

As a final part of the work, and looking for psychophysical validation, through a population study, of previously developed in a theoretical level, it has prepared a comparison test between colors and musical notes as proposed by previous studies seeking possible relationships between variables. This test was published in Internet (URL <http://clapton.alc.upv.es/jperez/>) and a group of observers were invited to participate. Their responses were collected in a database and later analyzed, obtaining following conclusions:

- There is a greater tendency to relate color tones with long, medium and short wavelengths with musical notes with long, medium and short wavelengths respectively. That is, a positive correlation between hue and musical pitch (height).
- There is a greater tendency to relate purest musical notes with the most chromatic colors. That is, a positive correlation was observed between chroma and timbre.
- For a related color (on white background), there is a greater tendency to relate more loudness with less clarity. That is, a negative correlation was observed between clarity and intensity.

Therefore, it has been demonstrated for the first time a relationship between visual and auditory stimuli of proportional wavelengths and with the same direction. And even when a color tone can vibrate in harmony with the same musical note issued by various musical instruments, sense of wellbeing in the receiver of both stimuli will be more present as there is greater concordance between color chroma and timbre purity of musical sound. Likewise, greater or lower intensity of that sound will be perceived better concorded with lower or higher clarity of that same color.

Keywords: Color and music, perception, vision, hearing, harmony.

COLOR I MÚSICA: ESTUDI DE LES RELACIONS FÍSQUES I PSICOLÒGIQUES ENTRE EL COLOR I EL SO.

RESUM

L'objectiu d'aquest treball ha estat buscar i demostrar l'existència d'una concordança entre les variables del color (*hue*, *value*, i *chroma*) i les dimensions físiques del so (altura , volum i timbre) respectivament.

En primer lloc, i com a fase preparatòria, s'ha estudiat el timbre d'instruments musicals tradicionals amb l'objectiu d'obtenir un ordenament relatiu a la puresa de so. S'han analitzat els sons del violoncel, corn, fagot i piano, obtenint els seus espectres amb els 16 primers harmònics de les notes musicals comuns dins les seves tessitures. S'han analitzat les notes centrals A2, E3 i B3 de la tessitura dels instruments i s'ha obtingut la sensació de sonoritat *S* de cada harmònic. S'ha avaluat matemàticament i gràficament la sonoritat dels seus harmònics i s'ha establert un ordre i grau de puresa dels instruments; per a això, s'han introduït els conceptes de "valor d'importància d'harmònics", "sonoritat valorada" i "envoltant ideal harmònica".

En una segona part s'ha realitzat una proposta de concordança entre *hue* i tons musicals. Partint de la correspondència de les longituds d'ona de l' espectre amb les notes musicals de l'escala temperada ($\lambda_c = 72,135 \cdot \ln(\lambda_m) + 577,76$), s'han ajustat els tons de colors de l'espectre de llum a colors Munsell. S'han generat sèries de notes musicals harmòniques emeses per diferents instruments i s'han format sèries de colors harmònics relacionant-les amb les sèries de notes musicals harmòniques; tenint en compte el grau de puresa de timbre obtinguda en la primera part del treball i el *chroma* del color. D'aquesta manera, s'han relacionat sèries de colors amb variació de *hue* en direcció del vermell al blau amb sèries de notes musicals (notes d'acords, cinquenes i emeses per un mateix instrument i en direcció del to greu a l'agut .

Havent definit la puresa de timbre i proposat la relació entre *hue* i tons musicals, la tercera part del treball analitza i correlaciona el *chroma* amb el timbre musical. S'han relacionat colors del mateix *hue* i *value* i diferent *chroma* amb diversos instruments musicals emetent una mateixa nota musical a igual intensitat.

En la quarta part del treball s'ha analitzat la concordança entre *value* i intensitat de so. Per a això, s'han proposat exemples de correlació entre sèries de colors amb el mateix *hue* i *chroma* i variació de *value* amb sèries de sons d'una nota musical emesa pel mateix instrument variant la seva intensitat.

Com a última part del treball, i buscant la validació psicofísica a partir d'un estudi poblacional del desenvolupat prèviament a nivell teòric, s'ha elaborat un test de comparació entre colors i notes musicals segons les propostes dels estudis precedents buscant les possibles relacions entre les variables. El test es troba situat en <http://clapton.alc.upv.es/jperez/>. Es va convidar a participar a un grup divers de

persones, es van recollir i van analitzar els resultats, dels valors s'obtenen les següents conclusions :

- Hi ha una major tendència a relacionar els tons de color de longituds d'ona llarga, mitjana i curta amb les notes musicals de longituds d'ona llarga, mitjana i curta respectivament. És a dir, una correlació positiva entre el *hue* i el to musical (alçada).
- Hi ha una major tendència a relacionar les notes musicals més pures amb els colors més cromàtics. És a dir, correlació positiva ens el *chroma* i el timbre.
- Per a un color relacionat (color sobre suport blanc), hi ha una major tendència a relacionar una major intensitat de volum amb una menor claredat. És a dir, una correlació negativa ens la claredat i la intensitat.

Per tant, s'ha demostrat per primera vegada que existeix una relació entre estímuls visuals i auditius de longituds d'ona proporcionals i amb la mateixa direcció. I, tot i que un to de color pugui vibrar en harmonia amb una mateixa nota musical emesa per diversos instruments musicals, la sensació de benestar, en el receptor d'ambdós estímuls, estarà més present quant hi hagi una major concordança del *chroma* del color amb la puresa del timbre del so musical. Així mateix, la major o menor intensitat d'aquest so es percebrà millor concordada juntament amb una menor o major claredat d'aquest mateix color.

Paraules clau : Color i música, percepció, visió, audició, harmonia.

PREFACIO

La presente tesis tiene su origen en las clases de la asignatura "Técnicas espectrofotométricas para el análisis y la medida del color", perteneciente al Máster de Ingeniería Textil. El profesor D. Eduardo J. Gilabert exponía los distintos sistemas de ordenación cuando proyectó la imagen del círculo de color propuesto por Newton. El círculo de color traía consigo otro mensaje en forma de caracteres de escritura: A, B, C, D, E, F y G. Si bien estos caracteres no formaban parte del tema que se exponía, sí me llamó la atención y los reconocí como la notación anglosajona de las notas musicales.

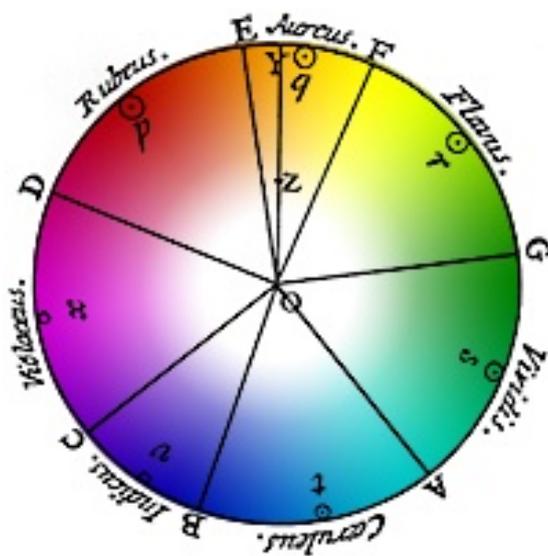


Figura 1. Círculo de color. Newton

Como amante de la música y el arte no dudé en interesarme por la relación descubierta, tan nueva para mí. Debo resaltar la confianza y el apoyo tenido sobre el tema de color y música por parte de mi director inicial de tesis, el profesor D. Eduardo Gilabert Pérez.

El tema de las relaciones entre el color y la música no se habían tratado anteriormente en el Departamento de Ingeniería Textil y Papelera ni en el de Ingeniería Gráfica. Pero, pensando en su posible utilización en el campo industrial como herramienta de diseño (potenciando la creatividad) o como herramienta de marketing (potenciando la perceptibilidad, simbolismo y emotividad) entre otras aplicaciones, se creyó interesante su inclusión. Así que desde el curso 2009-2010 se empezó a investigar sobre este tema.

Tras el estudio previo del conocimiento del estado del arte sobre el tema color-música llevé a cabo, en forma de trabajo fin de máster, una nueva propuesta de relación entre tonos de color y altura de notas musicales.

Como continuación del tema se propuso para esta tesis el estudio de las relaciones entre el resto de variables y comprobación perceptiva de las correlaciones propuestas.

Debo agradecer la comprensión, libertad, guía y apoyo prestado por mis directores de tesis D. Eduardo J. Gilabert y D. Fco. Miguel Martínez Verdú. A mis compañeros de trabajo, profesores D. José María Gadea y D. Jorge Segura por su ayuda en el campo de la acústica musical, profesor D. Pau Miró por sus consejos para la toma de datos y análisis del test, técnico informático D. Juan Manuel Mateo por la programación y puesta en marcha del test vía internet.

INDICE GENERAL

	Pág.
GLOSARIO.....	27
1 INTRODUCCIÓN	
1.1 Investigaciones previas.....	47
1.2 Objetivos y metodología.....	57
2 ESTUDIO DEL TIMBRE DE SONIDO DE INSTRUMENTOS MUSICALES	
2.1 Consideraciones previas.....	61
2.2 Procedimiento.....	63
2.2.1 Análisis de armónicos de A2 para el violonchelo, corno, fagot y piano.....	66
2.2.1.1 Evaluación matemática de la sonoridad.....	71
2.2.1.2 Evaluación gráfica de la sonoridad.....	71
2.2.1.3 Grado de pureza de la nota.....	73
2.2.2 Orden de pureza del violonchelo, corno, fagot y piano para la nota E3.....	74
2.2.3 Orden de pureza del violonchelo, corno, fagot y piano para la nota B3.....	76
2.3 Observaciones derivadas del estudio del timbre de sonido de instrumentos musicales.....	78
3 ANÁLISIS ENTRE HUE Y TONOS MUSICALES	
3.1 Consideraciones previas.....	81
3.2 Procedimiento.....	85
3.2.1 Sucesiones de notas de acordes mayores.....	86
3.2.1.1 El violonchelo interpreta el acorde mayor de E3.....	86
3.2.1.2 El piano interpreta el acorde mayor de G3.....	91
3.2.1.3 El piano interpreta el acorde mayor de D4.....	93
3.2.1.4 El piano interpreta el acorde mayor de B5.....	94
3.2.2 Sucesiones de notas de intervalos de quintas.....	95
3.2.2.1 El piano interpreta el intervalo de quintas A4-E5-B5.....	95
3.2.2.2 El órgano interpreta el intervalo de quintas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7.....	96
3.2.3 Sucesiones de notas de intervalos de octavas.....	97
3.2.3.1 El piano interpreta la secuencia de octavas C4-C5-C6-C7-C8.....	97
3.2.4 Sucesiones de notas de intervalos de dobles octavas.....	98
3.2.4.1 El órgano interpreta las notas E3-E5-E7.....	98
4 ANÁLISIS ENTRE CHROMA Y TIMBRE MUSICAL.....	101
4.1 Consideraciones previas.....	101
4.2 El violonchelo y el fagot emiten la nota A2.....	102
4.3 La trompeta, el violonchelo y el órgano emiten la nota G3#.....	103
4.4 La trompeta, el violonchelo y el órgano emiten la nota E3.....	106
4.5 El piano y el violín emiten el acorde mayor de B5.....	109
4.6 El fagot, violonchelo y órgano interpretan el tema musical "Ilagosta".....	110
4.7 Violonchelo vs fagot.....	113

5 ANÁLISIS ENTRE VALUE E INTENSIDAD DE SONIDO.....	115
5.1 Consideraciones previas.....	115
5.2 Suena el tambor.....	117
5.3 Suena la guitarra eléctrica.....	118
5.4 El piano emite la nota C3.....	119
5.5 El piano emite la nota F6#.....	120
6 EVALUACIÓN PERCEPTIVA ENTRE ESTÍMULOS VISUALES Y AUDITIVOS....	123
6.1 Consideraciones previas.....	123
6.2 Diseño del test.....	123
6.2.1 Cuestión 1 (identificación de anomalías visuales).....	124
6.2.2 Cuestiones relativas a la concordancia entre <i>HUE</i> Munsell y NOTA musical.....	125
6.2.2.1 Cuestión 2 (colores cálidos y fríos).....	125
6.2.2.2 Cuestión 3 (salida y puesta de sol).....	128
6.2.2.3 Cuestión 4 (el violonchelo interpreta el acorde mayor de E3).....	129
6.2.2.4 Cuestión 5 (el piano interpreta el acorde mayor de G3).....	129
6.2.2.5 Cuestión 6 (el piano interpreta el acorde mayor de D4).....	130
6.2.2.6 Cuestión 7 (el piano interpreta el intervalo de quintas A4-E5-B5).....	130
6.2.2.7 Cuestión 8 (el piano interpreta el acorde mayor de B5).....	131
6.2.2.8 Cuestión 9 (el piano interpreta la secuencia de octavas C4-C5-C6-C7-C8).....	131
6.2.2.9 Cuestión 10 (el órgano interpreta el intervalo de quintas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7).....	132
6.2.2.10 Cuestión 11 (el órgano interpreta las notas E3-E5-E7).....	133
6.2.3 Cuestiones relativas a la concordancia entre <i>VALUE</i> y <i>VOLUMEN</i> de nota musical.....	133
6.2.3.1 Cuestión 12 (suena el tambor).....	134
6.2.3.2 Cuestión 13 (suena la guitarra eléctrica).....	134
6.2.3.3 Cuestión 14 (el piano emite la nota C3).....	135
6.2.3.4 Cuestión 15 (el piano emite la nota F6#).....	135
6.2.4 Cuestiones relativas a la concordancia entre <i>CHROMA</i> y <i>TIMBRE</i> de un instrumento musical.....	136
6.2.4.1 Cuestión 16 (la trompeta, el violonchelo y el órgano emiten la nota E3).....	136
6.2.4.2 Cuestión 17 (la trompeta, el violonchelo y el órgano emiten la nota G3#).....	137
6.2.4.3 Cuestión 18 (el violonchelo y el fagot interpretan el intervalo de quintas A2-E3-B3).....	137
6.2.4.4 Cuestión 19 (el piano y el violín interpretan el acorde mayor de B5).....	138
6.2.4.5 Cuestión 20 (el fagot, violonchelo y órgano interpretan el tema musical "Ilagosta").....	139
6.3 Test (toma de datos).....	140
6.4 Test (puesta en marcha).....	140
6.4 Test (resultados).....	141
6.4.1 Resultados relativos a deficiencias visuales.....	141
6.4.2 Resultados relativos a la concordancia entre <i>HUE</i> de color y NOTA musical.....	142
6.4.3 Resultados relativos a la concordancia entre <i>VALUE</i> de color y <i>VOLUMEN</i> de nota musical.....	142
6.4.4 Resultados relativos a la concordancia entre <i>CHROMA</i> de color y <i>TIMBRE</i> de instrumento musical.....	143
7 CONCLUSIONES.....	145
8 PERSPECTIVAS.....	149

REFERENCIAS.....	151
------------------	-----

ANEXOS

Anexo A: Tesitura de instrumentos musicales.....	155
Anexo B: Tablas de valores de frecuencias de notas musicales.....	157
Anexo C: Valores de notas musicales y colores.....	161
Anexo D: Espectros de colores.....	165
Anexo E: Espectrogramas de notas entre C2 y E5.....	175
Anexo F: Valor de importancia de armónicos.....	189
Anexo G: Envolvente ideal armónica.....	191
Anexo H: Datos generados para el análisis del orden de pureza del violonchelo, corno, fagot y piano para la nota E3.....	193
Anexo I: Datos generados para el análisis del orden de pureza del violonchelo, corno, fagot y piano para la nota B3.....	199
Anexo J: Conversión entre espacios de color.....	205
Anexo K: Colores Munsell utilizados en test de ordenación de tonos.....	207
Anexo L: Tabla de valores Notas-Color para Munsell V5-C6.....	209
Anexo M: Tabla de valores Notas-Color para Munsell V6-C7.....	211
Anexo N: Partitura tema musical "Llagosta".....	213
Anexo O: Partitura 9ª Sinfonía en SibM. Composición para 5 tonalidades RGB.....	215
Anexo P: Datos obtenidos sobre cuestión 1ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	217
Anexo Q: Datos obtenidos sobre cuestiones 2ª y 3ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	219
Anexo R: Datos obtenidos sobre cuestiones 4ª a 11ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	221
Anexo S: Datos obtenidos sobre cuestiones 12ª a 15ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	223
Anexo T: Datos obtenidos sobre cuestiones 16ª a 20ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	225
Anexo U: Sinestesia de Scriabin.....	227

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Figura 1. Círculo de color. Newton.....	11
Figura 2. Sistema Munsell.....	32
Figura 3. Modelo RGB.....	33
Figura 4. Modelo HSV (izquierda) y HSL (derecha).....	34
Figura 5. Orquesta de la corte Elamita. Mural del palacio Assurbanipal.....	38
Figura 6. Escalas.....	41
Figura 7. Relación de colores con notas musicales. (Rimington. 1895).....	47
Figura 8. Relación entre las frecuencias de los sonidos y de los colores propuesta por Garner.....	48
Figura 9. Correspondencia entre algunos círculos de colores y algunas escalas musicales.....	48
Figura 10. Comparativa de las diferentes propuestas entre colores y notas musicales. (Pérez 2009).....	49
Figura 11. Propuesta de relación entre tonos de color y notas musicales. (Rangel 2009).....	50
Figura 12. Espectro visible (en nm). Representación en orden inverso para su mejor relación con la disposición de las teclas del piano.....	50
Figura 13. Espectro de transmitancia de la hoja de abedul.....	52
Figura 14. Posición relativa de las notas musicales en el espectro de color. Correspondencia entre tonos de color y notas musicales.....	52
Figura 15. Escala cromática tonal-musical y muestras de colores impresos correspondientes a la escala cromática de C3.....	53
Figura 16. Espectro de color (255,173,0) correspondiente a la nota A3#.....	54
Figura 17. Espectro de armónicos de A3# para violonchelo.....	54
Figura 18. Evolventes de armónicos de A3# para corno, fagot, piano y violonchelo.....	55
Figura 19. Comparativa entre gráficos de espectros de color y nota.....	55
Figura 20. Partes superior: ondas sinusoidales de tonos puros. Parte inferior: suma de ondas.....	61
Figura 21. Espectros de armónicos de G3# (207,652 Hz) para flauta y guitarra.....	62
Figura 22. Análisis espectral de armónicos de A4 (440 Hz). Diapasón.....	62
Figura 23. Gráfico de posición de notas A2, E3 y B3 en las tesituras de cada instrumento.....	64
Figura 24. Notación de armónicos de A2.....	65

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

Figura 25. Espectros de armónicos de A2. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	66
Figura 26. Envolventes de armónicos de A2. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	68
Figura 27. Ejemplo obtención de valor de NS en curvas de igual sonoridad (ISO 226).....	69
Figura 28. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de A2.....	70
Figura 29. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de A2 para violonchelo y fagot.....	72
Figura 30. Curvas envolvente ideal armónica y de sensación de sonoridad de armónicos de A2 para violonchelo.....	72
Figura 31. Curvas envolvente ideal armónica y de sensación de sonoridad de armónicos de A2 para fagot.....	73
Figura 32. Envolventes de armónicos de E3.....	74
Figura 33. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de E3.....	74
Figura 34. Envolventes de armónicos de B3.....	76
Figura 35. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de B3.....	76
Figura 36. Espectrogramas de A2 para el violonchelo y el fagot.....	78
Figura 37. El fagot presenta su formante en el 4º armónico (440 Hz) para la nota A2, en el 3º armónico (494,442 Hz) para la nota E3 y en el 2º armónico (493,884 Hz) para la nota B3.....	78
Figura 38. Posición de los formantes de varios instrumentos musicales y también el formante principal asociado a las vocales.....	79
Figura 39. Comparativa de formantes en la sensación de sonoridad en A2, E3 y B3. El fagot varía su formante a lo largo de su tesitura.....	79
Figura 40. Izquierda: Anillo Munsell con $V = 5$. Derecha: Anillo Munsell en diagrama CIE a^*b^*	82
Figura 41. Serie V 5/6 Munsell en diagrama de cromaticidad CIE 1964.....	82
Figura 42. Proyecciones ortográficas de serie de colores dispuesta en hélice (Sistema HLS).....	83
Figura 43. Serie de colores dispuesta en hélice (Sistema HLS). Proyección axonométrica.....	84
Figura 44. Serie de armónicos de A1.....	85
Figura 45. Círculo cromático tonal-musical.....	85
Figura 46. Hoja de datos de color Munsell para R,G,B (255, 79, 0).....	86
Figura 47. Hoja de datos de color Munsell para R,G,B (255, 145, 0).....	87
Figura 48. Hoja de datos de color Munsell para R,G,B (255, 187, 0).....	87
Figura 49. Datos de colores relativos al acorde E3-G3#-B3.....	88
Figura 50. Hoja de datos de color Munsell para 9.50 R 5/12.....	88

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

Figura 51. Valores centrados a hojas Munsell.....	89
Figura 52. Valores <i>hue</i> igualmente espaciados, <i>value</i> uniformemente escalado y <i>chroma</i> constante.....	89
Figura 53. Sólido Munsell y Sólido PCCS japonés.....	90
Figura 54. Acorde de colores E3-G3#-B3 relativos al violonchelo.....	90
Figura 55. Espectros de notas E3, G3# y B3 emitidas por el violonchelo.....	90
Figura 56. Posición en pentagrama de la sucesión de notas del acorde G3.....	91
Figura 57. Círculos de color Munsell para <i>value</i> 6.....	92
Figura 58. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Acorde G3-B3-D4.....	92
Figura 59. Espectros de notas G3, B3 y D4 emitidas por el piano.....	92
Figura 60. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Acorde D4-F4#-A4.....	93
Figura 61. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Acorde B5-D6#-F6#.....	94
Figura 62. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Intervalo de quintas A4-E5-B5.95	
Figura 63. Serie teórica de colores C3, G3, D4, A4, E5, B5, F6# y C7#.....	96
Figura 64. Correspondencia de colores y notas musicales del órgano. Intervalo de quintas C3, G3, D4, A4, E5, B5, F6# y C7#.....	97
Figura 65. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Secuencia de octavas C3 a C8	98
Figura 66. Correspondencia de colores y notas musicales del órgano. Secuencia de dobles octavas E3-E5-E7.....	99
Figura 67. Color rojo con 10 %, 60 % y 100 % de pureza.....	102
Figura 68. Variaciones de chroma para un mismo hue y value.....	102
Figura 69. Colores correspondientes a A2 para violonchelo y fagot.....	103
Figura 70. Hoja de datos del color. Partiendo de R, G, B de (255, 145, 0).....	104
Figura 71. Armónicos de G3# emitidos por la trompeta, violonchelo y órgano.....	104
Figura 72. Serie de colores correspondiente a la nota G3# emitida por la trompeta, violonchelo y órgano.....	105
Figura 73. Hoja de datos del color. Partiendo de R, G, B de (255, 79, 0).....	106
Figura 74. Armónicos de E3 emitidos por el violonchelo y el órgano.....	107
Figura 75. Hoja de datos del color 9.50 R 5/12.....	107
Figura 76. Serie de colores correspondiente a la nota E3 emitida por la trompeta, violonchelo y órgano.....	108

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

Figura 77. Acorde de colores B5-D6#-F6# a concordar con el piano. Colores 2G 6/7, 0.5B 6/7 y 10B 6/7.....	109
Figura 78. Acorde de colores B5-D6#-F6# a concordar con el violín. Colores 2G 6/20, 0.5B 6/20 y 10B 6/20.....	110
Figura 79. Fragmento de "Ilagosta". (Ver partitura en anexo M).....	110
Figura 80. Tonalidad musical y franja relativa de tonos de color.....	111
Figura 81. Correspondencia entre instrumento musical y color.....	111
Figura 82. Colores correspondientes a notas C3,E3 y B3 para órgano, violonchelo y fagot.....	112
Figura 83. Propuesta de relación de color para el fagot y para el violonchelo.....	113
Figura 84. Correspondencia entre gráficos de espectros de color y sonido musical.....	114
Figura 85. Claridad de la gama cromática.....	115
Figura 86. Madona amamantando a su hijo.....	116
Figura 87. Romboedro de Küppers.....	116
Figura 88. Variaciones de value para un mismo hue y chroma.....	117
Figura 89. Colores acromáticos con variación de value.....	117
Figura 90. Color amarillo con variación de value.....	118
Figura 91. Espectros de guitarra eléctrica. Izquierda: Espectro de la nota G3# con sonido limpio. Derecha: Espectro de la misma nota con efecto overdrive.....	119
Figura 92. Colores 8.00R 4/5, 8.00R 6/5 y 8.00R 8/5.....	120
Figura 93. Colores 10.00B 8/6, 7/6, 6/6, 5/6 y 4/6.....	121
Figura 94. Imagen del test para la cuestión 1.....	124
Figura 95 Gammas de colores cálidos (izquierda) y fríos (derecha).....	125
Figura 96. Situación de instrumentos musicales dentro del círculo cromático tonal-musical.....	126
Figura 97. Compases interpretados por el contrabajo.....	126
Figura 98. Franjas de melodías.....	127
Figura 99. Imagen del test para la cuestión 2.....	127
Figura 100. Imagen del test para la cuestión 3.....	128
Figura 101. Imagen del test para la cuestión 4.....	129
Figura 102. Imagen del test para la cuestión 5.....	129
Figura 103. Imagen del test para la cuestión 6.....	130

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

Figura 104. Imagen del test para la cuestión 7.....	130
Figura 105. Imagen del test para la cuestión 8.....	131
Figura 106. Imagen del test para la cuestión 9.....	131
Figura 107. Imagen del test para la cuestión 10.....	132
Figura 108. Imagen del test para la cuestión 11.....	133
Figura 109. Imagen del test para la cuestión 12.....	134
Figura 110. Imagen del test para la cuestión 13.....	134
Figura 111. Imagen del test para la cuestión 14.....	135
Figura 112. Imagen del test para la cuestión 15.....	135
Figura 113. Imagen del test para la cuestión 16.....	136
Figura 114. Imagen del test para la cuestión 17.....	137
Figura 115. Imagen del test para la cuestión 18.....	138
Figura 116. Imagen del test para la cuestión 19.....	138
Figura 117. Imagen del test para la cuestión 20.....	139
Figura 118. Esquema de resultados de la cuestión 1a, 1b y 1c.....	141
Figura 119. Colores 8R 6/7, 4Y 6/7, 7.5GY 6/7, 4.5G 6/7, 7PB 6/7 y 5P 6/7.....	142
Figura 120. Concordancia entre instrumentos y colores. Armónicos de G3# emitidos por la trompeta, violonchelo y órgano. Colores 6YR 7/6, 6YR 7/9 y 6YR 7/12.....	143
Figura A1. Rango de frecuencias de los sonidos producidos por las voces humanas y por varios instrumentos musicales.....	153
Figura A2. Rango de frecuencias de los sonidos producidos por las voces humanas y por varios instrumentos musicales.....	154
Figura C1. Franja de sonidos musicales.....	159
Figura C2. Correspondencia entre tono de color y nota musical.....	159
Figura D1. Círculo cromático tonal-musical. Valores R, G, B de notas musicales en sistema temperado.....	163
Figura D2. Círculo de colores básicos y sus complementarios.....	164
Figura D3. Hoja de colores básicos y sus complementarios. Formato de impresión utilizado para su posterior análisis espectral.....	165
Figura D4. Imagen de espectros de reflectancia de colores básicos.....	166
Figura D5. Hoja de colores correspondientes a la escala cromática (12 notas) de C3.....	167
Figura D6. Espectro de acorde de C3.....	168

Figura D7. Espectro de armónicos de C3.....	168
Figura D8. Espectro de armónicos de E3.....	169
Figura D9. Espectro de armónicos de G3.....	169
Figura D10. Espectro de armónicos de A3.....	170
Figura D11. Espectro de armónicos de A3#.....	170
Figura D12. Espectro de armónicos de B3.....	170
Figura D13. Espectro de octavas de C3.....	171
Figura D14. Espectro de octavas de E3.....	171
Figura D15. Espectro de octavas de A3.....	172
Figura D16. Espectro de octavas de A4.....	172
Figura D17. Espectro de octavas de A5.....	172
Figura E1. Espectrogramas de notas C2 a E5 para el violonchelo.....	173-176
Figura E2. Espectrogramas de notas C2 a E5 para el corno.....	177-179
Figura E3. Espectrogramas de notas C2 a E5 para el fagot.....	180-182
Figura E4. Espectrogramas de notas C2 a E5 para el piano.....	183-185
Figura G1. Curva envolvente ideal armónica.....	189
Figura H1. Espectros de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	191-192
Figura H2. Envolventes de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	193
Figura H3. Curvas de igual sonoridad (ISO 226).....	194
Figura H4. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de E3.....	195
Figura I1. Espectros de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	197-198
Figura I2. Envolventes de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	199
Figura I3. Curvas de igual sonoridad (ISO 226).....	200
Figura I4. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de B3.....	201
Figura K1. Test de ordenación de colores D-15.....	205
Figura K2. Coordenadas cromáticas de los colores Munsell utilizados en el test D-15.....	205
Figura U1. Ciclo de quintas (tonalidad de DoM).....	225
Figura U2. Relación sinestésica entre colores y notas musicales (Scriabin).....	226

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Formación de octavas.....	36
Tabla 2. Relaciones entre cotas de una octava completa.....	37
Tabla 3. Sucesiones de quintas.....	37
Tabla 4. Escala pentatónica.....	37
Tabla 5. Armonía de sucesión de notas.....	38
Tabla 6. Escala diatónica.....	38
Tabla 7. Escalas mayor y menores.....	39
Tabla 8. Sucesiones de quintas.....	40
Tabla 9. Escalas natural, pitagórica y temperada.....	40
Tabla 10. Instrumentos analizados.....	63
Tabla 11. Serie armónica de A2.....	65
Tabla 12. Amplitudes absolutas y relativas de señal de armónicos de A2.....	67
Tabla 13. Niveles de presión sonora de armónicos de A2.....	68
Tabla 14. Niveles de sonoridad corregidos según curvas de igual sonoridad (ISO 226).....	69
Tabla 15. Valores de Sensación de Sonoridad de armónicos de A2.....	70
Tabla 16. Sonoridades valoradas de armónicos de A2.....	71
Tabla 17. Sonoridades valoradas de armónicos de E3.....	75
Tabla 18. Sonoridades valoradas de armónicos de B3.....	77
Tabla 19. Orden de pureza de violonchelo, corno, fagot y piano para las notas A2, E3 y B3.....	77
Tabla 20. Valores de los atributos del color y sonido para la concordancia entre hue y tono musical.	81
Tabla 21. Correspondencia entre sonido y color para E3, G3# y B3.....	86
Tabla 22. Datos Munsell y R,G,B del acorde E3-G3#-B3.....	89
Tabla 23. Correspondencia entre sonido y color para G3, B3 y D4.....	91
Tabla 24. Datos Munsell y R,G,B del acorde G3-B3-D4.....	91
Tabla 25. Correspondencia entre sonido y color para D4, F4# y A4.....	93

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

Tabla 26. Datos Munsell y R,G,B del acorde D4-F4#-A4.....	93
Tabla 27. Correspondencia entre sonido y color para B5, D6# y F6#.....	94
Tabla 28. Datos Munsell y R,G,B del acorde B5-D6#-F6.....	94
Tabla 29. Correspondencia entre sonido y color para A4, E5 y B5.....	95
Tabla 30. Datos Munsell y R,G,B del intervalo de quintas A4-E5-B5.....	95
Tabla 31. Correspondencia entre sonido y color para C3, G3, D4, A4, E5, B5, F6# y C7#.....	96
Tabla 32. Datos Munsell y H,L,S del intervalo de quintas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7#.....	96
Tabla 33. Correspondencia entre sonido y color para C3, C4, C5, C6, C7 y C8.....	97
Tabla 34. Datos relativos a sonido y color para la serie de octavas C3, C4, C5, C6, C7 y C8.....	97
Tabla 35. Correspondencia entre sonido y color para E3, E5 y E7.....	98
Tabla 36. Datos relativos a sonido y color para la serie de octavas E3, E5, y E7.....	98
Tabla 37. Valores de los atributos del color y sonido para la concordancia entre chroma y timbre de instrumento musical.....	101
Tabla 38. Correspondencia entre sonido y color para A2.....	102
Tabla 39. Datos de la nota A2 y valores de colores relativos al grado de pureza.....	103
Tabla 40. Correspondencia entre sonido y color para G3#.....	103
Tabla 41. Datos de la nota G3# normalizados a hojas Munsell.....	105
Tabla 42. Correspondencia entre sonido y color para E3.....	106
Tabla 43. Datos de la nota E3 ajustados a hojas Munsell.....	108
Tabla 44. Correspondencia entre sonido y color para B4, D6# y F6#.....	109
Tabla 45. Datos del acorde B5-D6#-F6# normalizados a hojas Munsell. Piano.....	109
Tabla 46. Valores de los atributos del color y sonido para la concordancia entre value e intensidad de sonido musical.....	115
Tabla 47. Correspondencia entre sonido y color para C4.....	118
Tabla 48. Correspondencia entre sonido y color para C3.....	119
Tabla 49. Datos relativos a sonido y color para C3 y 8.00R 8/5, 6/5 y 4/5.....	119
Tabla 50. Correspondencia entre sonido y color para F6#.....	120
Tabla 51. Datos relativos a sonido y color para F6# y 10.00B 8/6, 7/6, 6/6, 5/6 y 4/6.....	121
Tabla B1. Relación de valores de las notas musicales de la escala temperada.....	157-159
Tabla C1. Correspondencia de valores entre notas del sonido musical y tonos de color.....	162-163

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

Tabla F1 . Orden de armónicos según su desviación a nota esperada.....	189
Tabla F2 . Valor de importancia de armónicos.....	189
Tabla G1 . Valor de importancia de armónicos 1º, 2º, 4º, 8º y 16º.....	191
Tabla H1. Armónicos de E3.....	193
Tabla H2. Amplitudes absolutas y relativas de señal de armónicos de E3.....	194
Tabla H3. Niveles de presión sonora de armónicos de E3.....	195
Tabla H4. Niveles de sonoridad corregidos según curvas de igual sonoridad (ISO 226).....	196
Tabla H5. Valores de Sensación de Sonoridad de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	197
Tabla H6. Sonoridades valoradas de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	198
Tabla I1. Armónicos de E3.....	199
Tabla I2. Amplitudes absolutas y relativas de señal de armónicos de B3.....	200
Tabla I3. Niveles de presión sonora de armónicos de B3.....	201
Tabla I4. Niveles de sonoridad corregidos según curvas de igual sonoridad (ISO 226).....	202
Tabla I5. Valores de Sensación de Sonoridad de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	203
Tabla I6. Sonoridades valoradas de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.....	204
Tabla L. Tabla de valores Notas-Color para Munsell V5-C6.....	209-210
Tabla M. Tabla de valores Notas-Color para Munsell V6-C7.....	211-212
Tabla P. Datos obtenidos sobre cuestión 1ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	207-208
Tabla Q. Datos obtenidos sobre cuestiones 2ª y 3ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	219-220
Tabla R. Datos obtenidos sobre cuestiones 4ª a 11ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	221-222
Tabla S. Datos obtenidos sobre cuestiones 12ª a 15ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	223-224
Tabla T. Datos obtenidos sobre cuestiones 16ª a 20ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos.....	225-226
Tabla U1. Correspondencia ente colores y notas musicales. Scriabin.....	228

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

GLOSARIO

En el presente trabajo se utilizan términos propios en los campos de la física y percepción del color y de la acústica psicoacústica musical.

VOCABULARIO DEL COLOR

Los términos luz y color se utilizan, generalmente, para referirse a un aspecto del mecanismo visual y cuando se habla de la visión de luz o la del color, estas sensaciones son fenómenos personales que tienen lugar en la mente. Sólo se sabe que se ve, y tales sensaciones personales reciben el nombre de "fenómenos psicológicos" ya que únicamente el individuo que experimenta tal sensación la conoce.

Los términos relacionados en el siguiente vocabulario son los presentados en el V Congreso del Color en Terrassa (1999), aprobados por los Comités Nacionales de todos los miembros de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) e incorporados al Vocabulario Internacional de Iluminación.

Apagado: (dim) Adjetivo utilizado para describir niveles de luminosidad bajos.

Atlas de colores: (colour atlas) Colección de muestras de colores dispuestas e identificadas según reglas especificadas.

Color percibido de una luz: Atributo de la percepción visual que se compone de una combinación cualquiera de elementos cromáticos y acromáticos. Este atributo puede ser descrito por nombres de colores cromáticos tales como amarillo, naranja, marrón, rojo, rosa, verde, azul, púrpura, etc., o por nombres de colores acromáticos tales como blanco, gris, negro, etc., modificados por los adjetivos que refuerzan el sentido tales como luminoso, apagado, claro, oscuro, etc., o por combinaciones de tales nombres y adjetivos

Color percibido de una superficie: (surface-colour) Color percibido como perteneciente a una superficie en la cual la luz parece ser reflejada o emitida difusamente. Aspecto de la percepción visual que permite distinguir las diferencias entre dos superficies de las mismas dimensiones, forma y estructura, siendo estas diferencias de la misma naturaleza que las producidas por una diferencia del color físico de la luz utilizada. Símbolo: mayúsculas, por ejemplo E.

Ambas definiciones indican que se puede tener la misma sensación observando una luz amarilla que una superficie amarilla. En realidad no se ven los objetos, sólo se ve la luz que sale de dichos objetos; basta con apagar la luz para no ver los objetos. El color percibido depende del color físico, del tamaño, forma, estructura y entorno de la superficie del estímulo, del estado de adaptación del sistema visual del observador y de la experiencia que posea en condiciones iguales o similares. Los colores percibidos pueden presentarse de varias maneras y sus nombres tienden a distinguir diferencias cualitativas y geométricas de percepción de color; por ejemplo

color-objeto, color-superficie, color-abertura, color de película, color de volumen, color de cuerpo, etc.

Color-objeto (percibido): (object-colour) Color percibido como perteneciente a un objeto.

Color-apertura (percibido): (apertura colour) Color percibido en el cual no hay localización espacial en profundidad, como el que sería percibido llenando un orificio en una pantalla.

Color-luminoso (percibido): (luminous perceived colour) Color percibido como perteneciente a una superficie que parece emitir luz como un manantial luminoso primario, o que parece reflejar especularmente una luz de este tipo.

Color-no-luminoso (percibido): (non-luminous perceived colour) Color percibido como perteneciente a una superficie que parece transmitir o reflejar difusamente la luz como lo hace un manantial secundario de luz.

Color dependiente (percibido): (related perceived colour) Color percibido como perteneciente a una superficie vista al mismo tiempo que otros colores vecinos.

Color-independiente (percibido): (unrelated perceived colour) Color percibido como perteneciente a una superficie vista aisladamente de otros colores.

Color acromático, neutro (percibido): (achromatic perceived colour) Color percibido desprovisto de tono. Los nombres blanco, gris y negro se utilizan comúnmente para objetos transparentes o traslúcidos, incoloros o neutros.

Color cromático (percibido): (chromatic perceived colour) Color percibido que posee tono. En el lenguaje corriente, la palabra *color* se utiliza a menudo en este sentido en oposición a blanco, gris o negro; y así se dice (incorrectamente) que la sangre es de color roja. También se dice que la nieve es de color blanco pero ahora es correcto, porque el blanco es un color acromático percibido; de aquí que el blanco, los grises y el negro sean colores (acromáticos) pero no tonos. El adjetivo coloreado se refiere generalmente a un color cromático.

Color relacionado: Color percibido de una superficie vista al mismo tiempo que otros colores vecinos.

Color no relacionado: Color percibido de una superficie vista aisladamente de cualquier otro color.

Claridad percibida: (lightness perceived) Luminosidad de una superficie juzgada en relación a la luminosidad de una superficie, igualmente iluminada, que parece blanca o incolora o posee una transmitancia elevada. Símbolo: *L*
Nota.- Solamente los colores dependientes poseen claridad.

Claro: (light) adjetivo utilizado para describir niveles de claridad elevados.

Cromacidad, colorido: Atributo de la sensación visual según la cual una superficie muestra un color percibido más o menos cromático. Símbolo: *M*

El *color percibido* se especifica por el conjunto de luminosidad, tono y cromacidad. La luminosidad y la cromacidad son variables absolutas y pueden definirse sus correspondientes relativas.

Cromacidad; colorido: (chromaticness; colourfulness) Atributo de una sensación visual según el cual una superficie parece presentar un color percibido más o menos cromático.

Nota 1.- Para un estímulo de color de una cromaticidad dada y, en el caso de colores dependientes, de un factor de luminancia dada, la cromacidad aumenta cuando la luminancia se eleva, excepto cuando la luminosidad es muy alta.

Nota 2.- Antiguamente el término *cromacidad* designaba la percepción combinada de tono y saturación, es decir la correspondiente perceptual de la cromaticidad.

Cromaticidad percibida: (perceived chromaticity) Atributo de un estímulo de color definido por sus coordenadas de cromaticidad o por su longitud de onda dominante o complementaria, conjuntamente con su pureza. Atributo de la sensación visual formado por el tono y la saturación.

Croma percibido (de un color relacionado): (chroma) Cromacidad de una superficie evaluada en proporción a la luminosidad de otra superficie, igualmente iluminada, que parece blanca o incolora o tiene una transmitancia elevada.

Símbolo: *C*

Nota.- Para unas condiciones de observación dadas y para unos niveles de luminancia dentro de los límites de la visión fotópica, un estímulo de color percibido como color dependiente, de una cromacidad dada y que proviene de una superficie con un factor de luminancia dado, presenta un croma aproximadamente constante para todos los niveles de iluminancia, excepto cuando la luminosidad es muy elevada. En las mismas condiciones y para un nivel de iluminancia dado, si el factor de luminancia aumenta, el croma generalmente también aumenta.

Los adjetivos utilizados para describir niveles altos de las variables percibidas relacionadas con la cromacidad son: *saturado, cromático, puro, intenso, vivo o fuerte*. Los adjetivos utilizados para describir niveles bajos son: *sucio, gris, apagado*.

El *color percibido de un color relacionado* se especifica con el conjunto de claridad, tono y croma.

El *color percibido de un color no relacionado* se especifica con el conjunto de luminosidad, tono y saturación. También se especifica con el conjunto de luminosidad y cromaticidad.

Espacio de color: (colour space) Representación geométrica de los colores en el espacio, generalmente de tres dimensiones.

Estímulo de color: (colour stimulus) Radiación visible que penetra en el ojo y produce una sensación de color, sea cromática o acromática.

Iluminante: (illuminant) Radiación con una distribución espectral relativa de energía definida en el intervalo de las longitudes de onda que influyen en la percepción del color de los objetos

Iluminante luz de día: (daylight illuminant) Iluminante que tiene la distribución espectral relativa de energía idéntica o casi idéntica a la de una fase de la luz de día.

Iluminantes patrones CIE: (CIE standard sources) Los iluminantes A, B, C, D65, así como los otros iluminantes D, definidos por la CIE en función de sus distribuciones espectrales relativas de energía.

Nota.- Estos iluminantes intentan representar:

- A, la radiación planckiana de una temperatura de 2856 K aproximadamente;
- B, la radiación de la luz solar directa (obsoleto);
- C, la luz de día media;
- D65, la luz de día incluyendo la región ultravioleta.

Luminosidad percibida: (perceived brightness) Atributo de la sensación visual según la cual una superficie emite, transmite o refleja más o menos luz. Símbolo: Q

luminoso: (bright) Adjetivo utilizado para describir niveles de luminosidad elevados.

Luz percibida: (perceived light) Atributo de todas las percepciones o sensaciones peculiares del sistema visual que se producen por la intervención de una luz física.

La *luz percibida* se especifica mediante la luminosidad percibida. Esta variable se puede aplicar a superficies emisoras (fuentes, radiaciones) como a superficies receptoras (reflectoras o transmisoras) y es la única variable asociada a todas las luces físicas.

Los términos luz y color se utilizan, generalmente, para referirse a un aspecto del mecanismo visual y cuando se habla de la visión de luz o la del color, estas sensaciones son fenómenos personales que tienen lugar en la mente. Sólo se sabe que se ve, y tales sensaciones personales reciben el nombre de "fenómenos psicológicos" ya que únicamente el individuo que experimenta tal sensación la conoce.

Oscuro: (dark) Adjetivo utilizado para describir niveles de claridad bajos.

Pureza: (purity) Medida de la proporción de las cantidades de un estímulo monocromático y de un estímulo acromático especificado que, cuando se mezclan aditivamente, igualan al estímulo de color considerado.

Nota.- En el caso de estímulos púrpuras, el estímulo monocromático se reemplaza por un estímulo cuya cromaticidad está representada por un punto sobre el límite de los púrpuras.

Percepción visual: (visual perception) Interpretación de la sensación visual.

Saturación percibida: (perceived saturation) Cromacidad de una superficie evaluada en proporción a su luminosidad. Símbolo: *S*

Nota.- Para unas condiciones de observación dadas y a unos niveles de luminancia dentro del dominio de visión fotópica, un estímulo de color de una cromaticidad dada presenta aproximadamente la misma saturación para todos los niveles de luminancia, excepto cuando la luminosidad es muy alta.

Sensación visual: (visual sensation) Respuesta del sistema visual a una estimulación

Sistema de ordenación de colores: (colour order system) Clasificación de muestras de acuerdo con un conjunto de reglas de ordenación y denominación de su color, generalmente según escalas definidas.

Nota.- Un sistema de ordenación de colores generalmente se materializa por un conjunto de muestras físicas, algunas veces llamado atlas de color. Un atlas de color facilita la comunicación del color, pero no es un requisito previo para definir un sistema de ordenación de colores.

Sólido de color: (colour solid) Parte del espacio de color que contiene los colores de superficie.

Temperatura de color: (colour temperature) Temperatura de un radiador completo cuya radiación tiene la misma cromaticidad que el estímulo dado. Unidad: K

Tono percibido (de una luz): (perceived hue) Atributo de una sensación visual según el cual una superficie parece ser semejante a uno de los colores percibidos, rojo, amarillo, verde o azul o a una combinación de dos de ellos. Atributo de la sensación visual producida por una luz monocromática o por una luz compuesta cuyo espectro de emisión no es equienergético. Símbolo: *H*

Tono unitario: (unitary hue; unique hue) Tono percibido que no puede ser descrito utilizando nombres de tonos que no sea el suyo.

Nota.- Existen cuatro tonos unitarios: rojo, verde, amarillo y azul.

Tono binario: (binary hue) Tono percibido que puede ser descrito por una combinación de dos tonos unitarios. Por ejemplo: naranja como rojo-amarillento o amarillorrojizo; violeta como azul-rojizo, etc.

OTROS TÉRMINOS UTILIZADOS:

Color dominante: Tono de color cuya longitud de onda tiene mayor intensidad en un espectro. Color más destacado en una obra pictórica y que determina la tonalidad de la misma.

Combinación armónica: Serie de colores con dos atributos iguales.

Combinación armónica consistente: Serie de colores con un solo atributo igual.

MODELOS DE COLOR

Sistema MUNSSELL

Es el sistema de ordenación de color más estudiado, basado únicamente en la percepción humana del color. Su autor era pintor y estableció (en 1915) una base científica para especificar los colores que utilizaba en su trabajo y sobre todo para enseñar a sus alumnos. Está formado por una colección de muestras a las que se asignan tres números, cuyas escalas son iguales visualmente, de modo que sirven para la especificación y descripción exactas del color, bajo condiciones normalizadas de iluminación y observación. Las coordenadas de este espacio de color son el *Value* *V*, el *Hue* *H*, y el *Chroma* *C*, equivalentes a los atributos visuales claridad, tono y croma, respectivamente.

Para las muestras coloreadas se eligen cinco *Hue* principales: rojo, R, amarillo, Y, verde, G, azul, B, y púrpura, P; y cinco *Hue* intermedios: amarillo-rojo, YR, verde-amarillo, GY, azul-verde, BG, púrpura-azul, PB, y rojo-púrpura, RP.

El *Value* indica el grado de claridad de un color en relación a una escala de grises neutros, que va desde el negro absoluto, notación 0/, al blanco absoluto, notación 10/, y está formada por unas muestras grises de modo que cada par de muestras sucesivas presenta siempre la misma diferencia percibida de claridad. Si la escala del *Value* se representa según un eje vertical ascendente de 0 a 10, a cualquier altura de este eje se puede centrar un círculo y sobre la circunferencia se representará la escala del *Hue* con los diez matices principales y secundarios (figura).

Entonces la escala del *Chroma* viene dada por el radio de este círculo, para el que tanto el *Value* como el *Hue* son constantes; así, el *Chroma* indica el grado de separación de un color dado respecto al gris de la misma claridad. Esta escala empieza con el gris neutro, notación /0, y termina con valores que dependen del tono elegido, por ejemplo /12; esto significa que el extremo está abierto.

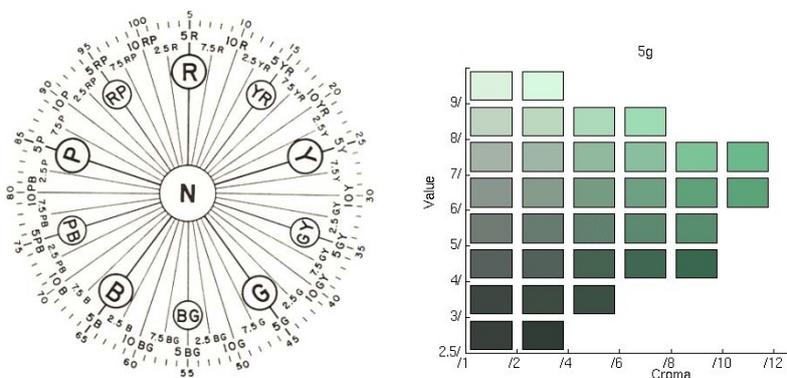


Figura 2. Sistema Munsell.

La notación *Munsell* para un color cromático se escribe simbólicamente como H V/C, por ejemplo la notación para una muestra "bermellón" puede ser 5R 5/14, mientras que para una muestra "rosa" sería 5R 5/4, es decir, sólo hay una diferencia en el *Chroma*. Sólo los *Hue* principales y los cinco intermedios se indican con letras, utilizando números para las subdivisiones del tono. La notación para un color neutro (acromático) se escribe N V/, por ejemplo, para una muestra negra muy oscura sería N 1/; para una muestra blanca muy clara es N 9/. No hay límite a la nomenclatura utilizada y a la interpolación de cualquier muestra utilizando decimales en cada escala puede dividirse tanto como sea necesario para incluir, de modo exacto, cualquier color.

Modelo RGB

Reproduce el color en una pantalla de visualización de datos, sea la tecnología que sea (CRT, LCD, plasma, LED, etc), basada en la mezcla aditiva de luces, mediante el uso de los tres colores primarios aditivos rojo (1,0,0), verde (0,1,0) y azul (0,0,1). El modelo está representado por un cubo unitario definido por los tres ejes coordenados R, G y B, en cuyo origen se sitúa el negro. Los vértices del cubo situados sobre los ejes representan los colores primarios y los vértices restantes representan los colores aditivos secundarios amarillo, cian y magenta. Como el modelo está basado en la mezcla aditiva, los colores primarios se suman para producir otros colores. Cada punto contenido en el cubo se representa por (R, G, B) donde cada coordenada varía de 0 a 1 (a veces este intervalo puede cambiar, por ejemplo, de 0 a 999); así, el magenta se obtiene mezclando rojo y azul y se sitúa en el punto (1,0,1). El eje de grises se representa a lo largo de la diagonal entre los puntos (0,0,0), negro, y (1,1,1), blanco, y cada punto representa un color que tienen la misma contribución de cada color primario.

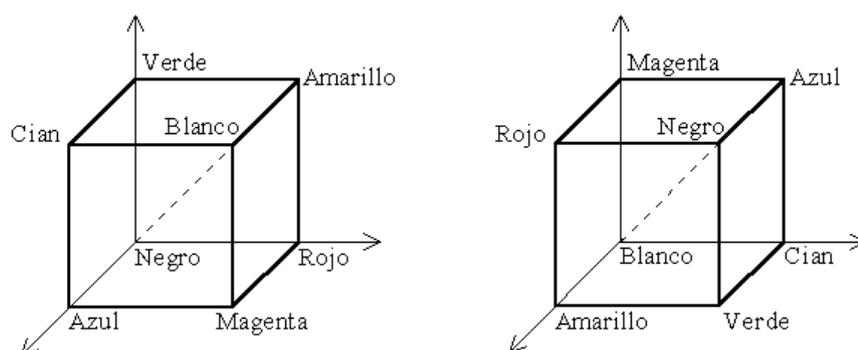


Figura 3. Modelo RGB

Modelo HSV

Sistema de color desarrollado por Alvey Ray Smith (1978) e inspirado en la forma como los artistas describen y mezclan el color. Las variables utilizadas son el Tono, Saturación y Luminosidad (*Hue, Saturation, Value, HSV*). La geometría del modelo

es una pirámide hexagonal invertida, cuya base superior es el círculo cromático en cuya circunferencia se dispone el tono angular, H, empezando por el rojo (0°) pasando por el amarillo (60°), verde (120°), cian (180°), azul (240°), hasta el magenta (300°). El eje del cono contiene todos los grises neutros y define el *value* V, que varía desde 0 (negro), dispuesto en el vértice, hasta 1 (blanco), situado en el centro de la base de la pirámide. Como en las paletas de los artistas plásticos, cada color se obtiene por mezcla de los colores primarios (amarillo, cian y magenta) y se oscurece por adición de negro. Cada plano perpendicular al eje V tiene como sección un hexágono y la distancia de cada punto de éste respecto a su centro determina la escala de saturación S. Los colores acromáticos ocupan el eje del sólido correspondiendo a saturación S=0 y con el tono H indefinido. [33].

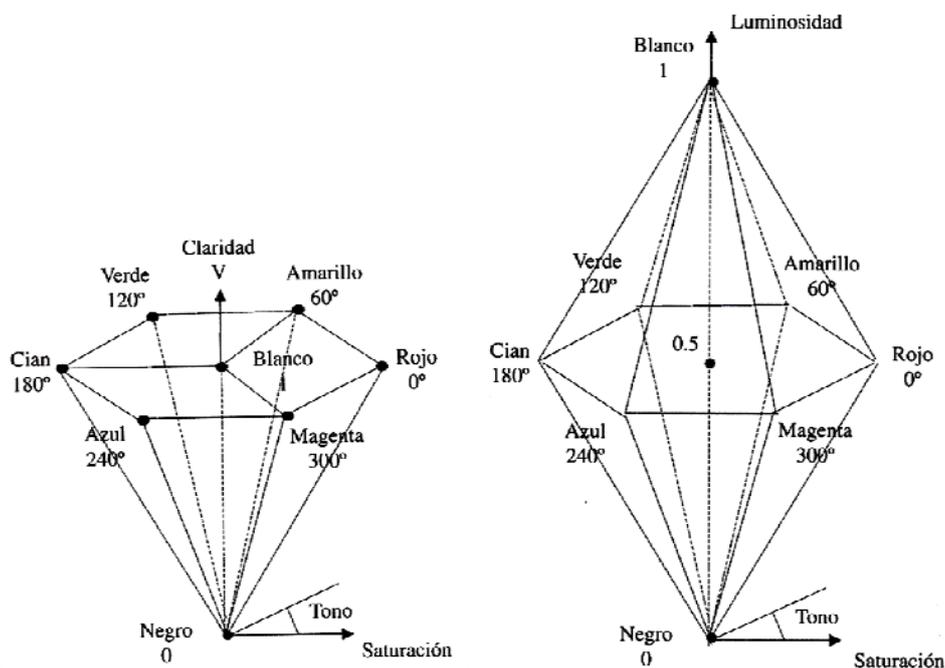


Figura 4. Modelo HSV (izquierda) y HLS (derecha)

Modelo HLS

Modelo desarrollado por Gerald Murch en Tektronix. Utiliza atributos de Tono, Claridad y Saturación (*Hue, Lightness, Saturation* HLS). A diferencia del anterior la geometría del sistema viene dada por una pirámide hexagonal doble. El círculo cromático es idéntico al anterior (en algunos programas empieza con el azul y sigue el mismo orden anterior) y está situado en el centro del eje de claridad, es decir en $L=0.5$. A medida que crece la claridad el círculo cromático disminuye el radio, hasta alcanzar el valor $L=1$ que representa el blanco y está sobre el vértice superior; en el vértice inferior se sitúa el negro. Esta ordenación está más acorde con la percepción del color, ya que un blanco perfecto debe reflejar toda la luz que le llega, mientras que una zona coloreada absorbe parte de la luz y tiene una menor claridad. La escala de saturación se construye igual que antes. [33]

TÉRMINOS RELATIVOS A PSICOACÚSTICA MUSICAL

Todos los sonidos generados por la naturaleza, inclusive los generados por la vibración de cualquier elemento como puede ser una cuerda de una guitarra, o el aire que pasa dentro de los tubos de un instrumento de viento, además de la frecuencia principal que generan, producen armónicos, generalmente con volumen más bajo, que guardan una relación matemática con el sonido principal, esta relación es el doble de la frecuencia del sonido principal, el triple, cuatro veces la frecuencia del sonido principal, etc.

Es ésta la razón por la cual el oído humano, junto con el cerebro, han evolucionado de forma tal, que al escuchar los sonidos cuyas frecuencias están en la proporción simple ($2/1$, $3/2$, $4/3$, etc.), los reconoce como un sonido agradable (consonancia).

La variedad de tonos que nuestro oído es capaz de percibir es muy elevada, estando acotada tan sólo por los límites de sensibilidad de nuestro sistema auditivo, normalmente desde los 20 Hz hasta los 20.000 Hz. Teniendo en cuenta que el oído humano puede diferenciar sonidos con 1 Hz de diferencia, bien podríamos tener una cantidad ingente de notas en nuestra escala musical. Ahora bien, de este espectro sonoro es preciso elegir ciertas frecuencias o tonos con las que podamos disponer de un conjunto de sonidos que permitan la construcción de las melodías. Del mismo modo que un pintor requiere unos determinados colores en su paleta para hacer sus cuadros, el músico necesita una escala musical concreta con la que componer y ejecutar su música.

La gama usual de frecuencias de los sonidos musicales, es considerablemente más pequeña que la gama audible, siendo el tono más alto de un piano el de frecuencia 13.186 Hz, este valor podemos considerarlo como el límite superior de los tonos fundamentales.

El origen de la escala musical

En música, al emitirse dos o más sonidos simultáneos se dice que se produce un acorde, que puede ser consonante o disonante según que la sensación experimentada sea agradable o desagradable. La experiencia enseña que la sensación percibida depende de la relación matemática entre ellas, es decir, del intervalo (cociente de las frecuencias, tomando siempre como numerador la mayor frecuencia), siendo esta sensación tanto más agradable cuanto más simple es el intervalo entre los dos sonidos. Así, las relaciones entre frecuencias con proporciones simples de $2/1$, $3/2$, $4/3$, etc. son más agradables.

En la música es muy importante la relación que existe entre la frecuencia de los distintos sonidos, a esta relación se le llama intervalo. Los intervalos musicales pueden medirse en términos de la relación de frecuencias de los sonidos, aunque en música reciben nombres propios cuya correspondencia física depende del tipo de escala utilizada. Los más importantes, por su simplicidad y su importancia a la hora de construir la escala musical, son:

La octava. Cuando la cuerda medía un medio del total, el sonido se repetía, pero más agudo. La octava es lo que correspondería a un salto de ocho teclas

blancas del piano; o mejor dicho, una octava es la repetición de un sonido con una cuerda con la mitad de longitud, por tanto, otra nota armoniosa. Su frecuencia es doble.

La quinta es otro intervalo entre notas que se obtiene con una cuerda de longitud dos tercios de la inicial. Su frecuencia es de tres medios del sonido inicial. Corresponde a un salto de cinco teclas blancas en un piano.

La cuarta es, como las anteriores, otro intervalo entre notas que se obtiene con una cuerda de longitud tres cuartos de la inicial. Su frecuencia es cuatro tercios de la nota inicial.

La Escala Natural

Tomando como base (nota fundamental) la frecuencia de 55 Hz (nota La más grave del piano) y multiplicando por 2, 3 y así sucesivamente, se obtienen distintas frecuencias que constituyen distintas notas musicales. Estos valores de frecuencias se pueden ordenar en octavas (sucesiones de ocho frecuencias comprendidas entre dos notas con una relación del doble de valor entre ellas) y asignar su nota musical equivalente.

1ª Octava	55							
2ª Octava	110				165			
3ª Octava	220		275		330		385	
4ª Octava	440	495	550	605	660	715	770	825
5ª Octava	880							
	La	Si	Do	Re	Mi	Fa	Sol	
	A	B	C	D	E	F	G	H

Tabla 1. Formación de octavas. La 5ª "octava" estaría formada por dieciséis notas de frecuencias 880, 935, 990, 1045, 1100, 1155, 1210, 1265, 1320, 1375, 1430, 1485, 1540, 1595, 1650 y 1705 Hz

La primera serie de octavas sólo contiene la nota de frecuencia 55 Hz, la segunda octava tiene las notas de frecuencias 110 Hz y 165 Hz, la tercera octava se completa con cuatro notas de frecuencias 220 Hz, 275 Hz, 330 Hz y 385 Hz, y la cuarta octava tiene una serie de ocho notas (octava completa). La distancia musical entre la nota principal (La 55 Hz) y la segunda armónica (La 110 Hz) es 2/1 (octava). La distancia musical entre la segunda nota armónica (La 110 Hz) y la tercera armónica (Mi 165 Hz) es 3/2 (quinta), como entre las notas A4 y E5. La distancia entre la tercera armónica (Mi 165 Hz) y la cuarta armónica (La 220 Hz) es de 4/3 (cuarta), como entre las notas E5 y A5.

Las relaciones entre las notas de una octava completa son:

440	8÷9	495	9÷10	550	10÷11	605	11÷12	660	12÷13	715	13÷14	770	14÷15	825	15÷16	880
A4		B4		C5		D5		E5		F5		G5		H5		A5
1:1		9:8		5:4		11:8		3:2		13:8		7:4		15:8		2:1

Tabla 2. Relaciones entre cotas de una octava completa. (La frecuencia 440 Hz es la 8ª armónica de la fundamental de 55 Hz y la frecuencia 495 Hz es la 9ª armónica de la fundamental de 55 Hz. Así, la relación entre ambas frecuencias es de 8 a 9).

En las celdas intermedias (entre notas) de la primera fila de la tabla 2 se indican las distancias entre las frecuencias contiguas, y en las celdas de la fila inferior se indica la distancia con respecto a la frecuencia de 440 Hz. La escala construida se conoce como escala natural.

La Escala Pentatónica

Los músicos antiguos, que no tenían el concepto de escala natural, afinaban las cuerdas (o en el caso de instrumentos de viento, adecuaban su longitud y grosor, distancia entre agujeros, etc.) de manera que produjeran un sonido lo más agradable posible para el oído humano.

Dentro de una octava, la combinación de sonidos más pura es la quinta, es decir, el intervalo musical entre dos notas cuyas frecuencias se relacionan como 3:2 (en el caso anterior, estas notas son A y E). Tomando como base la nota A4 y desplazándose dos quintas hacia arriba y hacia abajo, se tiene siguiente serie de 5 sonidos: 195,56 Hz, 293,33 Hz, 440 Hz, 660 Hz y 990 Hz. Estas frecuencias están más cerca de los valores de las notas G3, D4, A4, E5 y B5 en la escala temperada.

195,56	3:2	293,33	3:2	440,00	3:2	660,00	3:2	990,00
G3		D4		A4		E5		B5

Tabla 3. Sucesiones de quintas.

Transportándolas a la misma octava (multiplicando o dividiendo por 2 cuando sea necesario) se obtiene la siguiente sucesión de notas:

293,33	9:8	330,00	32:27	391,11	9:8	440,00	9:8	495,00	32:27	586,67
D4		E4		G4		A4		B4		D5

Tabla 4. Escala pentatónica.

La distancia de 9/8 se llama tono (T). La distancia de 32/27 es igual a 1,5 tonos (TS). Esta serie de cinco intervalos musicales, T-TS-T-T-TS se llama escala pentatónica, y el sistema musical en que se usa esta escala, se llama pentafonía.

La pentafonía se usa en la mayoría de los sistemas musicales tradicionales, ya que es la escala más simple e intuitiva. Los Egipcios conocían y aplicaban la escala pentatónica. El famoso mural en el palacio de Assurbanipal representa la orquesta de la corte Elamita tocando una armonía simple basada en las quintas.



Figura 5. Orquesta de la corte Elamita. Mural del palacio Assurbanipal. Extraído de Curt Sachs. *The Rise of Music in the Ancient World: East and West*, first edition [W.W. Norton, 1943]

La Escala Diatónica

Dos notas de una quinta sonando al unísono producen un sonido agradable. Dentro de la quinta, se encuentra un sonido más formando un triplete donde las frecuencias se relacionan en 4:5:6. Este triplete se llama armonía. Al descubrir la armonía, los músicos antiguos empezaron a afinar sus instrumentos de manera que toda la escala musical fue compuesta de armonías continuas, como ésta:

352	5:4	440	6:5	528	5:4	660	6:5	792	5:4	990	6:5	1188
F4		A4		C5		E5		G5		B5		D6

Tabla 5. Armonía de sucesión de notas.

Transportándolas a la misma octava (multiplicando o dividiendo por 2 cuando sea necesario) se obtiene la siguiente sucesión de notas:

264	9:8	297	10:9	330	16:15	352	9:8	396	10:9	440	9:8	495	16:15	528
C4		D4		E4		F4		G4		A4		B4		C5

Tabla 6. Escala diatónica.

Esta serie de notas o distancias entre ellas se llama escala diatónica. La distancia de 9/8 es un tono, la distancia de 10/9 está muy cerca y se llama tono menor, y la distancia de 16/15 es aproximadamente igual a una mitad del tono, y se llama semitono. La serie de tonos (T) y semitonos (S): T-T-S-T-T-T-S, donde el semitono es el tercer intervalo, se llama tonalidad mayor. Para construir una tonalidad menor

hay que iniciar esta secuencia desde la nota A: T-S-T-T-S-T-T. En este caso el semitono es el segundo. La diferencia entre estas tonalidades ya había sido descubierta por los músicos antiguos: la misma melodía tocada en tonalidades diferentes (mayor o menor), tiene un carácter diferente, lo que permite expresar sentimientos mediante la variación de la tonalidad de la música. Las canciones que usan una tonalidad mayor son alegres y vivaces, mientras que las que usan una tonalidad menor son tristes y melancólicas.

La Escala Cromática o Temperada

Al descubrir las tonalidades, los músicos antiguos quisieron tener la posibilidad de pasar libremente entre ellas. Evidentemente, para hacerlo, se necesitan construir escalas mayores y menores comenzando con cada una de las siete notas que tenemos. Los resultados de esos cálculos están presentados en la siguiente tabla:

A		275,00	293,33		330,00		366,67		412,50	440,00		495,00
Am	264.00		297.00		330.00	352.00		396.00		440.00		495.00
B		278.44		309.38	330.00		371.25		412.50		464.06	495.00
Bm		278.44	297.00		334.13		371.25	396.00		445.50		495.00
C	264.00		297.00		330.00	352.00		396.00		440.00		495.00
Cm	264.00		297.00	316.80		356.40		396.00	422.40		475.20	
D		278.44	297.00		334.13		371.25	396.00		445.50		495.00
Dm	267.30		297.00		334.13	356.40		400.95		445.50	475.20	
E		275.00		309.38	330.00		371.25		412.50	440.00		495.00
Em	264.00		297.00		330.00		371.25	396.00		445.50		495.00
F	264.00		293.33		330.00	352.00		396.00		440.00	469.33	
Fm	264.00	281.60		316.80		352.00		396.00	422.40		475.20	
G	264.00		297.00		330.00		371.25	396.00		445.50		495.00
Gm	267.30		297.00	316.80		356.40		396.00		445.50	475.20	
	C		D		E	F		G		A		B

Tabla 7. Escalas mayor y menores.

Esta tabla tiene 25 sonidos diferentes (18 nuevos). Y esto no es todo, porque cada uno de esos nuevos sonidos puede engendrar su propia escala, tanto mayor como menor - ¡la octava al final va a tener cerca de 100 notas! Sería sumamente difícil tocar un instrumento de tantas teclas. Los griegos antiguos hicieron un compromiso: introducir notas "extra" sólo donde el intervalo entre las notas vecinas sea un tono entero (C-D, D-E, F-G, G-A, A-B), de manera que la distancia mínima dentro de una octava sea igual a un semitono. Como resultado de esto, las notas adicionales obtenidas ocupan las posiciones donde se encuentran las teclas negras del piano. Pitágoras propuso derivar todas las 12 notas de puras quintas. Comenzando con la nota A4 (440 Hz) se calculan quinta a quinta 6 veces multiplicando la frecuencia por $3/2$, y 6 quintas dividiendo por $3/2$:

38,63	57,94	86,91	130,37	195,56	293,33	440,00	660,00	990,00	1485,00	2227,50	3341,25	5011,88
D1#	A1#	F2	C3	G3	D4	A4	E5	B5	F6#	C7#	G7#	D8#

Tabla 8. Sucesiones de quintas.

La primera y la última nota de esa escala es la misma nota D#, aunque de diferentes octavas, la D8# está a siete octavas arriba del # . Aquí surge un problema: en esta escala no es posible pasar directamente de D1# a D8# octava a octava (multiplicando por 2 la frecuencia). Las 7 octavas no son iguales a las 12 quintas. Esta discrepancia (que es igual a $(3/2)^{12} : 2^7 = 1,013643$ aproximadamente, o sea, 0,2346 de semitono) lleva el nombre de coma pitagoreana. Si queremos preservar pura la quinta, tenemos que cambiar la octava, que es una distancia aún más fundamental en la música.

La última reforma de la teoría musical fue inspirada por un organista alemán, Andreas Werckmeister, a fines del siglo XVII. El propuso hacer todos los semitonos iguales. El problema planteado así tiene una única solución: la distancia musical entre cada una de las notas vecinas debe ser igual a la raíz doceava de 2, o sea, $2^{1/12}$. Este sistema por lo general se denomina sintonización bien temperada o temperamento igual. La escala de 12 semitonos iguales se llama escala cromática. Cada semitono a su vez se divide en 100 partes iguales que se llaman centavos de semitono. El temperamento asimismo altera la quinta, que llega a ser un poco más corta, y modifica también las demás distancias naturales, quedando pura únicamente la octava. La ventaja obtenida en la escala temperada es que se puede pasar libremente entre tonalidades eliminando la coma pitagoreana.

La comparativa entre la escala natural, la escala pitagoreana y la escala cromática se expone en la tabla siguiente.

Natural		275,00		302,50	330,00	357,50		385,00	412,50	440,00		495,00
Pitagórica	260,74	278,44	293,33	309,03	330,00	347,65	371,25	391,11	417,66	440,00	463,54	495,00
Cromática	261,63	277,18	293,66	311,13	329,63	349,23	369,99	392,00	415,30	440,00	466,16	493,88
	C4	C4#	D4	D4#	E4	F4	F4#	G4	G4#	A4	A4#	B4

Tabla 9. Escalas natural, pitagórica y cromática.

Para calcular la frecuencia de cada nota en la escala cromática, dada su escala (a cuantas teclas está de la nota de etalón La), se usa la siguiente fórmula: $F_i = 440 * 2^{i/12}$, donde i es la distancia de la nota de etalón. Si es negativa, la nota es de una frecuencia menor. *Ejemplo:* la frecuencia de la nota C4 (está 9 posiciones antes que A4) es: $440 * 2^{-9/12} = 261,63$ Hz

Otras Escalas

En el mundo no occidental existen otras escalas. En la figura 6 se representan los intervalos entre notas para distintas escalas.

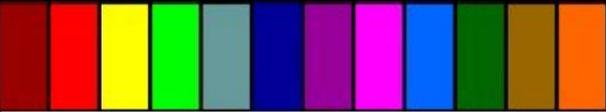
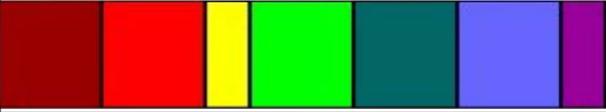
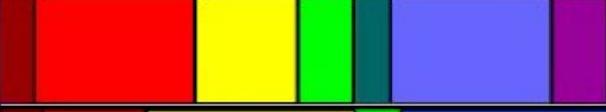
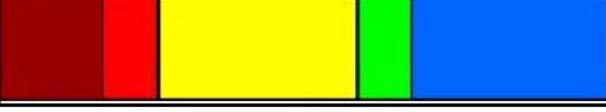
ESCALA	INTERVALOS
TEMPERADA	
DIATÓNICA	
SHREE (INDIA)	
SOROG (BALI)	
HIRAJOSHI (JAPON)	

Figura 6. Escalas. (La utilización de colores es para la mejor distinción de las notas de cada escala).

Diccionario de términos MUSICALES

A: Letra con la que se designa la nota **La** en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana (El italiano Guido de Arezzo, en el año 1026, introdujo el pentagrama e inventó la escritura de las notas do, re, mi, fa, sol, la, si).

Altura: Cualidad del sonido que determina su posición en la escala. Permite comparar dos o más sonidos y concluir que uno es más agudo o más grave que el otro. La altura depende principalmente de la frecuencia (ν) del movimiento vibratorio que lo origina, correspondiendo los sonidos agudos a las frecuencias elevadas y los graves a las frecuencias bajas.

Acorde: Emisión de dos o más sonidos simultáneos.

Acorde consonante: Emisión de dos o más sonidos simultáneos que se perciben agradables.

Anarmonicidad: Armónicos cuyas frecuencias no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. El timbre característico del piano está no solo determinado por la intensidad relativa de los distintos tonos parciales, sino también por una leve anarmonicidad.

Armonía: Técnica que consiste en la formación de acordes, la organización de los sonidos simultáneos y sus enlaces

Armónicos: Componentes de un sonido que se definen como las frecuencias secundarias que acompañan a una frecuencia fundamental o generadora.

B: Letra que designa el **Si** natural en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

C: Letra con la que se designa la nota **Do** en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

Color: Característica propia del timbre.

Consonancia: Son todos aquellos sonidos que en un determinado contexto son agradables al oído.

D: Letra que designa la nota **Re** en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

E: Letra que designa la nota **Mi** en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

F: Letra que designa la nota **Fa** en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

Fortissimo: Máxima intensidad que puede producir un sonido una voz o instrumento musical.

Fuerte: Intensidad elevada de un sonido musical producido por una voz o instrumento musical.

Frecuencia (ν): Medida de altura de un sonido según métodos acústicos y que está dada por el número de vibraciones por segundo de un cuerpo. Su forma de medida son los (Hz) **hercios**.

Fundamental: En términos acústicos es la vibración primaria o primer parcial de una serie de armónicos. Musicalmente, se entiende que la fundamental es la nota sobre la cual se construye un acorde.

G: Letra que designa la nota **Sol** en los países que no emplean la nomenclatura guidoniana.

Intensidad de sonido: Cualidad del sonido que lo clasifica en fuerte o débil. la sensación de mayor o menor intensidad depende del cuadrado de la amplitud de las vibraciones que lo producen.

Melodía: Sucesión de notas.

Natural: Nota que no tiene ninguna alteración.

Nota: Símbolo que representa un sonido aislado de altura y duración determinados.

Piano: Sonido de poca intensidad (sonido suave) producido por una voz o instrumento musical.

Pianísimo: Sonido de mínima intensidad (sonido muy suave) producido por una voz o instrumento musical.

Sonido: Sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio, de los cuerpos sonoros, transmitido por un medio elástico como el aire.

Sonido musical: Un sonido es musical cuando la vibración se mantiene (un tiempo) en el mismo tono (o frecuencia)

Tesitura: Gama de altura de notas musicales que es capaz de reproducir una voz o un instrumento musical.

Timbre: Cualidad del sonido que lo caracteriza y lo diferencia de otro. Modo propio e inigualable de sonar un instrumento musical o voz de una persona; permite diferenciar dos o más sonidos de igual altura e intensidad, pero de diversa procedencia; depende del grado de complejidad del movimiento vibratorio que origina el sonido.

Tonalidad: El sonido y escala predominantes de una pieza musical. La tonalidad es el eje de gravedad que domina a la pieza, indica cuál es la nota tónica o fundamental de una obra musical hacia donde tienden el resto de notas de la escala.

Tono: Cualidad del sonido que permite distinguir entre un sonido agudo y otro grave. Depende de la frecuencia de la con que vibra un sonido, ésta es mayor en los sonidos agudos que en los graves.

Tónica: Nota o acorde predominantes que da sensación de reposo, según la tonalidad de una obra.

Glosario de ACÚSTICA

Altura: (pitch) Sensación de mayor o menor gravedad o agudeza del sonido.

Amplitud: (amplitude) En una señal periódica o cuasiperiódica, el máximo valor (o valor de pico) en un periodo.

Análisis de espectro: (spectrum analysis) Medición cuyo objeto es determinar el espectro de un sonido o una señal.

Armónico: (harmonic) Sonido armónico.

Curvas de Fletcher y Munson: (Fletcher and Munson contours) Representación gráfica de las combinaciones de frecuencia y nivel de presión sonora que producen la misma sensación de sonoridad entre sí (ver *nivel de sonoridad*).

Diapasón: (tuning fork) Dispositivo en forma de horquilla utilizado para afinar instrumentos musicales a la afinación patrón (**La 440 Hz**). Puede utilizarse, ayudándose con un oído adecuadamente entrenado, para deducir la frecuencia de tonos puros o ruidos fuertemente tonales.

Escala: (scale) En música, conjunto de sonidos elegidos de acuerdo a un principio o serie de principios cuya combinación en sucesión y/o superposición constituyen un fragmento musical.

Escala cromática: (chromatic scale) En música, escala que contiene 12 sonidos por octava a partir de la cual se obtiene toda la música occidental y buena parte de la de otras culturas. Las frecuencias de dos sonidos sucesivos de esta escala están en proporción $2^{1/12}$.

Escala diatónica: (diatonic scale) En música, escala de 7 notas por octava compuesta por algunos tonos y semitonos. Por ejemplo, la denominada *escala mayor* tiene la siguiente estructura: **T-T-S-T-T-T-S**, donde **T** representa un tono y **S** un semitono.

Espectro: (spectrum) Diagrama en el que se representa la amplitud de las distintas componentes frecuenciales que integran un sonido o ruido (y en algunos casos también la fase).

Espectro armónico: (harmonic spectrum) Un espectro discreto en el cual todas las frecuencias son múltiplos de una fundamental. Corresponde a señales periódicas.

Frecuencia (v): (frequency) Cantidad de ciclos o periodos de una señal periódica en la unidad de tiempo (por lo general el segundo). Se expresa en **ciclos por segundo**, o lo que es lo mismo, en **Hertz (Hz)**.

Frecuencia fundamental: (fundamental frequency) Frecuencia de una señal periódica. También la frecuencia de su primer armónico, y la frecuencia de la cual todas las componentes espectrales son múltiplos.

Intensidad sonora: (sound intensity) Potencia sonora por unidad de superficie en determinada dirección.

Intervalo musical: (musical interval) Relación existente entre dos tonos consecutivos o sucesivos. Musicalmente se lo designa con la cantidad de teclas blancas de un instrumento de teclado (piano, por ejemplo) entre las notas correspondientes, incluidas ambas (por ejemplo, el intervalo entre un **do** y un **sol** es una quinta porque si consideramos la escala **do, re, mi, fa, sol**, hemos abarcado cinco notas). En Acústica se prefiere utilizar la relación de frecuencias entre ambos sonidos (en el ejemplo anterior, la relación de frecuencias es de **1,5:1**).

Intervalo armónico: Calidad de dos o más sonidos basada en el principio de la consonancia.

Longitud de onda (λ): (wavelength) Distancia recorrida por una onda periódica antes de que por el punto considerado pase un nuevo frente de onda idéntica al anterior. También longitud espacial de un ciclo completo de una onda.

Nivel de intensidad sonora: (sound intensity level) Expresión logarítmica de la intensidad sonora, referida a un valor de intensidad de referencia: $L_I = 10 \log_{10} (I/I_{ref})$, donde I es el valor medio de la intensidad sonora e $I_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Se expresa en **decibelios (dB)**. Con esta referencia, el nivel de intensidad sonora y el nivel de presión sonora coinciden muy aproximadamente para ondas esféricas en el aire.

Nivel de presión sonora: (sound pressure level) Expresión logarítmica de la presión sonora, referida a un valor de presión de referencia: $NPS = 20 \log_{10} (P/P_{ref})$, donde P es el valor eficaz de la presión sonora y $P_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$. Se expresa en **decibelios (dB)**.

Nivel de sonoridad: (loudness level) Magnitud psicofísica atribuida a un sonido de una frecuencia y un nivel de presión sonora dados, numéricamente igual al nivel de presión sonora de un tono de **1 kHz** que suena igualmente sonoro que aquél. Se expresa en **fon**.

Octava: (octave) **1.** Una relación de frecuencias igual a **2** (octava superior) o a **0,5** (octava inferior). **2.** Un intervalo musical cuyas frecuencias extremas están en relación de octava. Se verifica entre una nota y la obtenida contando 8 teclas blancas a partir de ella en un teclado (incluidas la primera y la última).

Onda sonora: (sound wave) Una onda mecánica, principalmente en el aire, especialmente con energía en la banda de audiodfrecuencias (**20 a 20000 Hz**).

Psicoacústica: (psychoacoustics) Rama de la Acústica que se ocupa de la forma en que se percibe el sonido.

Semitono: (half tone) Intervalo musical correspondiente a una relación de frecuencias de $2^{1/12} = 1,05946$.

Sonido: (sound) Onda acústica que se propaga en el aire, agua y otros medios, cuya frecuencia está comprendida entre **20 Hz** y **20 kHz**, capaz de provocar sensación auditiva.

Sonidos armónicos: (harmonics) Cada una de los tonos senoidales que constituyen un sonido periódico. Se caracterizan porque sus frecuencias son múltiplos de la frecuencia del sonido, o **frecuencia fundamental**.

Sonoridad: (loudness) Magnitud psicoacústica que cuantifica la sensación de “mayor o menor sonoridad”. Difiere del *nivel de sonoridad* en que aquél sólo pretende representar la igualdad de sensaciones, mientras que éste se propone medir la diferencia o las relaciones entre ellas. Se expresa en **son**.

Tono: (tone) **1.** Sonido periódico que evoca sensación de altura determinada. **2.** A veces, por abuso de terminología, tono puro. **3.** Un intervalo musical de alturas equivalente a multiplicar la frecuencia del sonido más grave por **1,12246**.

Tono puro: (pure tone) Sonido senoidal puro.

Velocidad del sonido: (sound speed, sound velocity) Velocidad de propagación de la onda sonora. Para el aire es de aproximadamente **345 m/s**. Se abrevia **c**.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 INVESTIGACIONES PREVIAS

La presente tesis parte de las consideraciones de correspondencia entre las variables del color (*hue*, *chroma* y *value*) y las dimensiones físicas del sonido (*tono*, *timbre* y *volumen*) respectivamente.

Correspondencias entre *hue* y *tono*

En trabajo anterior (Trabajo Fin de Máster del mismo autor) se analizaron las propuestas históricas de relación entre el color y la música expuestas por diversidad de autores a lo largo de más de tres siglos de ciencia y arte [1]. Personajes ilustres como Isaac Newton (1704), Louis Bertrand Castell (1734), A. Wallace Rimington (1893), Alexander Scriabin (1911) y otros, propusieron correlaciones entre el color y la música; algunos de ellos por puro misticismo, otros buscando un nuevo arte y otros por deformación sensitiva (sinestésia). El mismo profesor A.W. Rimington [2] describe su propio método en 1895, antes de uno de sus famosos conciertos de órgano de color en Londres:

“Si medimos la tasa de vibración visible en el primer punto rojo en el extremo del espectro, vamos a encontrar que es aproximadamente la mitad de lo que está en el extremo final violeta. Ahora, en la música, como todos sabemos, esta relación es la misma. Si tomamos la primera y última nota de una octava (por lo que me refiero a la duodécima), este último casi se ha duplicado el número de vibraciones del aire - y la primera nota de la nueva octava tiene exactamente el doble. Esto, como hemos visto, es el caso también con la banda del espectro radioeléctrico la medida en que el intervalo es una octava, la más baja de color rojo corresponde a la primera nota de la octava, y el más alto para la duodécima violeta o la última nota. Más allá de esto, el azul del espectro muestra una tendencia a una vuelta a rojo en el violeta, rojo y el extremo del espectro muestra una tendencia a la reaparición de uno azul, en el hecho de que no se pase de carmín escarlata antes que se desvanece, por lo que Sir John Herschel y otros pueden tener razón cuando se conjetura que, si nuestros ojos pueden ver, los colores del espectro visible probablemente se repiten en octavas sucesivas, en gran parte invisibles más allá de los rojos y el violeta. A partir de estas notables analogías físicas, he dividido la banda del espectro radioeléctrico en intervalos diatónicos o notas, en la misma disposición que la de la escala musical...”

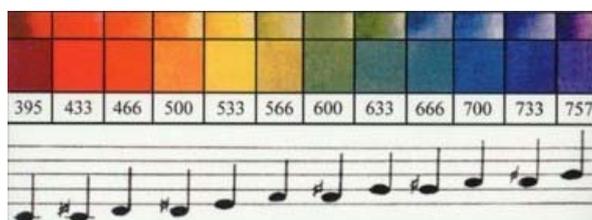


Figura 7. Relación de colores con notas musicales. (Rimington. 1895).

Autores más contemporáneos como Maitland Graves en 1941 [3], Garner en 1978 [4], Alan Wells en 1980 [5], Rachel Sebba en 1991 [6] o Ralph Pridmore en 1992 [7]

retoman la propuesta de asignación de tonos de color a las notas de la escala del sistema temperado.

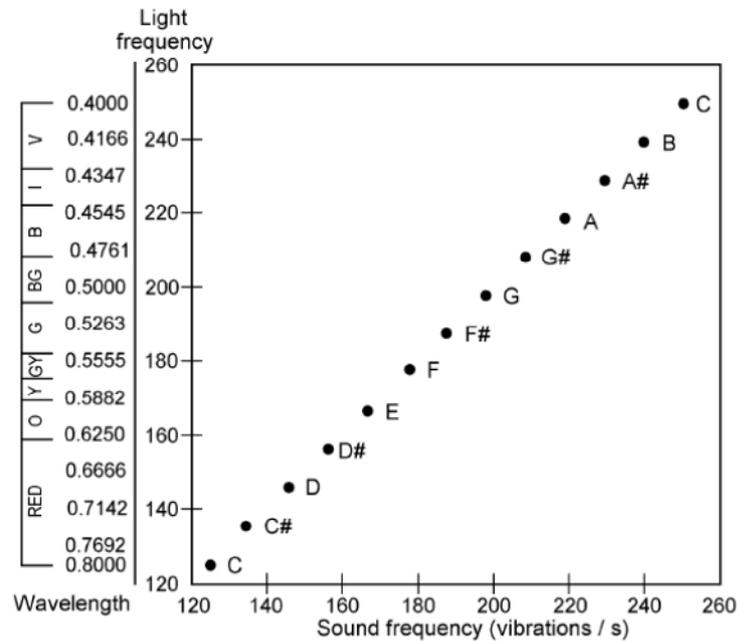


Figura 8. Relación entre las frecuencias de los sonidos y de los colores propuesta por Garner (1978). Las notas musicales son nombradas, según la usanza anglosajona, por las letras del alfabeto: A-B-C-D-E-F-G = la-si-do-re-mi-fa-sol.

Caivano [8] juega con una correspondencia entre círculos cromáticos y escalas musicales. Cerrando siempre el ciclo de notas a la par que el círculo de colores.

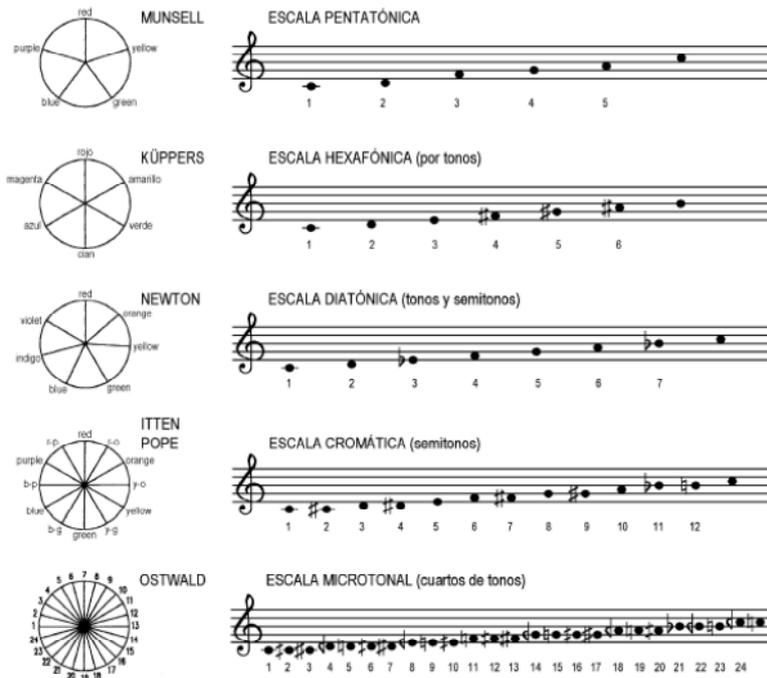


Figura 9. Correspondencia entre algunos círculos de colores y algunas escalas musicales. (Caivano 1992).

Del análisis de las propuestas expuestas se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Existe una coincidencia entre todos los autores en la asignación de los tonos de color dentro de la escala musical temperada.
- Existe diversidad de propuestas respecto a las relaciones entre los tonos de color y con las notas musicales.

Notas musicales	Colores asignados				
	Newton	Castel	Wallace	Scriabin	De Maistre
C	Rojo	Azul	Verde	Verde	Amarillo
C#		Naranja	Amarillo		
D	Amarillo	Verde	Naranja	Amarillo	Verde
D#		Amarillo	Naranja		
E	Naranja	Amarillo	Amarillo	Cian	Azul
F	Amarillo	Naranja	Verde		Azul
F#		Naranja	Verde	Púrpura	
G	Verde	Rojo	Cian	Naranja	Púrpura
G#		Rojo	Cian		
A	Cian	Rosa	Púrpura	Verde	Rojo
A#		Púrpura	Azul		
B	Azul	Púrpura	Rosa	Azul	Naranja

Figura 10. Comparativa de las diferentes propuestas entre colores y notas musicales. (Pérez 2009).

- La asignación de tonos de color a notas musicales no fue científicamente comprobada.

Todos los autores quedan atrapados por la octava. Se dejan llevar por los conceptos de orden de la escala musical temperada, creyendo que sólo existen 12 notas musicales y que éstas se repiten octavadas. Reiteran el argumento de que el rango auditivo comprende cerca de diez octavas mientras que el rango visible (óptico) apenas cubre una "octava"; para Newton, Wallace o Scriabin, cualquier nota "Do" se corresponderá con el color rojo. Quizás no hubiesen hecho estas propuestas de 87 notas audibles (en el sistema temperado) y con distinta notación: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, etc.

En un trabajo anterior (Trabajo Fin de Máster del mismo autor) se comparó la dimensión **tono de color** con la dimensión **altura de sonido** buscando una relación matemática entre los valores de los espectros de luz visible y del sonido musical. La propuesta inicial de mi trabajo previo se basó en relacionar todo el rango del espectro visible con todo el rango del espectro musical audible. Se partió de la idea de que desde los 16 Hz hasta los 20000 Hz podrían generarse infinidad de sonidos, siendo todos ellos discernibles perceptualmente por su altura. Tras varios ensayos se obtuvo la expresión matemática que relaciona longitudes de onda entre el tono de color con la nota musical correspondiente: $\lambda_c = 72,135 \cdot \ln(\lambda_m) + 577,76$, donde λ_m es la longitud de onda (345/frecuencia en Hz) de la nota musical en metros, y la función \ln es el logaritmo neperiano, o en base e, y λ_c es la longitud de onda óptica en nanómetros.

Así, por ejemplo, para la nota musical A4 (440 Hz) tenemos que su longitud de onda óptica es 540,2 nm, muy cercana al pico de 550 nm de la curva de eficacia luminosa (envolvente de las sensibilidades espectrales de los 3 fotorreceptores retinianos para la visión del color) del sistema visual humano, o mejor conocida como V_{λ} , clave para fotometría y colorimetría, y por tanto para la percepción visual humana.

Similar a mi propuesta está la de Rangel [9], la cual relaciona las longitudes de onda del espectro visible con las notas del piano, pero no abarca como en mi propuesta todo el rango de percepción auditiva del ser humano.

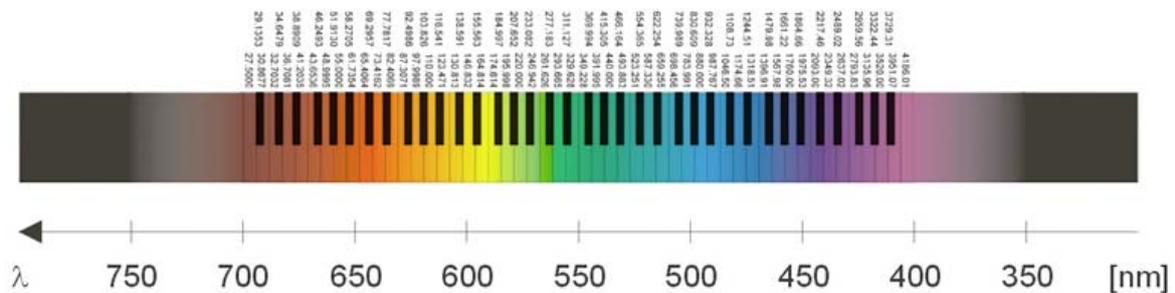


Figura 11. Propuesta de relación entre tonos de color y notas musicales. (Rangel 2009).



Figura 12. Espectro visible (en nm). Representación en orden inverso para su mejor relación con la disposición de las teclas del piano.

Comparando las figuras 11 y 12, y relacionando las longitudes de onda, se puede observar que la propuesta de Rangel no abarca musicalmente todo el espectro visible.

Correspondencias entre *chroma* y *timbre*

La correspondencia entre **saturación** y **timbre** ha sido propuesta por Woodworth y Schlosberg [10] y también Pridmore [7]. Dichos autores sólo mencionan las correspondencias, sin apoyo de argumentos, referencias o fuentes que puedan sustentar las propuestas.

El propio Caivano [8] en 1992 expone:

"En algunos experimentos parciales, donde presenté a diversas personas series de sonidos de distinto timbre y colores de distinta saturación, aproximadamente el ochenta por ciento de las personas relacionaron los sonidos puros con los colores saturados y el ruido con los grises o acromáticos —resultados que concuerdan con el correlato físico— mientras que solo el 20 por ciento de la gente hizo la elección contraria".

En 2003 es el propio Caivano quien desmiente esta afirmación [11]. En encuesta realizada obtuvo un resultado de un 22% en la relación entre timbre-saturación; en cambio, el timbre fue mayormente asociado al tono:

"La escala de timbre en sonido fue muy asociada con la escala de tinte en color; el 62% de los sujetos hizo este correlato".

Correspondencias entre *value* y volumen

La magnitud física de intensidad radiante (luminancia en cd/m^2 a nivel fotométrico y psicofísico) se corresponde, en el aspecto perceptivo, con la luminosidad o claridad en los sistemas de ordenación del color. La magnitud física de intensidad sonora se corresponde con la sonoridad, magnitud que se percibe cuando se habla de sonidos fuertes o débiles.

La correlación entre el *value* con la sonoridad deriva de la relación entre las variables físicas de intensidad de luz con intensidad de volumen. La lógica indica que colores claros se deben corresponder con sonidos fuertes, mientras que colores oscuros con sonidos débiles. En los extremos, el negro (la ausencia de luz) equivaldría al silencio (la ausencia de sonido) y el blanco (la máxima percepción de luminosidad) equivaldría al máximo volumen perceptible.

La correspondencia ente **luminosidad** y **sonoridad** ya fue propuesta por Stevens y Guirao [12] quienes realizaron un experimento en el que una serie de observadores utilizaron la longitud aparente de una línea como variable para representar la sonoridad y la luminosidad. Si bien los autores no lo establecen explícitamente, están reconociendo una cierta relación entre la sonoridad y la luminosidad. Por otro lado, los observadores representaron una mayor sonoridad y una mayor luminosidad con una mayor longitud de línea. Así mismo, en el año 1984, Pridmore [7] construyó un transductor de estímulos sonoros en estímulos lumínicos de color, donde la sonoridad se representaba por medio de la luminosidad.

Primer encuentro color-música

Siendo que un color es el resultado de una mezcla de longitudes de onda con diversos flujos luminosos (en lm), y que un sonido musical es la composición de varias notas armónicas, he buscado un encuentro entre color y música basado en las imágenes gráficas de sus espectros. Esta relación se concibe por lo escuchado a artistas pintores en su análisis de obras pictóricas (... "este color contiene rojo, azul, ...") cuando un observador, lego en la materia, solo ve un color. Así, la observación del espectro de una hoja de abedul (figura 13) en una ficha MUNSSELL motivó el estudio comparativo gráfico de los espectros musicales y de color.

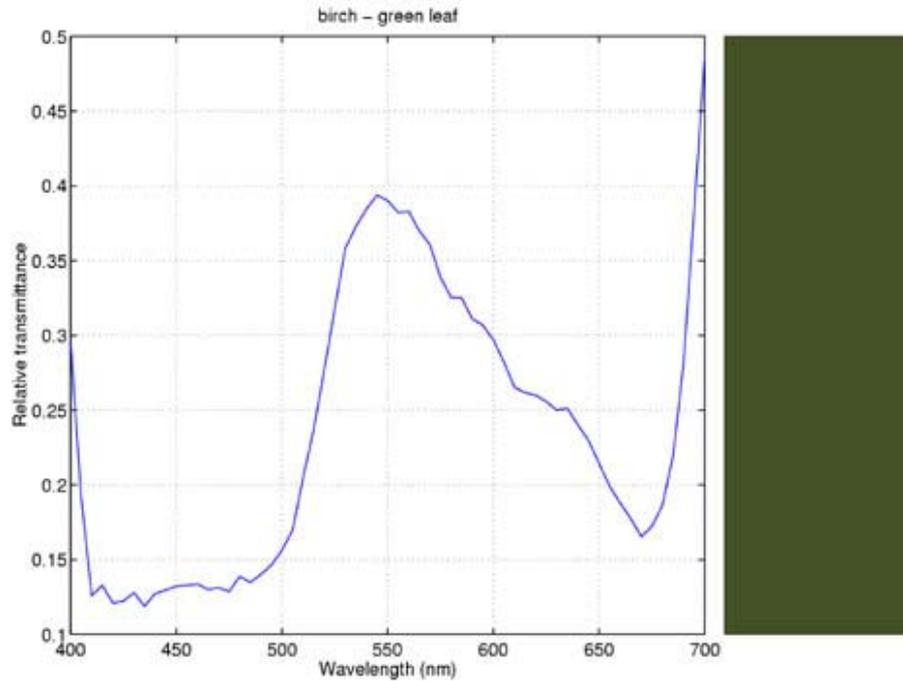


Figura 13. Espectro de transmitancia de la hoja de abedul.

Para el estudio de esta relación, se consideró la correspondencia propuesta en el TFM entre tono de color y nota musical. El espectro de un determinado color podría estar compuesto por aquellas longitudes de onda correspondientes a sus mismas notas de armónicos componentes de la nota fundamental relativa a ese tono de color.

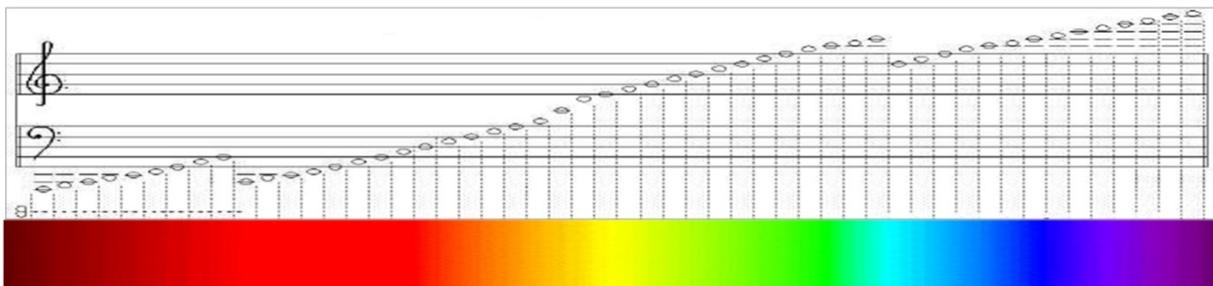


Figura 14. Posición relativa de las notas musicales en el espectro de color. Correspondencia entre tonos de color y notas musicales. (Pérez 2009).

Con estas premisas iniciales, se generaron toda la serie de colores relativos a las notas musicales del sistema temperado (anexo C). Partiendo de los valores de las longitudes de onda de todas las notas musicales del sistema temperado, dentro del rango audible, se obtuvieron, por medio de la relación $\lambda_c = 72,135 \cdot \ln(\lambda_m) + 577,76$, los valores de las λ_c correspondientes.

A partir de estos valores y mediante el programa informático Spectra se obtuvieron los correspondientes valores R,G,B para cada λ_c , pudiéndose crear el "círculo cromático tonal-musical" (figura 15). Mediante programa informático gráfico AutoCAD, se generaron las muestras de color correspondientes a valores R,G, B, las cuales fueron impresas sobre papel blanco.

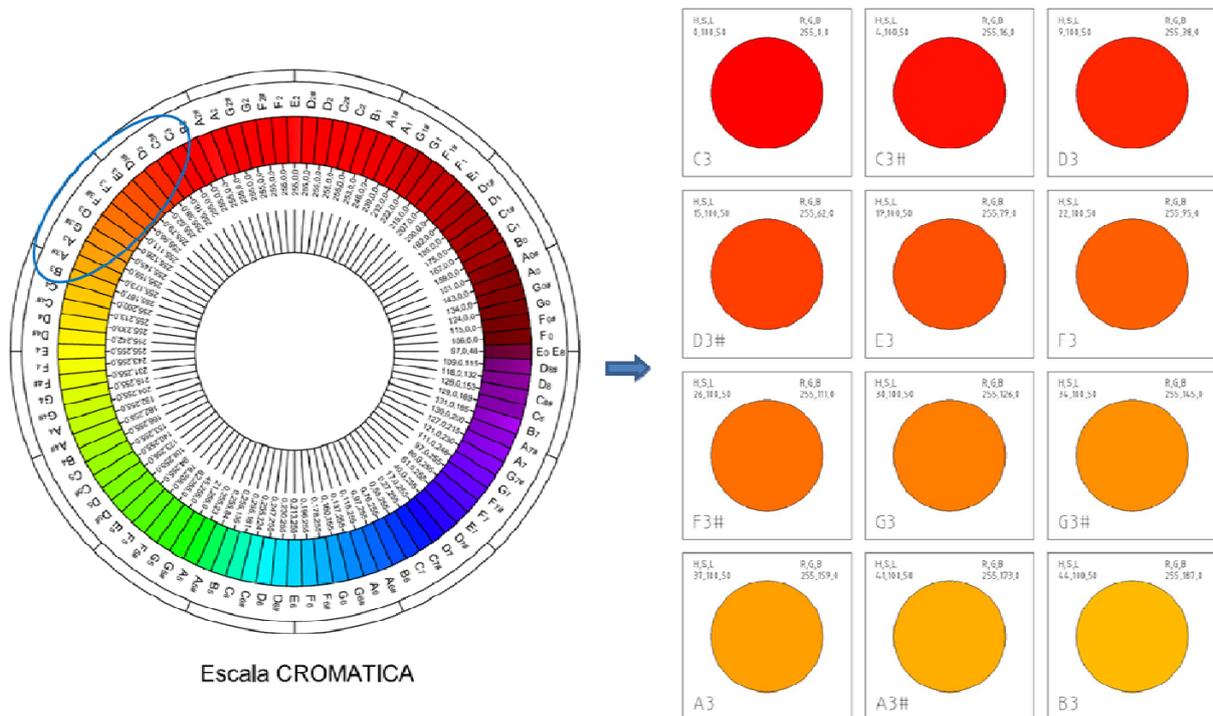


Figura 15. Escala cromática tonal-musical y muestras de colores impresos correspondientes a la escala cromática de C3.

De las muestras impresas se obtuvieron los valores de reflectancia espectral XYZ/Yxy para el iluminante D65 y observador a 10° , mediante un espectrofotómetro Minolta CM-3600d. Con los valores de reflectancia para cada longitud de onda (de 400 a 700 nm en intervalos de 10 nm) de cada color se generaron espectros de colores individuales y de series de colores correlativas a las notas musicales formando acordes, armónicos y sucesiones de octavas.

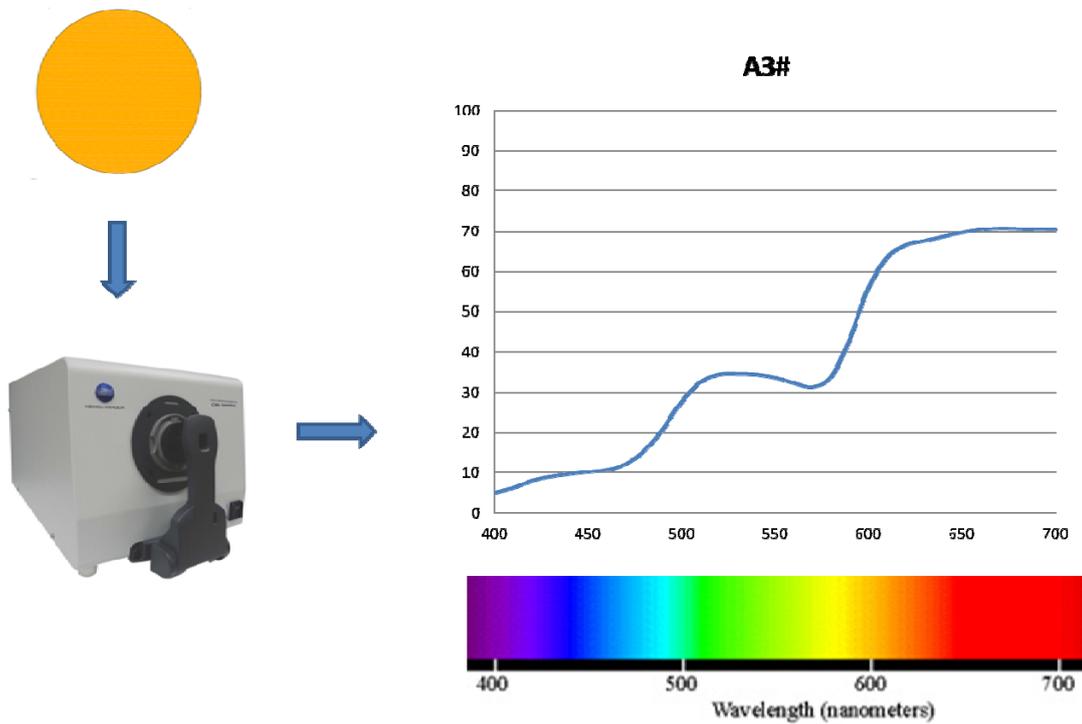


Figura 16. Espectro de color (255,173,0) correspondiente a la nota A3#.

Así mismo, se generaron sonidos de notas musicales emitidas por instrumentos tradicionales como el corno, fagot, violonchelo y piano. La generación de sonidos se realizó mediante el programa informático de creación y edición musical Harmony Assistant. A partir de los ficheros de las notas musicales generadas (formato wav), se obtuvieron sus espectros de armónicos mediante la utilización del programa informático Matlab.

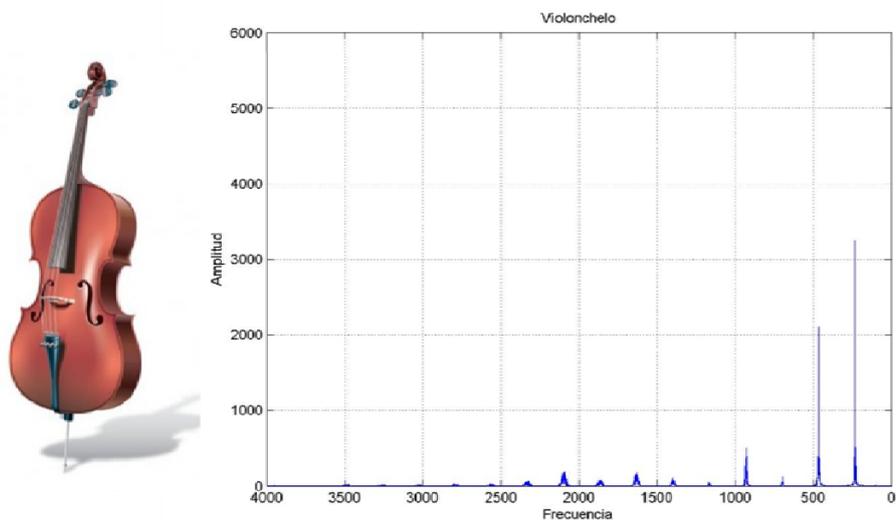


Figura 17. Espectro de armónicos de A3# para violonchelo. (Frecuencia en Hz)

A partir de los espectros de cada nota se obtuvo la curva evolvente de armónicos (línea que une las amplitudes máximas de cada armónico).

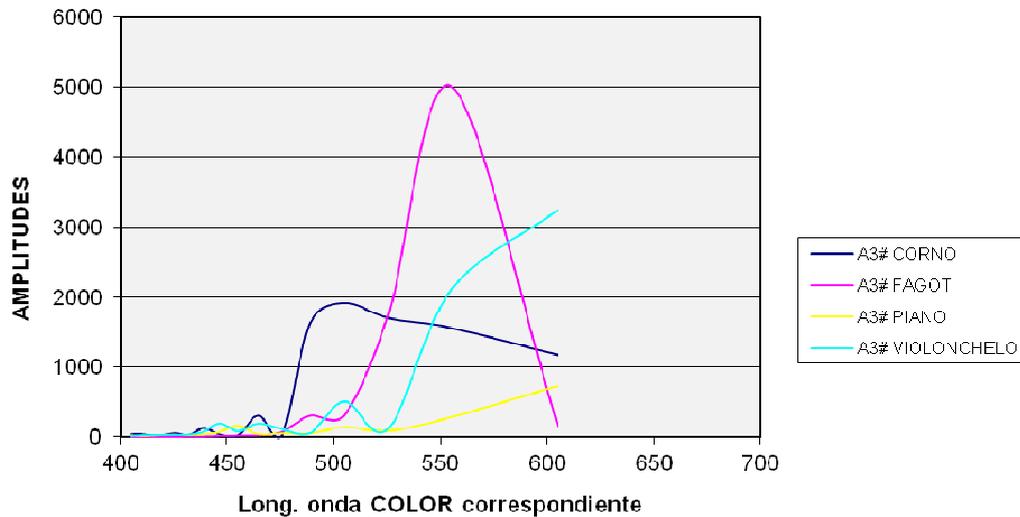


Figura 18. Evolventes de armónicos de A3# para corno, fagot, piano y violonchelo. (Long. de onda en nm)

Buscando una semejanza de imágenes, se compararon los gráficos de espectros de color con los gráficos de evolventes de armónicos.

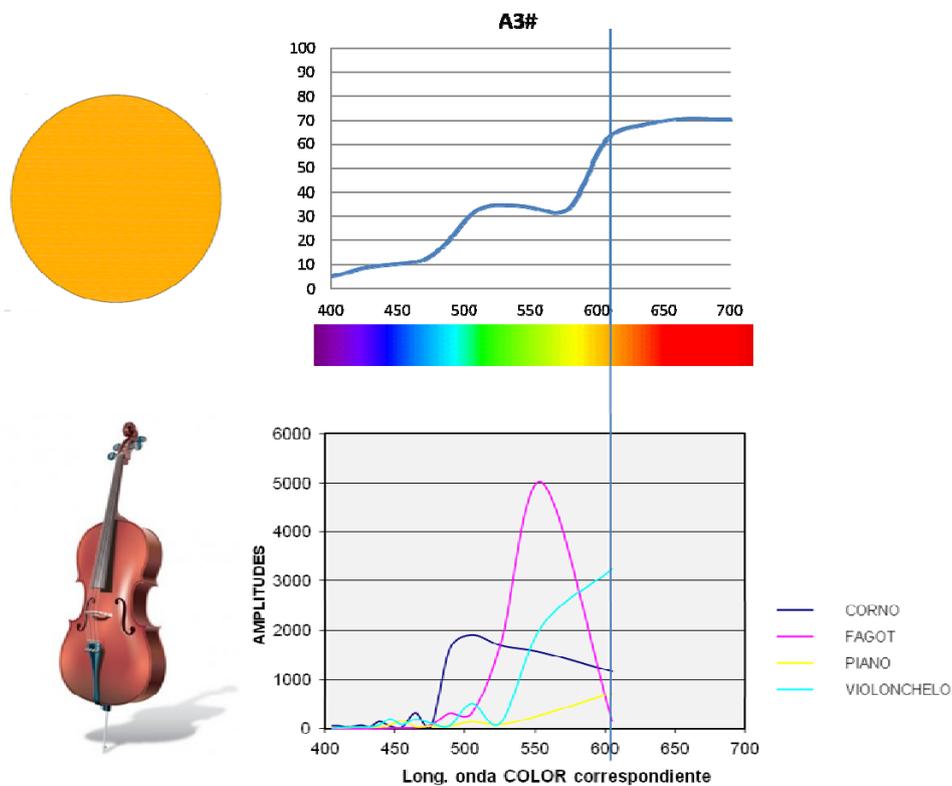


Figura 19. Comparativa entre gráficos de espectros de color y nota. (Long. de onda en nm)

De la comparativa de gráficos se observó que la envolvente de espectros del violonchelo es la que más se asemeja en su forma al espectro del color analizado.

Esta línea de investigación fue un primer acercamiento comparativo entre pureza de color y timbre musical. Aspectos que tuvieron que ser tratados más objetivamente tras los estudios sobre acústica musical y combinaciones armónicas de color.

1.2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo principal de este trabajo fue obtener una concordancia clara e innovadora tras lo conseguido a nivel histórico, entre las variables del color (*hue*, *value*, y *chroma*) y las dimensiones físicas del sonido (*altura*, *volumen* y *timbre*) respectivamente.

Para esta tesis doctoral, la consecución del objetivo principal se lleva a cabo mediante el cumplimiento de los siguientes objetivos parciales:

1^{er} OBJETIVO

Para poder relacionar colores con notas musicales es necesario conocer, en primer lugar, la respuesta de cada instrumento musical respecto a las notas que es posible emitir. Por lo que el primer objetivo planteado ha sido:

- Obtener una ordenación en la pureza de sonido en instrumentos musicales mediante el **análisis del timbre de las notas musicales** emitidas.

Para alcanzar este objetivo se ha utilizado la siguiente METODOLOGÍA:

Se planificaron las siguientes **actividades**:

- Generación de sonidos de notas musicales.
- Obtención de espectro de armónicos de las notas musicales generadas.
- Ordenación de instrumentos según pureza de sonido musical por aplicación de una "valoración técnica ponderada" de los armónicos que acompañan a la nota principal.

Los recursos materiales utilizados para realizar las actividades han sido los programas informáticos:

- Harmony Assistant ®: Programa de creación y edición musical.
- Matlab ®: Programa que permite, aplicando análisis de Fourier, obtener espectros de armónicos de notas musicales.

2º OBJETIVO

Obtener una propuesta de concordancia entre series de colores con variación de *hue* y series de notas musicales emitidas por un mismo instrumento musical.

Para alcanzar este objetivo se ha utilizado la siguiente METODOLOGÍA:

Se planificaron las siguientes **actividades**:

- Generación de series de notas musicales armónicas emitidas por distintos instrumentos.

- Creación de series de colores armónicos relativas a las series de notas musicales armónicas creadas teniendo en cuenta la pureza de timbre del instrumento musical relacionado.

Los recursos materiales utilizados para realizar las actividades han sido los programas informáticos:

- Harmony Assistant ®: Programa de creación y edición musical.
- Matlab ®: Programa que permite, aplicando análisis de Fourier, obtener espectros de armónicos de notas musicales.
- Munsell Conversion ®: Programa de conversión de magnitudes entre espacios de color (CIE L*a*b*, XYZ, RGB, CMYK, Munsell).
- Microsoft Office Excel ®: Programa para elaboración de tablas, gráficos y ecuaciones matemáticas.
- Autocad ®: Programa para obtención de dibujos y colores determinados.

3^{er} OBJETIVO

Obtener una propuesta de concordancia entre colores, del mismo *hue* y *value*, e instrumentos musicales que emiten una misma nota musical al mismo volumen.

Para alcanzar este objetivo se ha utilizado la siguiente METODOLOGÍA:

Se planificaron las siguientes **actividades**:

- Generación de series de notas musicales armónicas por distintos instrumentos.
- Creación de series de colores armónicos relativas a las series de notas musicales armónicas creadas teniendo en cuenta la pureza de timbre del instrumento musical relacionado.

Los recursos materiales utilizados para realizar las actividades han sido los programas informáticos:

- Harmony Assistant ®: Programa de creación y edición musical.
- Matlab ®: Programa que permite, aplicando análisis de Fourier, obtener espectros de armónicos de notas musicales.
- Munsell Conversion ®: Programa de conversión de magnitudes entre espacios de color (CIE L*a*b*, XYZ, RGB, CMYK, Munsell).
- Microsoft Office Excel ®: Programa para elaboración de tablas, gráficos y ecuaciones matemáticas.
- Autocad ®: Programa para obtención de dibujos y colores determinados.

4^o OBJETIVO

Obtener una propuesta de concordancia entre la variación de *value* (en series de colores del mismo *hue* y *chroma*) y la variación de la intensidad sonora de una nota musical emitida por un instrumento musical.

Para alcanzar este objetivo se ha utilizado la siguiente METODOLOGÍA:

Se planificaron las siguientes **actividades**:

- Generación de notas musicales con distintos instrumentos.
- Creación de series de colores armónicos relativas a la variación de volumen las notas musicales creadas.

Los recursos materiales utilizados para realizar las actividades han sido los programas informáticos:

- Harmony Assistant ®: Programa de creación y edición musical.
- Matlab ®: Programa que permite, aplicando análisis de Fourier, obtener espectros de armónicos de notas musicales.
- Munsell Conversion ®: Programa de conversión de magnitudes entre espacios de color (CIE L*a*b*, XYZ, RGB, CMYK, Munsell).
- Microsoft Office Excel ®: Programa para elaboración de tablas, gráficos y ecuaciones matemáticas.
- Autocad ®: Programa para obtención de dibujos y colores determinados.

5º OBJETIVO

- Obtención de respuestas perceptivas validadas entre estímulo visual y auditivo relativas a las concordancias propuestas entre *hue* y nota, entre *chroma* y timbre y entre *value* y volumen.

Para alcanzar este objetivo se ha utilizado la siguiente METODOLOGÍA:

Se planificaron las siguientes **actividades**:

- Creación de cuestiones.
- Preparación del Test.
- Puesta en web del Test: Programación con HTML-PHP y en base de datos SQLITE.
- Recogida y análisis de datos.

Los recursos materiales utilizados para realizar las actividades han sido los programas informáticos siguientes:

- Harmony Assistant ®: Programa de creación y edición musical.
- Autocad ®: Programa para obtención de dibujos y colores determinados.
- Microsoft Office Power Point ®: Programa de composición y presentación de textos y gráficos.
- Microsoft Office Excel ®: Programa para elaboración de tablas, gráficos y ecuaciones matemáticas.

2 ESTUDIO DEL TIMBRE DE SONIDO DE INSTRUMENTOS MUSICALES

El objetivo de este estudio es obtener una ordenación en la pureza de sonido en instrumentos musicales mediante el **análisis del timbre de las notas musicales** emitidas.

2. 1 Consideraciones previas:

En general, **un sonido no es puro**, las ondas sonoras no son sinusoidales, sino que las ondulaciones reales resultan ser suma de varios movimientos periódicos sinusoidales puros superpuestos, los cuales acompañan a la onda sinusoidal que corresponde a la frecuencia de la fundamental, dando así calidades distintas al sonido resultante. Estas ondas son los llamados armónicos y sus frecuencias son múltiplos enteros de la fundamental. Según el Teorema de Fourier (1822): “Todo movimiento periódico no armónico puede descomponerse en suma de movimientos armónicos puros, cuyas frecuencias son múltiplos de la correspondiente al movimiento complejo”. Toda onda compuesta periódica puede descomponerse en un número limitado de ondas sinusoidales simples, siendo la frecuencia de cada una de ellas múltiplo de la frecuencia fundamental. Una función periódica de frecuencia ν se descompone en suma de sinusoides, con frecuencias de ν (fundamental), 2ν , 3ν , etc., pudiendo faltar uno o varios de estos múltiplos.

En la figura 20 pueden verse tres ondas sinusoidales de distinta amplitud y frecuencia lo que representaría auditivamente a 3 tonos puros de distinta altura e intensidad. La suma de estas 3 ondas origina una cuarta onda equivalente a escuchar los 3 tonos puros al mismo tiempo.

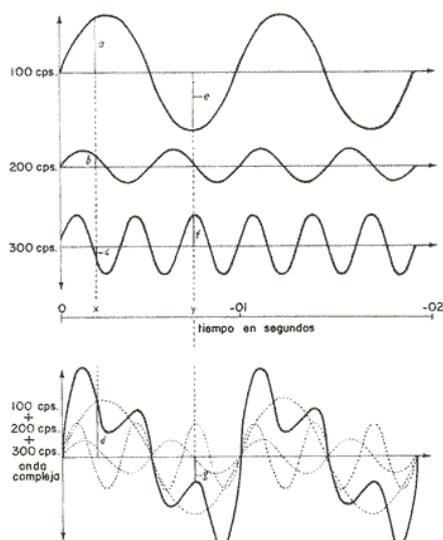


Figura 20. Partes superior: ondas sinusoidales de tonos puros. Parte inferior: suma de ondas.

La conformación de los armónicos (cantidad e intensidad) de una nota musical, tras aplicar la transformada de Fourier a la onda sonora anterior (Figura 20) da como resultado el timbre del sonido o espectro sonoro. El timbre del sonido es aquello que caracteriza y distingue a cada instrumento. En la figura 21 se muestran los armónicos de la nota G3# (207,652 Hz) de una flauta y de una guitarra; acompañando a la nota fundamental (1er armónico) se observan la serie de armónicos diferentes para cada instrumento. Estas "radiografías" (espectros gráficos del sonido) identifican al instrumento.

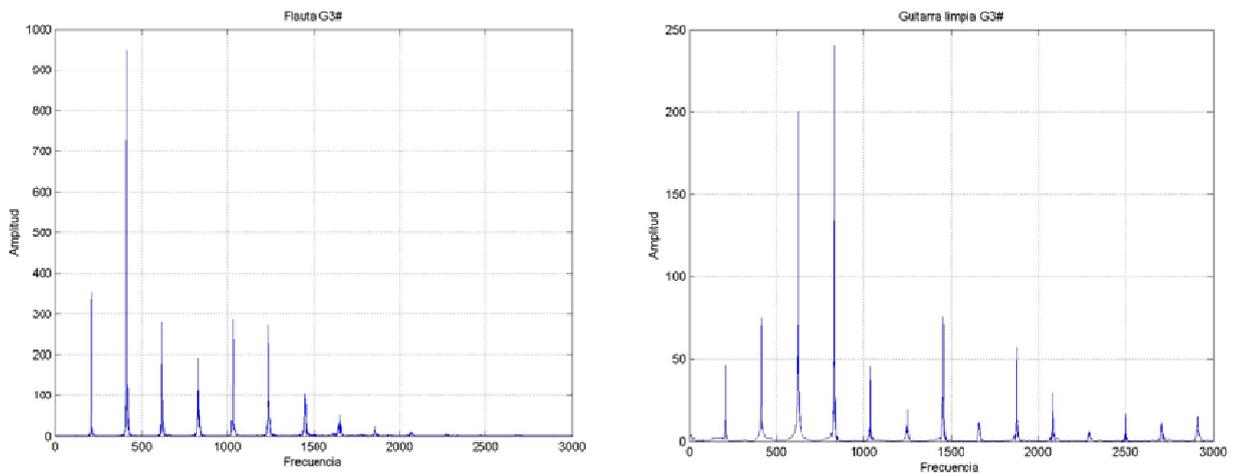


Figura 21. Espectros de armónicos de G3# (207,652 Hz) para flauta y guitarra.

Un sonido puro sinusoidal no es reproducible por ningún instrumento musical tradicional; sin embargo, el diapasón utilizado para el temperado (afinación entre instrumentos) sí emite un solo armónico a considerar [13]. El diapasón produce una onda armónica pura y por ello se utiliza como patrón de frecuencias en la afinación de los instrumentos musicales.

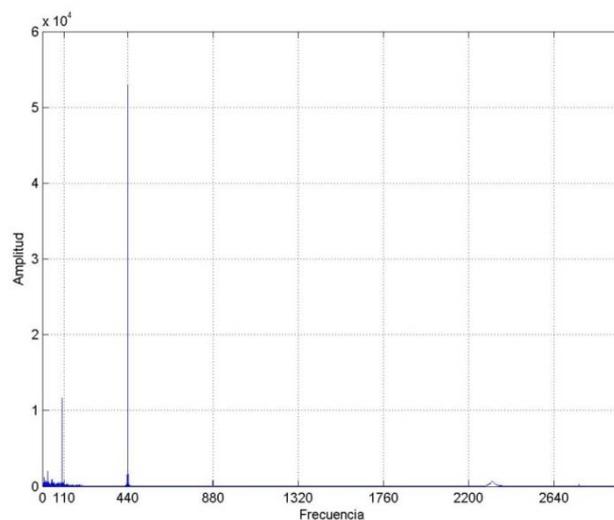


Figura 22. Análisis espectral de armónicos de A4 (440 Hz). Diapasón.

Hay que considerar que la intensidad sonora de un armónico puro de frecuencia ν y amplitud A es proporcional a $(\nu \cdot A)^2$ [14], por lo que pequeñas oscilaciones de armónicos de alta frecuencia pueden influir en forma perceptible en el timbre del sonido. Así mismo, el número o serie de armónicos de una nota llega hasta los límites de percepción del sonido, pero a partir del sonido 16 (4ª octava de la nota fundamental) la entonación de muchos armónicos es difícil de precisar [15]. Por ello, solo se considerarán las amplitudes de los 16 primeros armónicos de cada nota analizada.

2.2 PROCEDIMIENTO

El estudio del timbre de sonido de los instrumentos musicales considerados se ha realizado por medio del análisis de los armónicos de los sonidos emitidos. Para ello se han generado y analizado series de notas de tres instrumentos musicales de tesitura similar (Anexo A) y de distinta familia. Se han analizado, así mismo, las notas generadas por un piano.

Se ha escogido el violonchelo, corno, y fagot por ser instrumentos clásicos, tradicionales y por tener una misma tesitura en la altura de graves-medios. El ser clásicos significa que no pasan de moda, lo que escapa al paso de tiempo; un clásico es aquello que no se puede hacer mejor, que se ha depurado completamente. El ser un instrumento tradicional significa que su sonido no se manipula, suena tal como lo emite el instrumento por ser como es en forma, material y dimensiones. Tener una tesitura entre graves y medios conlleva a una gran emisión de armónicos con unas frecuencias más diferenciables que si se tratara de instrumentos de tesitura alta como puede ser el violín. Aparte de estos tres instrumentos se ha considerado también el piano por ser clásico, tradicional y abarcar todo el espectro audible musical.

Instrumento	Familia	Tesitura	Frecuencias
Violonchelo	Cuerda frotada	C2 a G5	65,406 Hz – 783,991 Hz
Corno	Viento metal	B1 a F5	61,735 Hz - 698,456 Hz
Fagot	Viento madera	A1# a E5	58,270 Hz – 659,255 Hz
Pianoforte	Cuerda golpeada	A0 a C8	27,50 Hz – 4186,009 Hz

Tabla 10. Instrumentos analizados.

Las notas musicales analizadas para los cuatro instrumentos están dentro de la tesitura de cada uno de ellos. Las notas musicales analizadas se encuentran en el rango entre C2 y E5 (65,406 Hz y 659,255 Hz en la escala temperada). Se han generado la sucesión de notas entre C2 y E5 y obtenido los espectrogramas de los 16 primeros armónicos de cada nota del rango considerado para cada uno de los

cuatro instrumentos (en Anexo E se exponen los gráficos de armónicos obtenidos y script de programación en Matlab).

En un registro grave la amplitud de la vibración de las cuerdas da lugar a cierta confusión (es más difícil distinguir las notas) entre los sonidos y en un registro agudo se perciben menos armónicos [16]. Por lo que, para que los sonidos se perciban con toda su personalidad, se ha trabajado únicamente con las notas centrales de los instrumentos considerados.

Las notas centrales escogidas han sido: A2, E3 y B3 (figura 23). Las tres notas escogidas corresponden a una sucesión de quintas.



Figura 23. Gráfico de posición de notas A2, E3 y B3 en las tesituras de cada instrumento.

En la escala temperada (afinación occidental de los instrumentos musicales) el acorde mayor se forma con la nota fundamental y la tercera y quinta nota de su serie armónica. En el caso de la nota A (La) lo componen las notas A, C# y E y su escala mayor lo forman las notas A, B, C#, D, E, F# y G#.

En la tabla 11 se exponen los 16 primeros armónicos de la nota A2 indicando sus frecuencias, notas esperadas dentro de la escala temperada y las desviaciones a las mismas.

ARMÓNICO	f (Hz)	NOTA	Desv. (%)
1°	110,000	A2	0
2°	220,000	A3	0
3°	330,000	E4	0,11
4°	440,000	A4	0
5°	550,000	C5#	0,79
6°	660,000	E5	0,11
7°	770,000	(F5#)	4,06
8°	880,000	A5	0
9°	990,000	(B5)	0,23
10°	1100,000	C6#	0,79
11°	1210,000	(D6)	3,01
12°	1320,000	E6	0,11
13°	1430,000	(F6#)	3,38
14°	1540,000	(F6#)	4,06
15°	1650,000	(G6#)	0,68
16°	1760,000	A6	0

Tabla 11. Serie armónica de A2. La serie de armónicos continúa hasta los límites de percepción del sonido, pero después del sonido 16 la entonación de ellos resulta difícil de precisar.

En la figura 24 se representa la notación en el pentagrama de los armónicos naturales de A2.

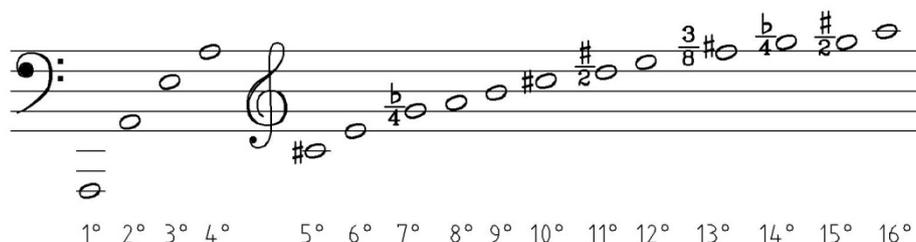


Figura 24. Notación de armónicos de A2. Algunos armónicos no coinciden con las entonaciones del sistema temperado, por lo que no tienen posibilidad de notación exacta en el mismo.

El armónico 1° es el sonido fundamental. Es la nota que se desea. Tanto el sonido fundamental como los armónicos 2°, 4°, 8° y 16° corresponden a la nota (octavada en sucesión), por lo que a mayor amplitud de los mismos mejor se distingue la nota esperada.

En la escala temperada, los armónicos 3°, 6° y 12° corresponden a la tercera nota del acorde mayor y los armónicos 5° y 10° corresponden a segunda nota del acorde mayor.

En la escala temperada, una diferencia de 5,95% en la frecuencia de dos sonidos corresponde a un semitono [17]. Así, los armónicos 7º, 11º, 13º y 15º se desvían más de las notas esperadas en un acorde (ver tabla 11), por lo que se consideran disonantes. Estos sonidos “ensucian” con “ruido” a la nota o al acorde, lo que lleva a un sonido impuro. Su presencia es indeseable para la pureza, calidez y plenitud del sonido.

2.2.1 Análisis de armónicos de A2 para el violonchelo, corno, fagot y piano

Partiendo de los gráficos de espectros de armónicos (Anexo E) de la nota A2 emitida por cada instrumento (figura 25) se han obtenido cada una de las amplitudes de señal de sus armónicos. Para poder comparar los valores de las amplitudes de señal de los armónicos entre los instrumentos, es necesario normalizar los valores de las amplitudes de señal de los armónicos.

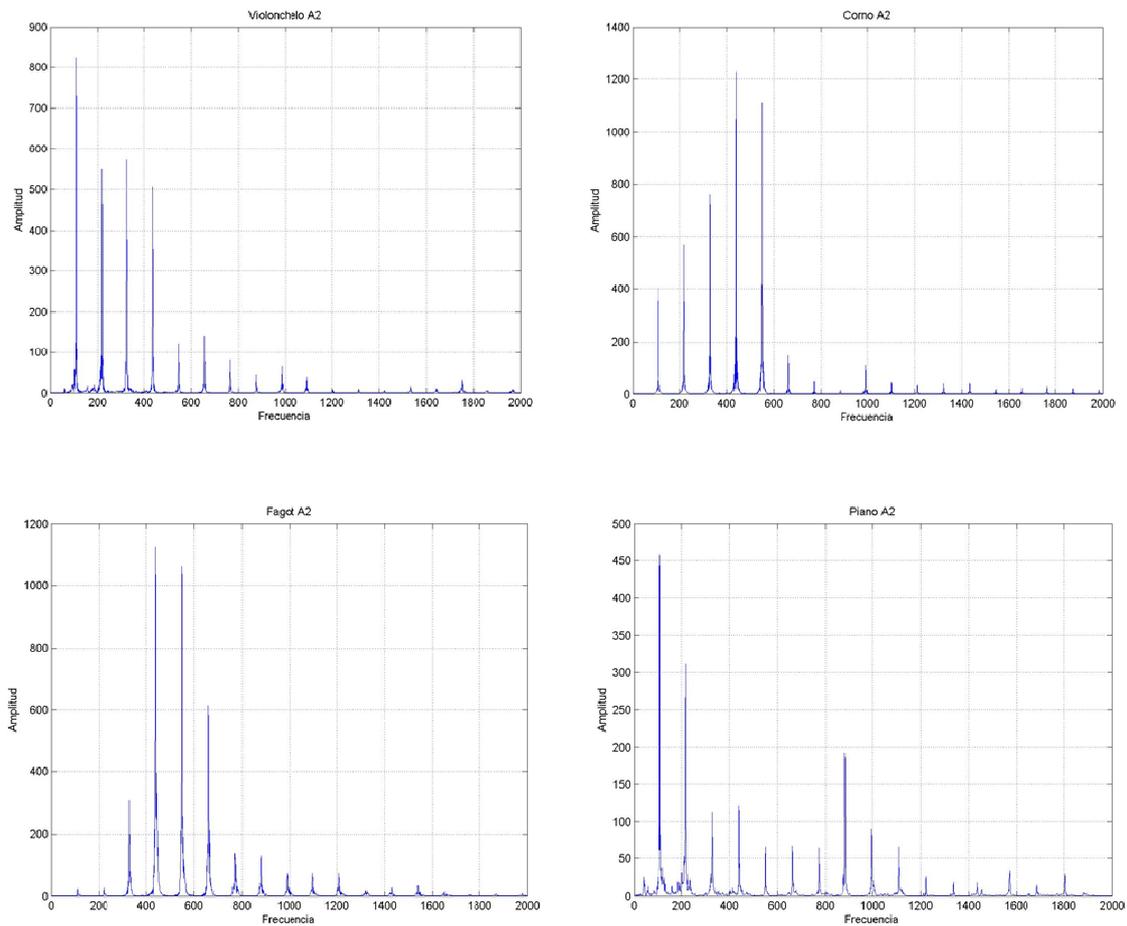


Figura 25. Espectros de armónicos de A2. Violonchelo, corno, fagot y piano.

En el espectro de armónicos del piano se observa que la frecuencia del 16º tono parcial (debería estar posicionado en la frecuencia de 1760 Hz) es aproximadamente un semitono más agudo, o sea, totalmente disonante con el tono fundamental. El timbre característico del piano está no solo determinado por la intensidad relativa de los distintos tonos parciales, sino también por esta leve anarmonicidad [18].

En la tabla 12 se exponen los valores absolutos y relativos de las intensidades de señal de los 16 primeros armónicos para el violonchelo, corno, fagot y piano.

Siendo que no se percibe igual una disonancia en *pianissimo* que en *fortissimo* [19], para un tratamiento de los niveles de amplitudes en los distintos instrumentos analizados, se han normalizado los niveles de señal de armónicos obteniendo los valores relativos de las amplitudes de señal (al mayor valor de señal le corresponde un valor relativo de 1, el resto de valores son proporcionales a éste). Los valores absolutos y relativos de las amplitudes de señal de los armónicos de A2 se exponen en la tabla 12.

Amplitudes de señal								
ARMONICO	Violonchelo		Corno		Fagot		Piano	
1º	871	1,000	404	0,327	22	0,020	459	1,000
2º	584	0,670	570	0,462	25	0,022	312	0,680
3º	603	0,692	765	0,620	308	0,274	112	0,244
4º	535	0,614	1234	1,000	1126	1,000	122	0,266
5º	131	0,150	1111	0,900	1065	0,946	67	0,146
6º	151	0,173	148	0,120	615	0,546	68	0,148
7º	88	0,101	51	0,041	148	0,131	64	0,139
8º	49	0,056	14	0,011	129	0,115	191	0,416
9º	68	0,078	108	0,088	74	0,066	90	0,196
10º	41	0,047	43	0,035	74	0,066	66	0,144
11º	7	0,008	32	0,026	74	0,066	26	0,057
12º	10	0,011	40	0,032	18	0,016	19	0,041
13º	5	0,006	40	0,032	31	0,028	18	0,039
14º	17	0,020	18	0,015	37	0,033	35	0,076
15º	12	0,014	22	0,018	18	0,016	15	0,033
16º	36	0,041	29	0,024	3	0,003	30	0,065
	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa

Tabla 12. Amplitudes absolutas y relativas de señal de armónicos de A2.

Los valores de las **amplitudes relativas** de los armónicos se pueden observar gráficamente en la figura 26.

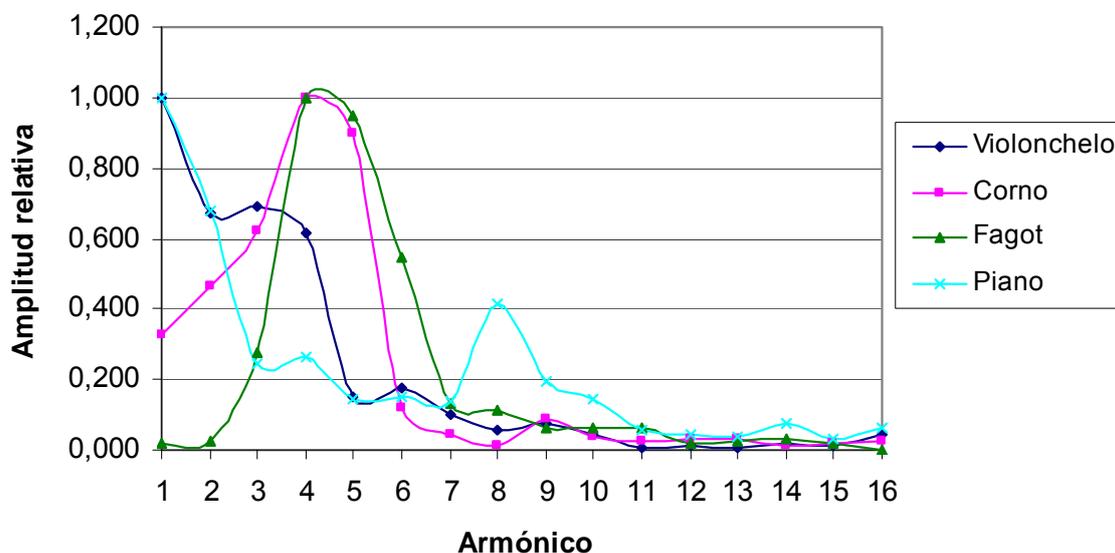


Figura 26 Envolturas de armónicos de A2. Violonchelo, corno, fagot y piano.

De los valores de las **amplitudes relativas** de los armónicos se obtienen los niveles de presión sonora L_p [20]. Considerando el máximo nivel de presión sonora (L_p [dB]) de 80 dB se tiene:

$$L_p = 80 \text{ dB} \times \text{Amplitud relativa}$$

NIVEL DE PRESIÓN SONORA $L_p = [80 \text{ dB(A)} \cdot \text{Amplitud relativa}]$				
ARMÓNICO	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1º	80,000	26,191	1,563	80,000
2º	53,639	36,953	1,776	54,379
3º	55,385	49,595	21,883	19,521
4º	49,139	80,000	80,000	21,264
5º	12,032	72,026	75,666	11,678
6º	13,869	9,595	43,694	11,852
7º	8,083	3,306	10,515	11,155
8º	4,501	0,908	9,165	33,290
9º	6,246	7,002	5,258	15,686
10º	3,766	2,788	5,258	11,503
11º	0,643	2,075	5,258	4,532
12º	0,918	2,593	1,279	3,312
13º	0,459	2,593	2,202	3,137
14º	1,561	1,167	2,629	6,100
15º	1,102	1,426	1,279	2,614
16º	3,307	1,880	0,213	5,229

Tabla 13. Niveles de presión sonora de armónicos de A2.

Partiendo de los niveles de L_p de los armónicos, se obtienen los niveles de sonoridad NS corregidos según curvas isofónicas.

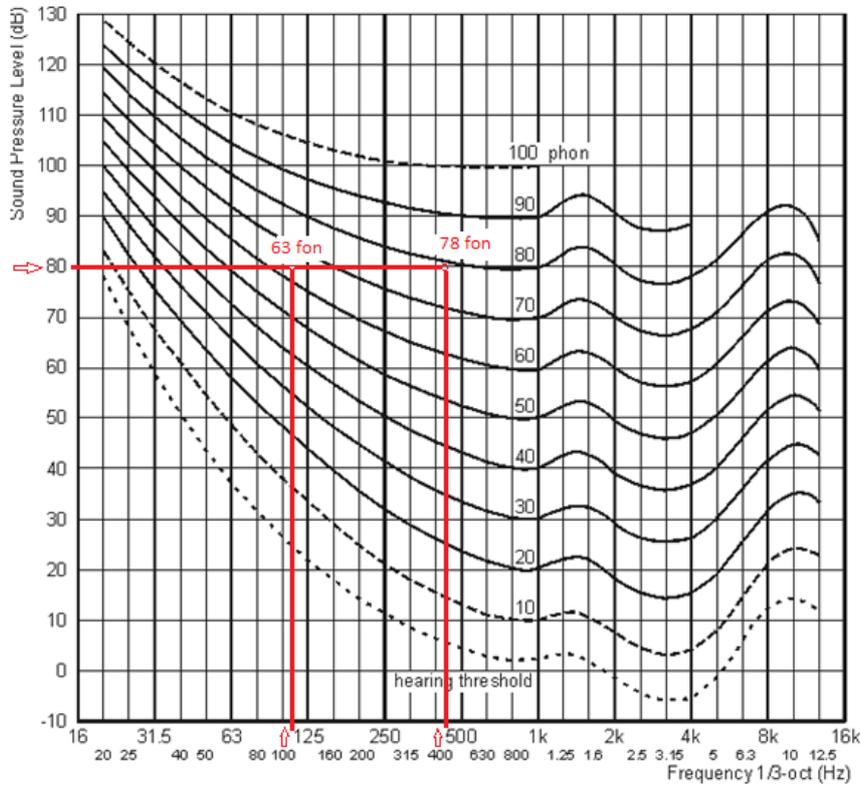


Figura 27. Ejemplo obtención de valor de NS en curvas de igual sonoridad (ISO 226) [21].

Nivel de Sonoridad NS (fon) (Según curvas isofónicas ISO 226)					
ARMONICO	f (Hz)	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	110,000	63,000	0,000	0,000	63,000
2°	220,000	40,000	20,000	0,000	43,000
3°	330,000	45,000	40,000	13,000	13,000
4°	440,000	45,000	78,000	78,000	16,000
5°	550,000	10,000	73,000	76,000	10,000
6°	660,000	13,000	9,000	43,000	11,000
7°	770,000	8,000	3,000	10,000	11,000
8°	880,000	4,500	0,000	10,000	33,000
9°	990,000	6,000	7,000	5,000	15,000
10°	1100,000	0,000	0,000	2,000	10,000
11°	1210,000	0,000	0,000	2,500	2,000
12°	1320,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13°	1430,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14°	1540,000	0,000	0,000	0,000	5,000
15°	1650,000	0,000	0,000	0,000	2,000
16°	1760,000	3,000	1,800	0,000	5,000

Tabla 14. Niveles de sonoridad corregidos según curvas de igual sonoridad (ISO 226).

Los niveles de sonoridad obtenidos son una magnitud *psicofísica* y es necesario obtener la **sensación de sonoridad**, o simplemente *sonoridad*, S (loudness, L)

Para $NS > 40$ fon:

$$S = 2^{(NS-40)/10}$$

Para $NS < 40$ fon:

$$S = 6,901 \times 10^{-5} (NS-2)^{2,634}$$

Sensación de Sonoridad S (son)					
ARMONICO	f (Hz)	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	110,000	4,925	0,000	0,000	4,925
2°	220,000	1,000	0,000	0,000	1,231
3°	330,000	1,414	1,000	0,038	0,038
4°	440,000	1,414	13,929	13,929	0,072
5°	550,000	0,017	9,849	12,126	0,017
6°	660,000	0,038	0,012	1,231	0,023
7°	770,000	0,008	0,000	0,017	0,023
8°	880,000	0,001	0,000	0,017	0,585
9°	990,000	0,003	0,005	0,001	0,059
10°	1100,000	0,000	0,000	0,000	0,017
11°	1210,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12°	1320,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13°	1430,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14°	1540,000	0,000	0,000	0,000	0,001
15°	1650,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16°	1760,000	0,000	0,000	0,000	0,001

Tabla 15. Valores de Sensación de Sonoridad de armónicos de A2. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Con los valores de los niveles de **sensaciones de sonoridad** de los armónicos se obtienen las **envolventes de armónicos**.

Sensación de Sonoridad A2 (La)

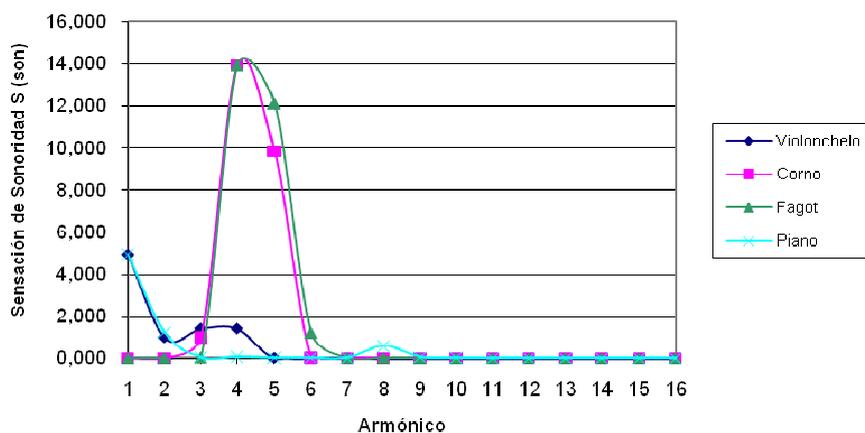


Figura 28. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de A2.

2.2.1.1 Evaluación matemática de la sonoridad

Teniendo en cuenta la *sensación de sonoridad* (S_i) de cada armónico y su valor de importancia (Anexo F) se obtiene la *sonoridad valorada* ($\sum S_i \cdot v_i$) para cada instrumento.

ARMONICO	Desviación (%)	Valor import. v_i	Sonoridad valorada ($\sum S_i \cdot v_i$)			
			$S \cdot v_i$	Violonchelo	Corno	Fagot
1°	0	5	24,623	0,000	0,000	24,623
2°	0	4	4,000	0,000	0,000	4,925
3°	0,11	-1	-1,414	-1,000	-0,038	-0,038
4°	0	3	4,243	41,786	41,786	0,216
5°	0,79	-2	-0,033	-19,698	-24,251	-0,033
6°	0,11	-1	-0,038	-0,012	-1,231	-0,023
7°	4,06	-7	-0,054	0,000	-0,116	-0,158
8°	0	2	0,002	0,000	0,033	1,170
9°	0,23	-3	-0,008	-0,014	-0,004	-0,178
10°	0,79	-2	0,000	0,000	0,000	-0,033
11°	3,01	-5	0,000	0,000	0,000	0,000
12°	0,11	-1	0,000	0,000	0,000	0,000
13°	3,38	-6	0,000	0,000	0,000	0,000
14°	4,06	-7	0,000	0,000	0,000	-0,009
15°	0,68	-4	0,000	0,000	0,000	0,000
16°	0	1	0,000	0,000	0,000	0,001
$\sum S \cdot v_i =$			31,320	21,062	16,179	30,464

Tabla 16. Sonoridades valoradas de armónicos de A2. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Según los valores de *sonoridad valorada* ($\sum S_i \cdot v_i$) se tiene el siguiente orden de pureza de instrumentos obtenidos para la nota A2:

- 1° Violonchelo
- 2° Piano
- 3° Corno
- 4° Fagot

2.2.1.2 Evaluación gráfica de la sonoridad.

Otra forma de valoración de la sonoridad es la aplicación del concepto de *envolvente ideal armónica*. La aplicación se ha realizado sobre los instrumentos de violonchelo y fagot. En la figura 29 se representan las envolventes de sensación de sonoridad para la nota A2 emitida por el violonchelo y por el fagot.

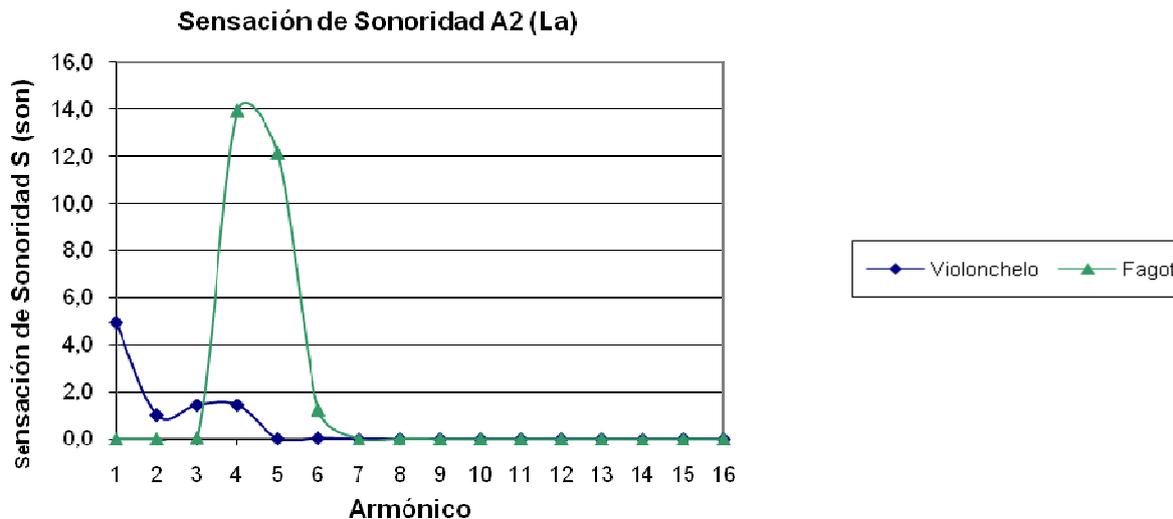


Figura 29. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de A2 para violonchelo y fagot.

Partiendo de la gráficas de envolvente de sensación de sonoridad de armónicos para el violonchelo y el fagot (figura 29) y aplicando, a cada uno, la propuesta de *envolvente ideal armónica* (Anexo G) se obtienen las gráficas de sensación de sonoridad junto con su *envolvente ideal armónica*.

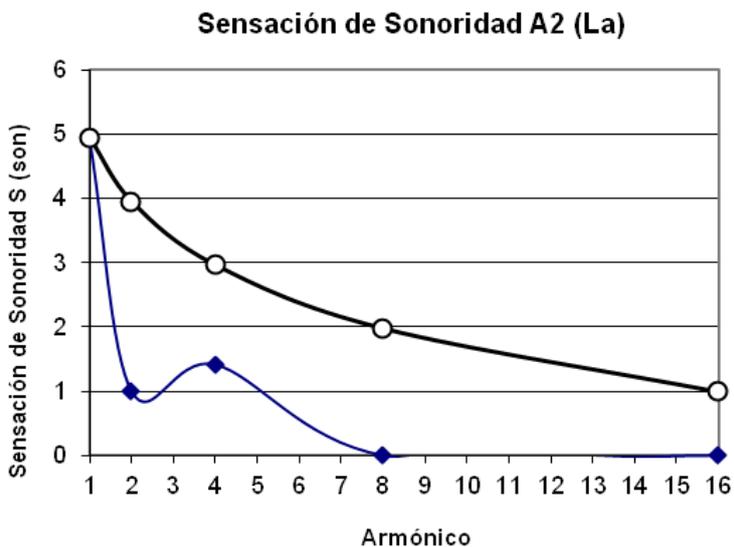


Figura 30. Curvas envolvente ideal armónica (curva de color negro con círculos blancos) y de sensación de sonoridad de armónicos de A2 para violonchelo.

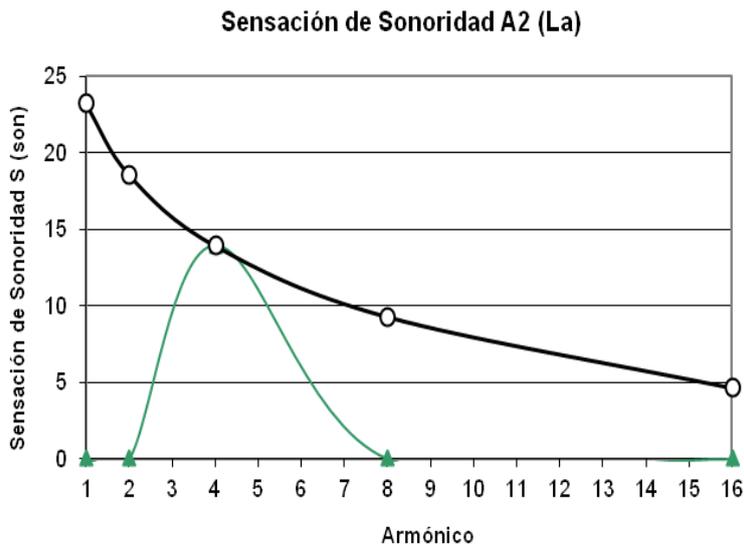


Figura 31. Curvas envolvente ideal armónica (curva de color negro con círculos blancos) y de sensación de sonoridad de armónicos de A2 para fagot.

Según las gráficas, se observa que la curva envolvente de sonoridad del violonchelo es la que más se aproxima a su envolvente ideal armónica. Por lo que se puede deducir que la nota A2 emitida por el violonchelo muestra mayor grado de pureza que la emitida por el fagot.

2.2.1.3 Grado de pureza de la nota.

El valor, o grado, de pureza de un instrumento se obtiene según la expresión (4) propuesta en Anexo G:

$$\text{Grado de pureza} = (\sum S_i \cdot v_i) / (10,8 \cdot S'_1)$$

Siendo: $\sum S_i \times v_i$ = Sonoridad valorada, y
 S'_1 = Sonoridad de 1^{er} armónico de envolvente ideal.

El grado de pureza del violonchelo en A2 es de un 59 %

$$\text{Grado de pureza} = 31,32 / (10,8 \times 4,93) = 0,59$$

El grado de pureza del corno en A2 es de un 8 %

$$\text{Grado de pureza} = 21,06 / (10,8 \times 23,3) = 0,08$$

El grado de pureza del fagot en A2 es de un 6 %

$$\text{Grado de pureza} = 16,18 / (10,8 \times 23,3) = 0,06$$

El grado de pureza del piano en A2 es de un 58 %

$$\text{Grado de pureza} = 30,46 / (10,8 \times 4,93) = 0,58$$

2.2.2 Orden de pureza del violonchelo, corno, fagot y piano para la nota E3

A igual que para la nota A2, se ha llevado a cabo el análisis de armónicos en la nota E3 (Anexo H). Los resultados del proceso de análisis de armónicos de la nota E3 emitida por el violonchelo, corno, fagot y piano son los siguientes:

Los valores de las **amplitudes relativas** de los armónicos se pueden observar gráficamente en la figura 32.

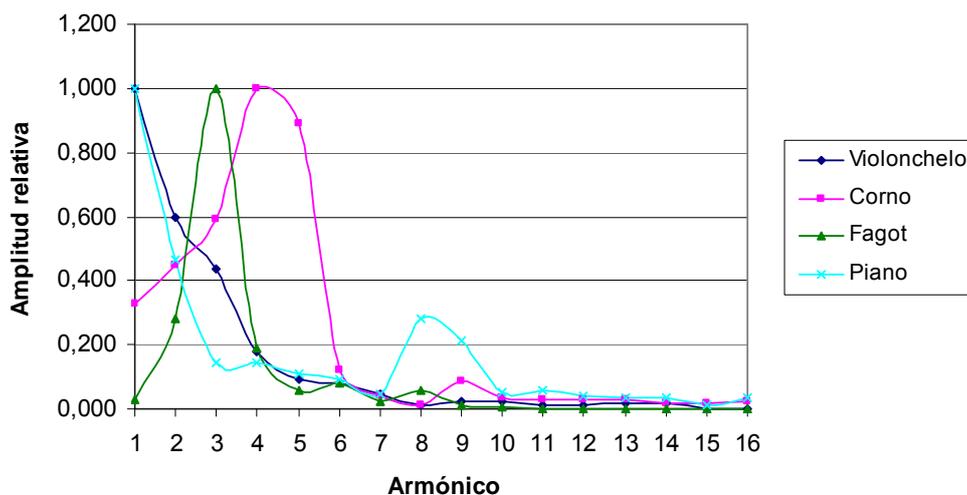


Figura 32. Envolturas de armónicos de E3.

Los valores de los niveles de **sensaciones de sonoridad** de los armónicos se pueden observar gráficamente en la figura 33.

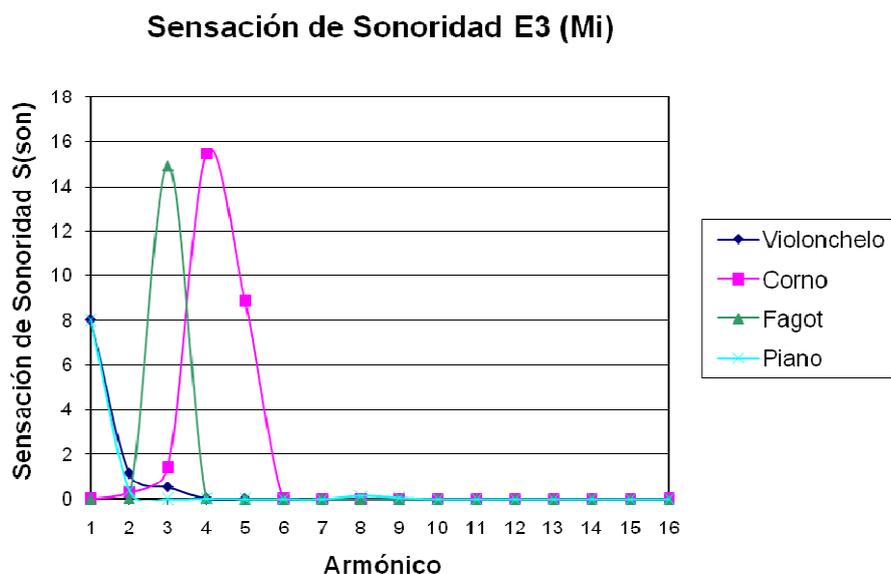


Figura 33. Envolturas de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de E3.

La *sonoridad valorada* ($\sum S_i \cdot v_i$) obtenida para cada instrumento es la reflejada en la tabla 17.

ARMONICO	Desviación (%)	Valor import. v_i	S \cdot v_i			
			Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	0	5	40,000	0,039	0,000	40,000
2°	0	4	4,595	1,192	0,192	1,472
3°	0,11	-1	-0,537	-1,414	-14,929	-0,008
4°	0	3	0,089	46,365	0,144	0,068
5°	0,79	-2	-0,010	-17,753	0,000	-0,010
6°	0,11	-1	-0,003	-0,014	-0,004	-0,006
7°	4,06	-7	0,000	0,000	0,000	0,000
8°	0	2	0,000	0,000	0,000	0,279
9°	0,23	-3	0,000	-0,008	0,000	-0,178
10°	0,79	-2	0,000	0,000	0,000	0,000
11°	3,01	-5	0,000	0,000	0,000	-0,013
12°	0,11	-1	0,000	-0,001	0,000	-0,003
13°	3,38	-6	-0,007	-0,016	0,000	-0,016
14°	4,06	-7	-0,019	-0,019	-0,003	-0,034
15°	0,68	-4	-0,011	-0,015	0,000	-0,011
16°	0	1	0,004	0,005	0,000	0,008
		$\sum S \cdot v_i =$	44,102	28,361	-14,599	41,550

Tabla 17. Sonoridades valoradas de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Según los valores de *sonoridad valorada* ($\sum S_i \cdot v_i$) se tiene el siguiente orden de pureza de instrumentos obtenidos para la nota E3:

- 1° Violonchelo
- 2° Piano
- 3° Corno
- 4° Fagot

En el Anexo H se refleja el proceso de análisis de armónicos de la nota E3 emitida por el violonchelo, corno, fagot y piano.

2.2.3 Orden de pureza del violonchelo, corno, fagot y piano para la nota B3

A igual que para la nota A2 se ha llevado a cabo el análisis de armónicos en la nota B3 (Anexo I). Los valores de las **amplitudes relativas** de los armónicos de la nota B3 emitida por el violonchelo, corno, fagot y piano se pueden observar gráficamente en la figura 34

Envoltentes B3 (Si)

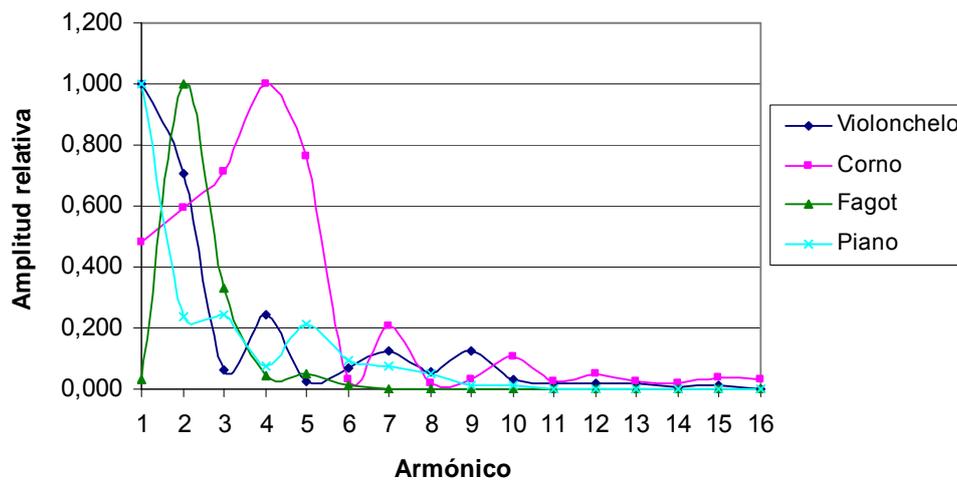


Figura 34. Envoltentes de armónicos de B3.

Los valores de los niveles de **sensaciones de sonoridad** de los armónicos se pueden observar gráficamente en la figura 35.

Sensación de Sonoridad B3 (Si)

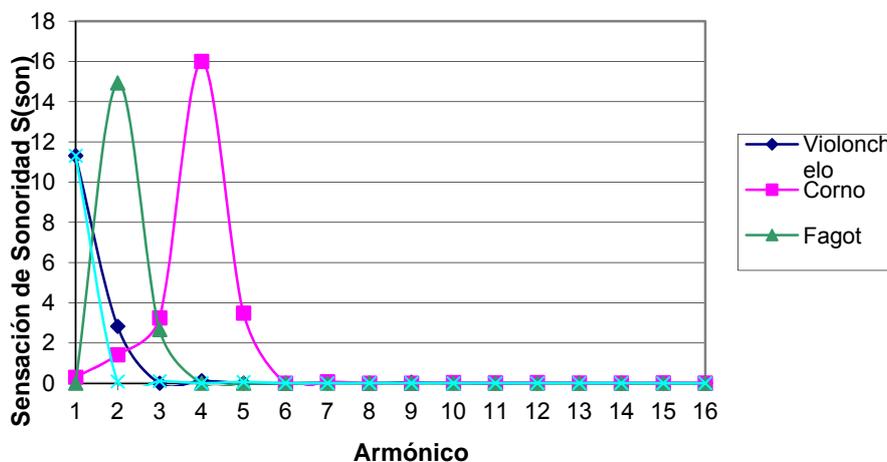


Figura 35. Envoltentes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de B3.

La *sonoridad valorada* ($\sum S_i \cdot v_i$) obtenida para cada instrumento es la reflejada en la tabla 18.

ARMONICO	Desviación	Valor import.		S • vi		
	(%)	vi	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	0	5	56,569	1,491	0,000	56,569
2°	0	4	11,314	5,657	59,714	0,346
3°	0,11	-1	0,000	-3,249	-2,665	-0,102
4°	0	3	0,361	48,000	0,000	0,004
5°	0,79	-2	0,000	-6,964	0,000	-0,119
6°	0,11	-1	0,000	0,000	0,000	-0,001
7°	4,06	-7	-0,116	-0,505	0,000	-0,003
8°	0	2	0,005	0,000	0,000	0,004
9°	0,23	-3	-0,144	-0,008	0,000	-0,004
10°	0,79	-2	-0,010	-0,059	0,000	-0,002
11°	3,01	-5	-0,024	-0,083	0,000	-0,006
12°	0,11	-1	-0,008	-0,030	0,000	-0,003
13°	3,38	-6	-0,046	-0,070	0,000	-0,016
14°	4,06	-7	-0,019	-0,034	0,000	-0,019
15°	0,68	-4	-0,019	-0,066	0,000	0,000
16°	0	1	0,005	0,008	0,000	0,000
		$\sum S \cdot v_i =$	67,868	44,089	57,049	56,647

Tabla 18. Sonoridades valoradas de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Según los valores de *sonoridad valorada* ($\sum S_i \cdot v_i$) se tiene el siguiente orden de pureza de instrumentos obtenidos para la nota B3:

- 1° Violonchelo
- 2° Fagot
- 3° Piano
- 4° Corno

En el Anexo I se refleja el proceso de análisis de armónicos de la nota B3 emitida por el violonchelo, corno, fagot y piano.

En resumen, el orden de pureza de los instrumentos analizados ante la emisión de las notas musicales A2, E3 y B3 es el expresado en la tabla 19. De la cual se deduce que existe una continuidad de orden de pureza en los instrumentos de violonchelo, piano y corno. El fagot, sin embargo, muestra una mayor pureza en notas más altas.

Nota musical	Orden de pureza			
	1°	2°	3°	4°
A2	Violonchelo	Piano	Corno	Fagot
E3	Violonchelo	Piano	Corno	Fagot
B3	Violonchelo	Fagot	Piano	Corno

Tabla 19. Orden de pureza de violonchelo, corno, fagot y piano para las notas A2, E3 y B3..

2.3 Observaciones derivadas del estudio del timbre de sonido de instrumentos musicales

Las envolventes de los espectros de armónicos, en toda la gama de notas analizada, no presentan el mismo "aspecto" para los cuatro instrumentos. Cada instrumento musical tiene un espectro singular.

Cada instrumento musical tiene un timbre característico y éste es consecuencia de las cantidades y amplitudes de los armónicos que son capaces de generar.

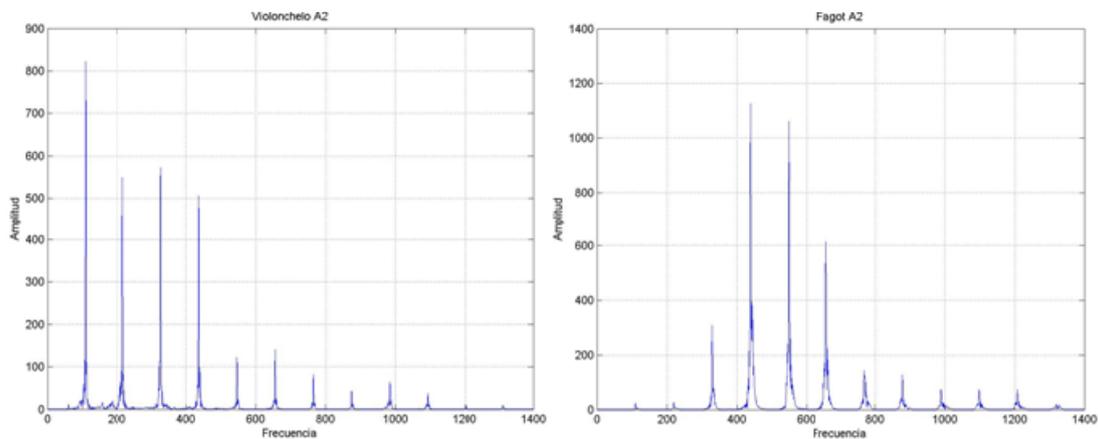


Figura 36. Espectrogramas de A2 para el violonchelo y el fagot.

Las envolventes de armónicos del violonchelo, corno y piano mantienen una forma similar en todo el rango de notas analizado; rango comprendido entre C2 y E5 (65,406 Hz y 659,255 Hz). En cambio, la forma de las envolventes de armónicos del fagot varía a lo largo de su tesitura.

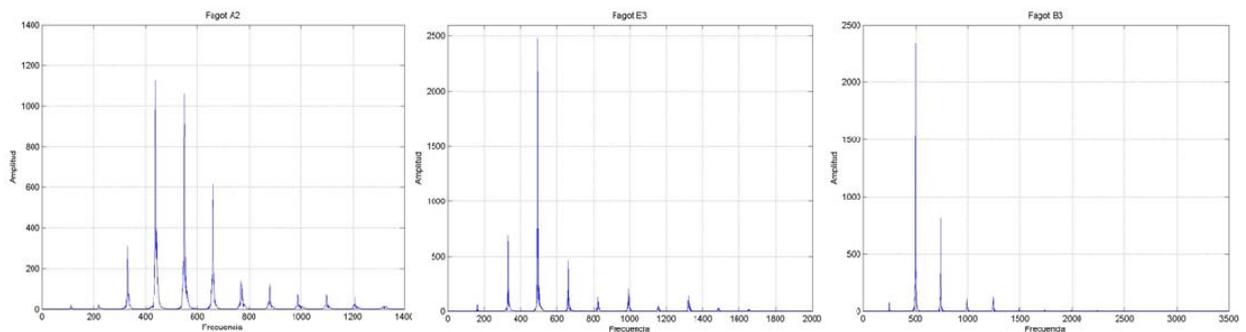


Figura 37. El fagot presenta su formante en el 4º armónico (440 Hz) para la nota A2, en el 3º armónico (494,442 Hz) para la nota E3 y en el 2º armónico (493,884 Hz) para la nota B3.

El fagot tiene un espectro de armónicos de forma variable a lo largo de su tesitura y sus *formantes* (máximos de las envolventes) aparecen en las frecuencias próximas a 500 y 1000 Hz

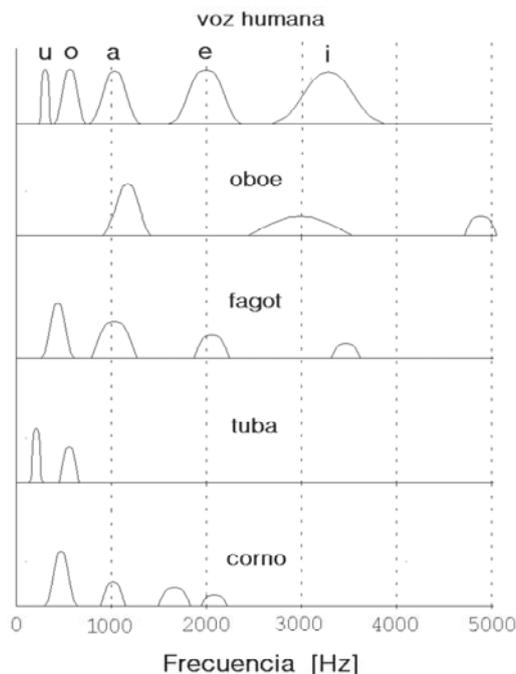


Figura 38. Posición de los formantes de varios instrumentos musicales y también el formante principal asociado a las vocales. (Herbert Massmann, Rodrigo Ferrer. Instrumentos musicales. Artesanía y ciencia, Dolmen Ediciones. Pág. 61)

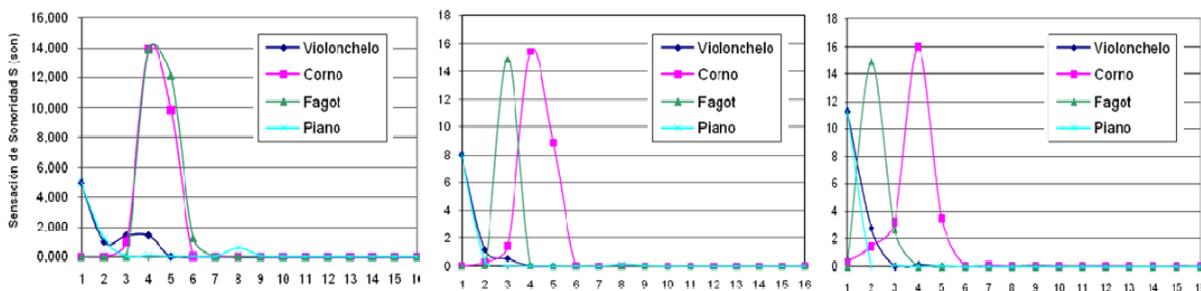


Figura 39. Comparativa de formantes en la sensación de sonoridad en A2, E3 y B3. El fagot varía su formante a lo largo de su tesitura.

La movilidad del pico del formante del fagot (acercándose al primer armónico e notas más agudas) es el que muestra el cambio de orden en la pureza relativa entre estos instrumentos. Por el contrario, se muestra una constancia en los formantes de violonchelo, corno y piano en las notas consideradas.

3 ANÁLISIS ENTRE HUE Y TONOS MUSICALES

El objetivo de este estudio fue obtener una propuesta de concordancia entre series de colores con variación de *hue* y series de notas musicales emitidas por un mismo instrumento musical.

COLOR		SONIDO	
	VALOR		VALOR
Hue	Variable	Altura	Variable
Value	Constante	Volumen	Constante
Chroma	Constante	Timbre	Constante

Tabla 20. Valores de los atributos del color y sonido para la concordancia entre hue y tono musical.

3.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

Así como la melodía discurre temporalmente a lo largo del pentagrama, la armonía ocurre cuando suenan varios sonidos a la vez. Ese conjunto de notas que suenan al unísono componen un acorde.

El sonido musical resultante de dos o más notas que suenan a la par puede percibirse más o menos agradable dependiendo de la relación entre sus frecuencias. A los sonidos que unidos entre sí influyen gratamente al oído se les califica como consonantes y los que se comportan contrariamente como disonantes. Los acordes consonantes se asocian al equilibrio, el reposo y la alegría. Los acordes disonantes se asocian a la inquietud, el deseo, la preocupación y la agitación.

Siendo que “la combinación más bella de sonidos es la consonante” [22], todas las series de notas utilizadas en este estudio son intervalos armónicos correspondientes a notas del acorde físico-natural (unísono, diapente y sesquicuarta), a sucesiones de octavas (diapasón), a sucesiones de dobles octavas (disdiapasón) y a sucesiones de quintas (diapente).

Dependiendo de la igualdad o variación de los tres atributos perceptivos del color (*hue*, *value* y *chroma*), se consideran tres tipos de combinación de colores:

Armónicos: Colores que tienen dos atributos iguales y uno diferente.

Consistentes: Colores que poseen un atributo igual y dos diferentes. Forman también composiciones armónicas, pero de un solo atributo.

Contrastados: Colores que tienen los tres atributos diferentes.

Las series de colores utilizadas en este estudio forman combinaciones armónicas por igualación de uno o dos de sus parámetros (*hue*, *value* y *chroma*). Se han utilizado series armónicas con el mismo *value* y *chroma*, series obtenidas del anillo de colores formado por $V = 5$ y $C = 6$, y por $V = 6$ y $C = 7$. (Figura 40)

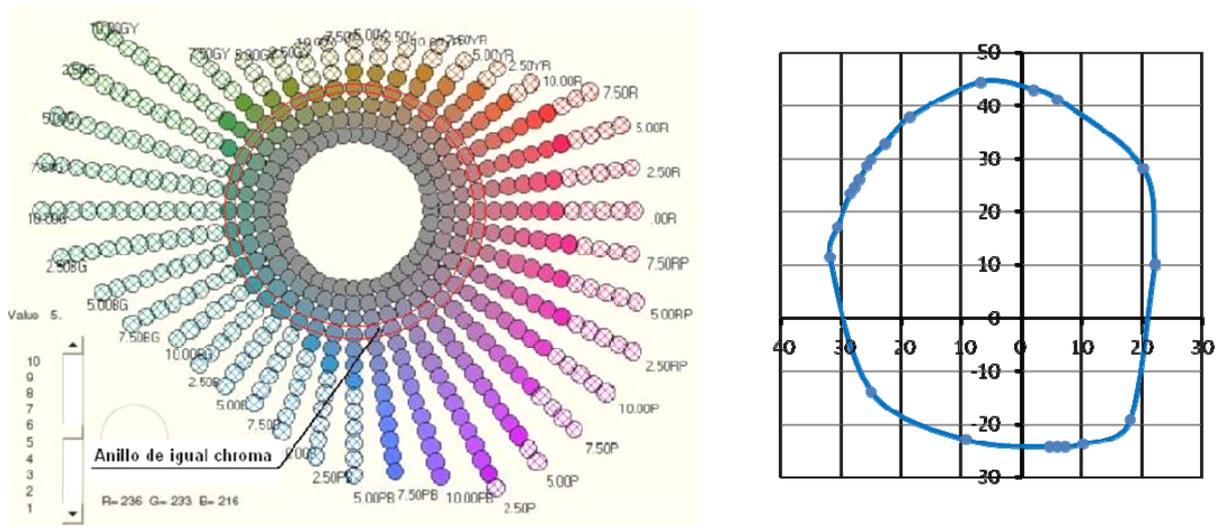


Figura 40. Izquierda: Anillo Munsell con $V = 5$. Derecha: Anillo Munsell 5/6 en diagrama $CIEa^*b^*$.

La serie de colores utilizados del anillo 5/6 de Munsell queda ubicada en diagrama CIE 1964 tal como se representa en la figura 41. La sucesión de puntos de igual *value* y *chroma* se asemeja a una elipse alrededor del punto del iluminante patrón CIE D65. Esta disposición de puntos se asemeja a las utilizadas en los test de evaluación de la visión del color, donde los tonos de los estímulos utilizados también están así dispuestos (Anexo K), lo que avala la armonía de la sucesión.

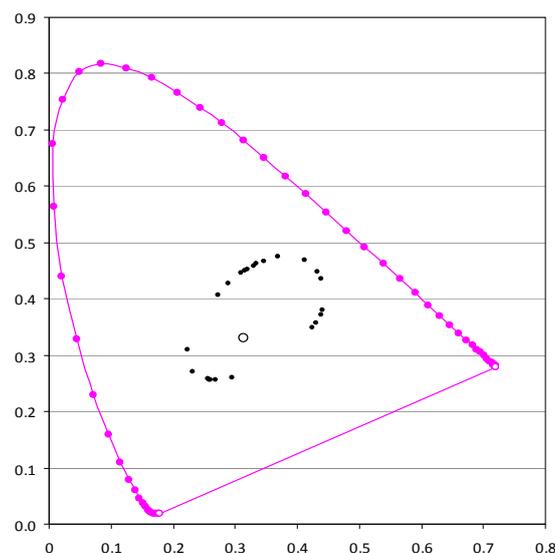


Figura 41. Serie V 5/6 Munsell en diagrama de cromaticidad CIE 1964.

Las sucesiones de colores para las distintas combinaciones armónicas utilizadas en el presente trabajo se encuentran dentro de un anillo Munsell o elipse en diagrama de cromaticidad CIE 1964. Cualquier color utilizado fuera de estos ordenamientos distorsionaría la armonía buscada en la sucesión.

También se han utilizado series de colores de "combinación armónica consistente" (un solo parámetro igual). En este caso, las secuencias describen una trayectoria helicoidal dentro del sistema de ordenamiento HLS. Se utiliza el espacio de color HLS pese haber considerado las limitaciones de este espacio, ya que no es adecuado para una especificación cuantitativa del color [23]. Sin embargo, teniendo en cuenta la utilización de series de colores y su generación mediante software gráfico, su utilización se ajusta al objetivo buscado (correlacionar series de colores con series de notas musicales).

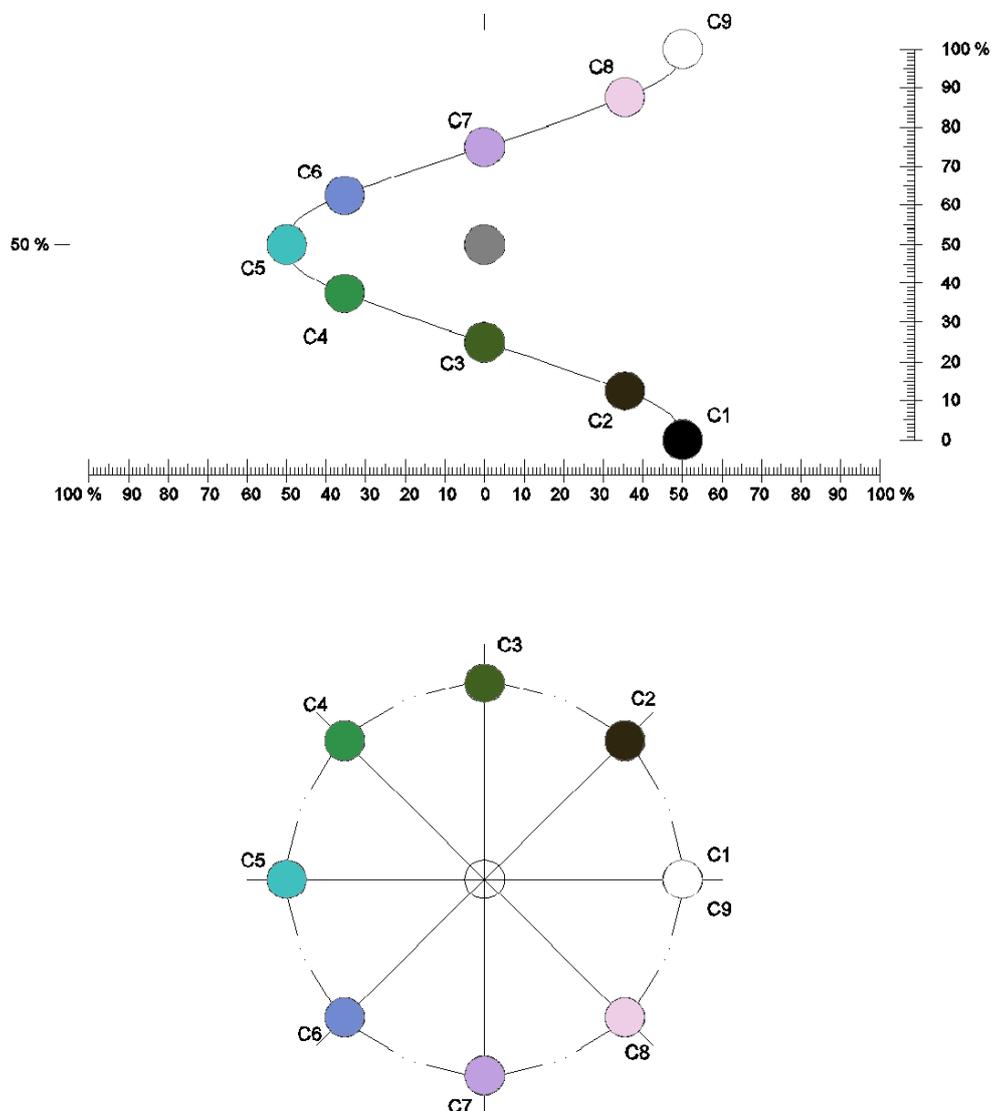


Figura 42. Proyecciones ortográficas de serie de colores dispuesta en hélice (Sistema HLS).

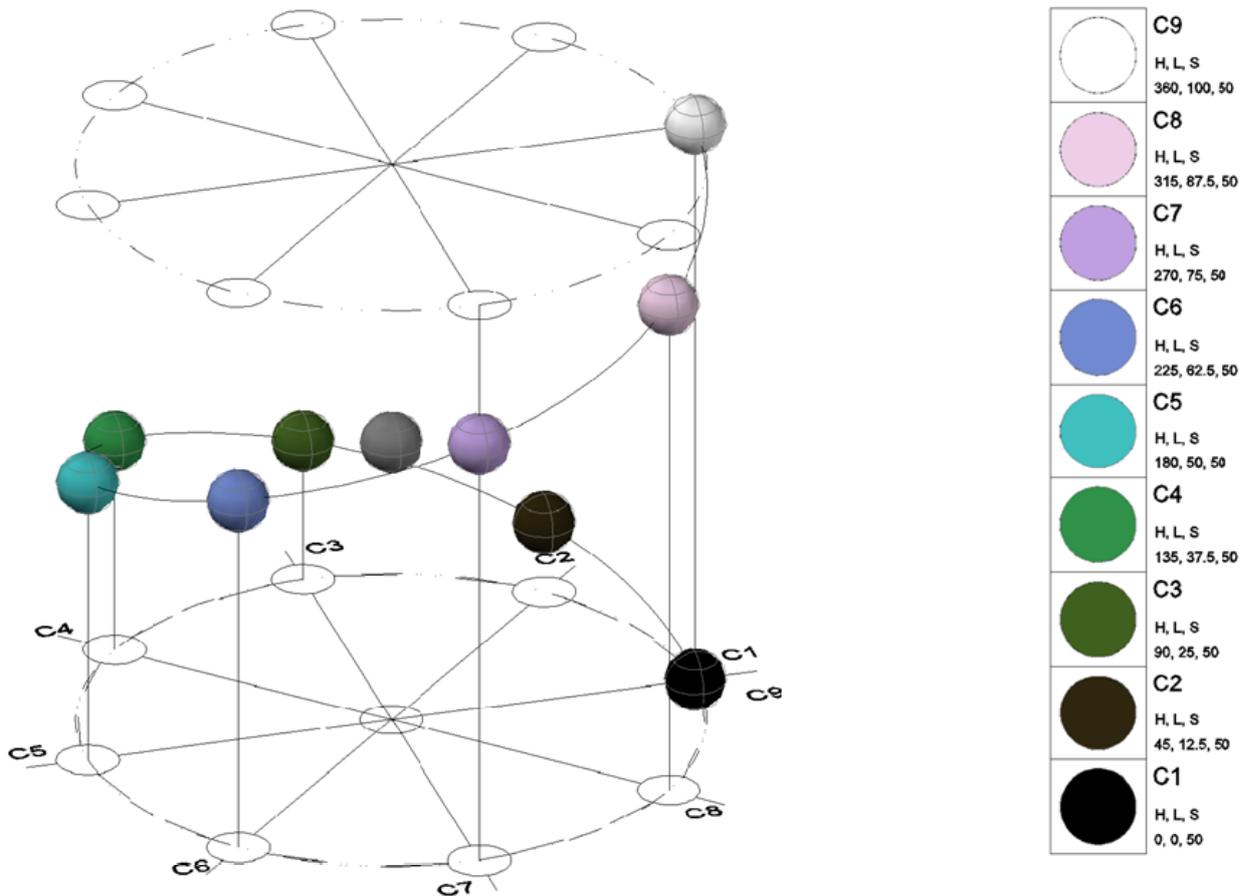


Figura 43. Serie de colores dispuesta en hélice (Sistema HLS). Proyección axonométrica.

Los sonidos y composiciones musicales utilizadas se han generado y editado en formato "wav" mediante la utilización del programa informático Harmony Assistant®. Los gráficos de espectros de las notas musicales se obtuvieron con el programa informático Matlab® a partir de los ficheros "wav" anteriormente generados y según script expuesto en Anexo E.

Los colores utilizados se han generado mediante el apoyo del programa de software gráfico AutoCAD®.

3.2 PROCEDIMIENTO

Se han seleccionado series de notas musicales formando acordes, sucesiones de quintas y sucesiones de octavas. Las notas utilizadas han sido las pertenecientes a la serie de armónicos resultantes de la vibración natural de una nota musical (de la resonancia físico-natural deriva la consonancia del acorde perfecto mayor).

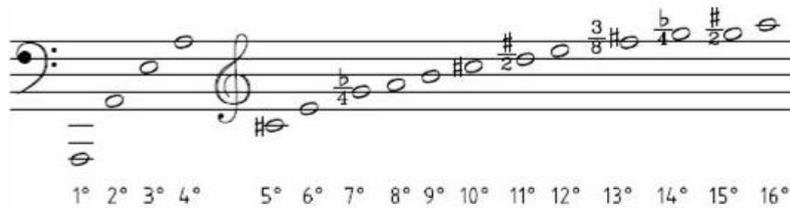


Figura 44. Serie de armónicos de A1.

En la asignación de instrumentos musicales a las series de notas musicales se ha teniendo en cuenta la tesitura de los mismos (Anexo A).

Las series de *hue* a relacionar con las series de notas musicales se han obtenido según la propuesta de Pérez y Gilabert [24] cuyos valores se exponen en Anexo C y, siendo que los colores allí expuestos son valores de colores monocromáticos pertenecientes al espectro de luz, se ha llevado a cabo su conversión aproximada de valores digitales RGB a valores en sistema Munsell.

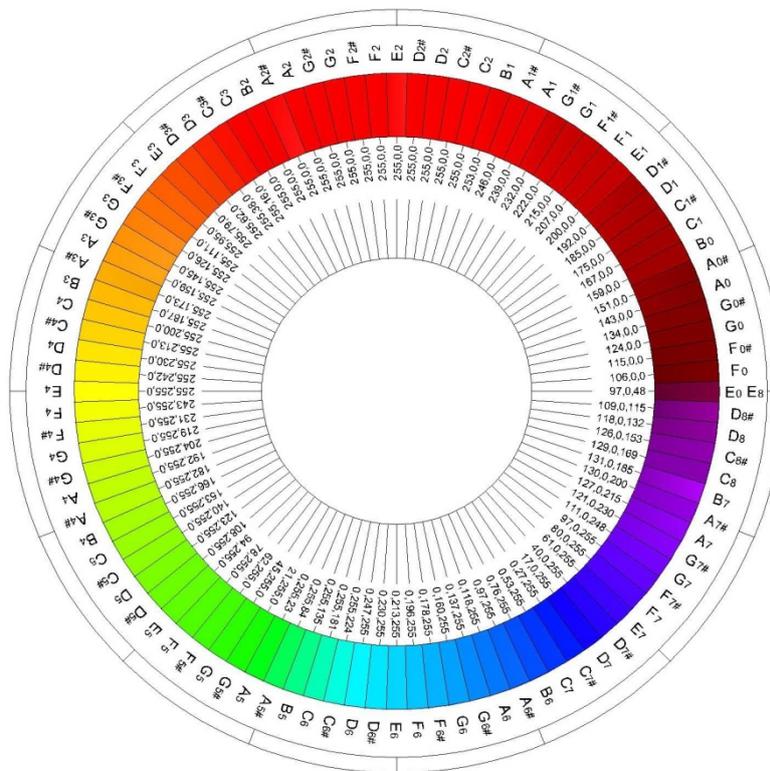


Figura 45. Círculo cromático tonal-musical.

3.2.1 SUCESIONES DE NOTAS DE ACORDES MAYORES

Se han construido sucesiones de notas musicales formando acordes mayores. Las notas utilizadas derivan de la serie de armónicos naturales de la nota dominante.

3.2.1.1 El violonchelo interpreta el acorde mayor de E3: (E3-G3#-B3)

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y *hue*, expuestas en Anexo C, los colores relativos a las notas del acorde de E3 son:

Sonido	Sonido <i>f</i> (Hz)	Sonido λ (m)	Color λ (nm)	Color R, G, B
E3	164,814	2,063	630	255,79,0
G3#	207,652	1,637	613	255,145,0
B3	246,942	1,377	601	255,187,0

Tabla 21. Correspondencia entre sonido y color para E3, G3# y B3.

Con los valores R,G,B y mediante la utilización del programa informático "Munsell Conversión 2008" se han obtenido los valores de *hue*, *value* y *chroma*. La figuras 46, 47 y 48 muestran la hoja de datos obtenida introduciendo los valores R,G,B correspondientes a la notas E3, G3# y B3.

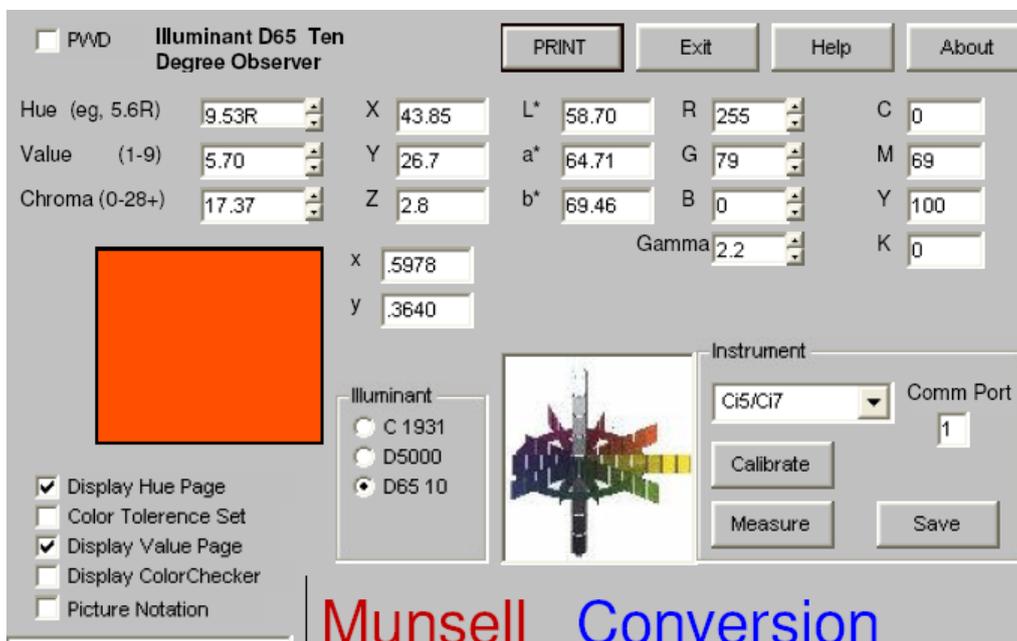


Figura 46. Hoja de datos de color Munsell para R,G,B (255, 79, 0).

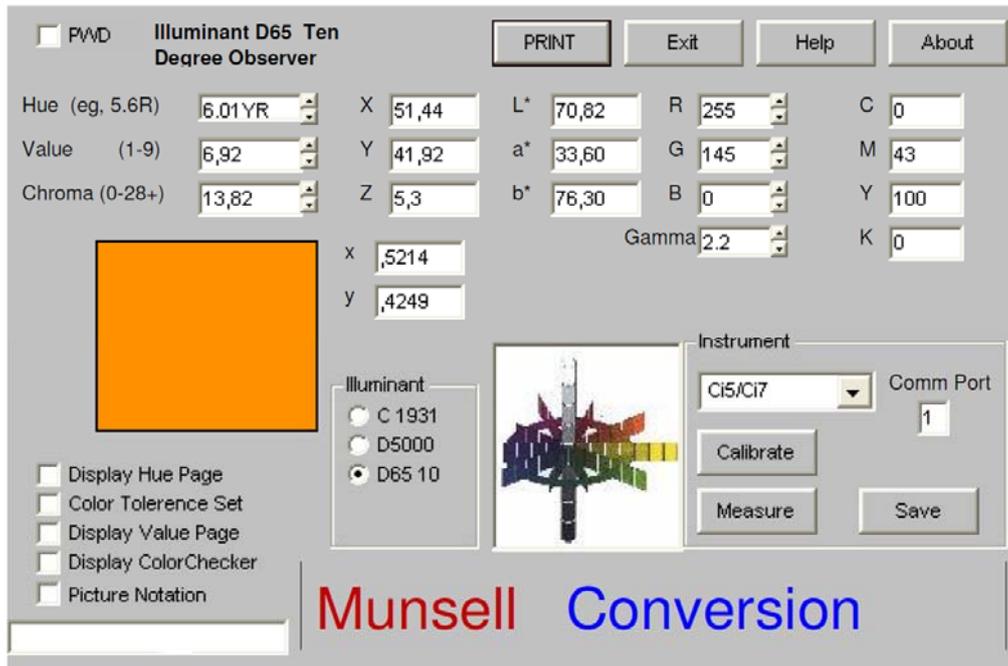


Figura 47. Hoja de datos de color Munsell para R,G,B (255, 145, 0).

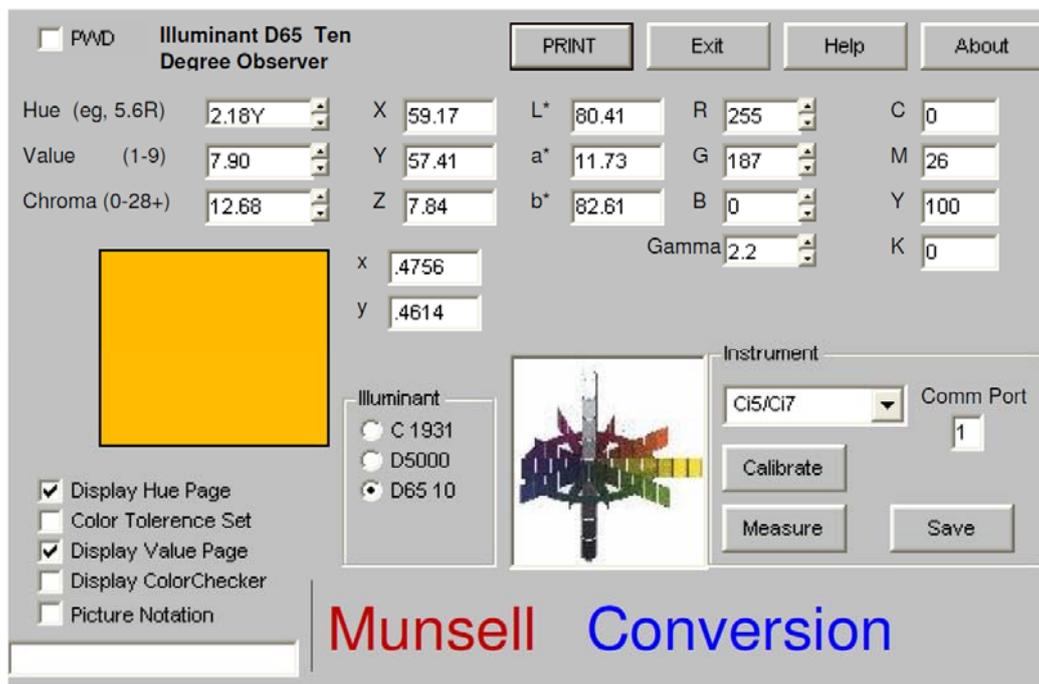


Figura 48. Hoja de datos de color Munsell para R,G,B (255, 187, 0).

Los datos obtenidos para los colores correspondientes a las notas musicales E3, G3# y B3 se representan en la siguiente figura.

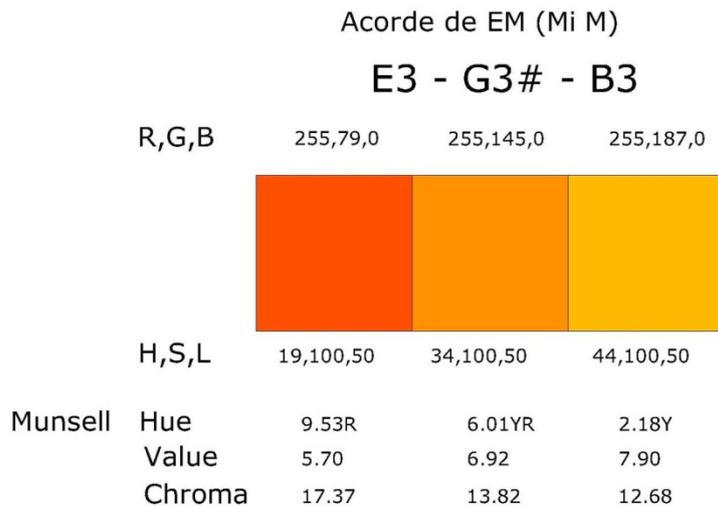


Figura 49. Datos de colores relativos al acorde E3-G3#-B3.

Acorde de EM (Mi M). Valores normalizados a hojas Munsell

Siendo que la construcción de series armónicas de colores se realiza en base al sólido Munsell y que el programa informático "Munsell Conversion" solo permite la entrada de valores *hue* con aproximación de una décima y la entrada de valores enteros para el *value* y *chroma*, es necesario normalizar los valores de *hue*, *value* y *chroma* obtenidos anteriormente (figura 49). El *hue* de valor 9.53R se normaliza a 9.50R, el *hue* de valor 6.01 YR a 6.00YR y el *hue* de valor 2.18Y a 2.00Y. Los valores para el *value* se normalizan a 5, 6.5 y 8. Y el valor del *chroma* se normaliza a 12 para los tres colores considerados.

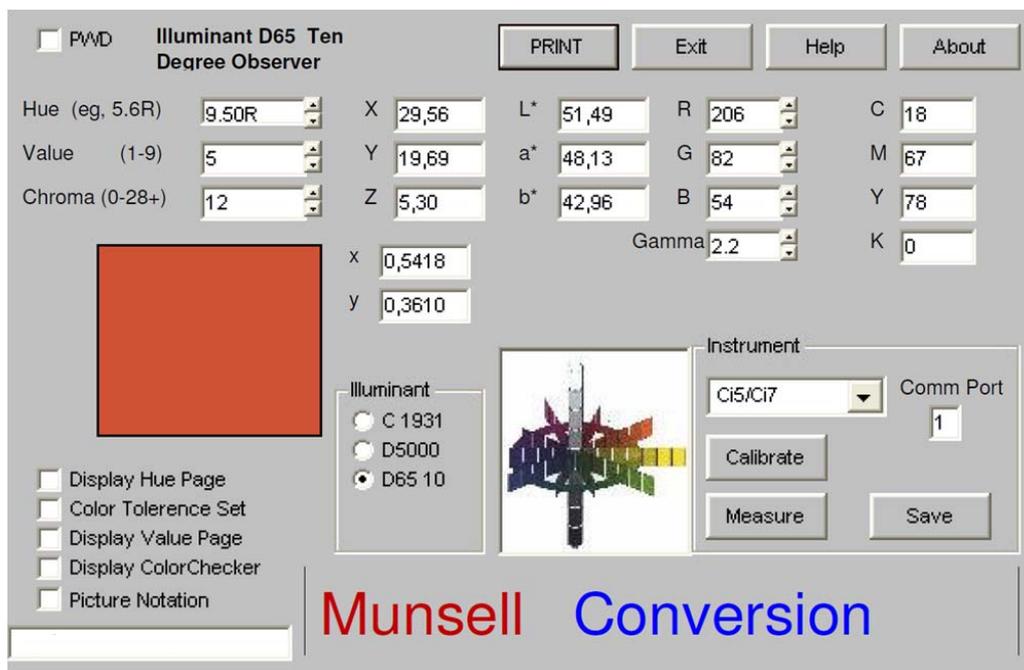


Figura 50. Hoja de datos de color Munsell para 9.50 R 5/12.

Con los valores normalizados de *hue*, *value* y *chroma* y mediante la utilización del programa informático "Munsell Conversión 2008" se obtienen los valores R,G,B (figura 50). En la tabla 22 se exponen los valores R,G,B obtenidos para el acorde E3-G3#-B3.

SONIDO	COLOR		Munsell									(datos corregidos)		
			λ_c (nm)	R, G, B	Munsell			Munsell			R,G,B			
f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B	Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B		
E3	164,814	2,063	630	255,79,0	9.53R	5,70	17,37	9.50R	5	12	206	82	54	
G3#	207,652	1,637	613	255,145,0	6.01YR	6,92	13,82	6.00YR	6.5	12	232	138	35	
B3	246,942	1,377	601	255,187,0	2.18Y	7,90	12,68	2.00Y	8	12	250	192	24	

Tabla 22. Datos Munsell y R,G,B del acorde E3-G3#-B3.

La serie concordante con los valores anteriores es la que se muestra en la figura 51.

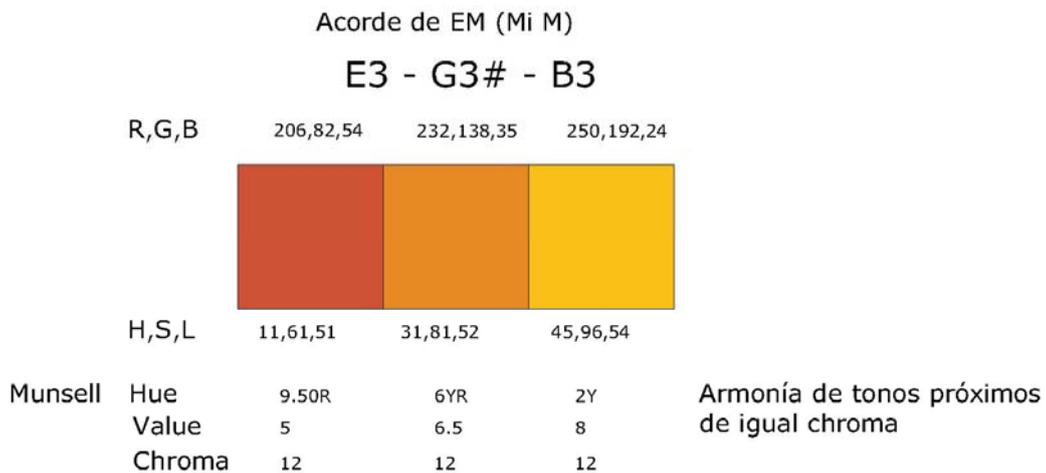


Figura 51. Valores centrados a hojas Munsell.

Para este acorde se ha optado por un armonía de colores con valores de *hue* igualmente espaciados, *value* uniformemente escalado y *chroma* constante [25].

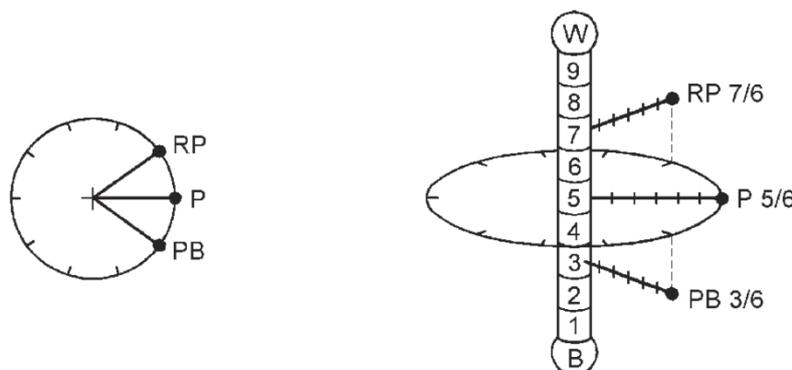


Figura 52. Valores *hue* igualmente espaciados, *value* uniformemente escalado y *chroma* constante.

El cambio de *value* en el acorde considerado es debido a que, en el sólido Munsell, cada tono alcanza el máximo valor de *chroma* a distinto *value*. Por ello, para combinar colores muy saturados es necesario hacerlo en distinta claridad. En la figura 53 se puede observar en el sólido de color Munsell o PCCS (*Practical Color Coordinate System*) [26] que a mayor *chroma* en los *hue* de color la armonía de pureza cambia de *value*.

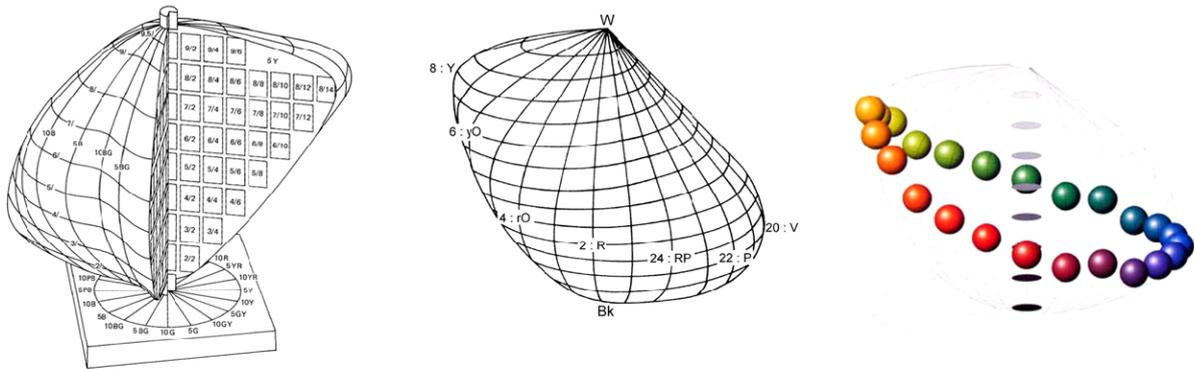


Figura 53. Sólido Munsell y Sólido PCCS japonés.

En la figura 54 se expone la secuencia de colores propuesta para el acorde de E3 emitido por el violonchelo.



Figura 54. Acorde de colores E3-G3#-B3 relativos al violonchelo.

Las notas del acorde emitidas por el violonchelo se pueden "ver" en los espectros representados en la figura 55.

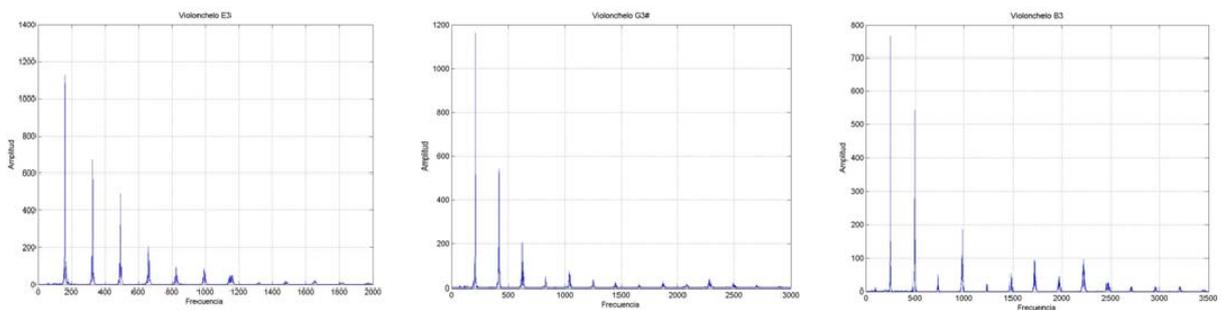


Figura 55. Espectros de notas E3, G3# y B3 emitidas por el violonchelo.

3.2.1.2 El piano interpreta el acorde mayor de G3: (G3-B3-D4)

Para el análisis del acorde de G3 se ha utilizado el sonido del piano de cola.

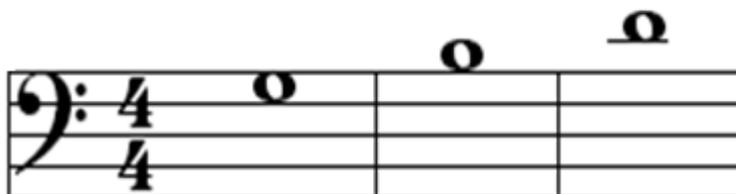


Figura 56. Posición en pentagrama de la sucesión de notas del acorde G3.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y *hue* expuestas en Anexo C los colores relativos a las notas del acorde G3 son:

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (nm)	λ_c (nm)	R, G, B
G3	195,998	1,735	618	255,126,0
B3	246,942	1,377	601	255,187,0
D4	293,665	1,158	588	255,230,0

Tabla 23. Correspondencia entre sonido y color para G3, B3 y D4.

Con el mismo procedimiento realizado en el acorde de E3 analizado anteriormente, a partir de los valores R,G,B se ha obtenido su conversión a valores *hue*, *value* y *chroma*, se han normalizado sus valores para tener una combinación armónica y obtenido sus correspondientes valores R,G,B. En la tabla 24 se exponen los valores Munsell y R,G,B para el acorde G3-B3-D4.

SONIDO	COLOR													
	f (Hz)	λ_m (m)	Colores teóricos						Colores ajustados					
			λ_c (nm)	R, G, B	Munsell			Munsell			R,G,B			
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B		
G3	195,998	1,735	618	255,126,0	3.63YR	6,52	14,74	3.50YR	6	7	200	131	92	
B3	246,942	1,377	601	255,187,0	2.18Y	7,90	12,68	2.00Y	6	7	181	142	65	
D4	293,665	1,158	588	255,230,0	8.47Y	8,98	12,62	8.50Y	6	7	160	149	55	

Tabla 24. Datos Munsell y R,G,B del acorde G3-B3-D4.

Siendo que el piano tiene menor pureza de timbre que el violonchelo, para relacionar los acordes musicales y de color, el valor de *chroma* será menor que el utilizado para el violonchelo. Para un *value* de 6 (figura 57), los *hue* 3.50 YR, 2.00 Y y 8.50 R se pueden igualar con un *chroma* de valor 7.

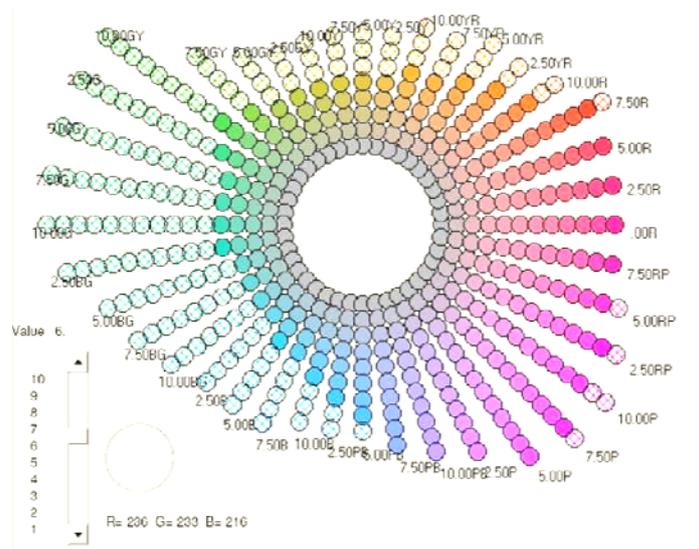


Figura 57. Círculos de color Munsell para *value* 6.

En la figura 58 se expone la secuencia armónica de colores propuesta para el acorde de G3 emitido por el piano.

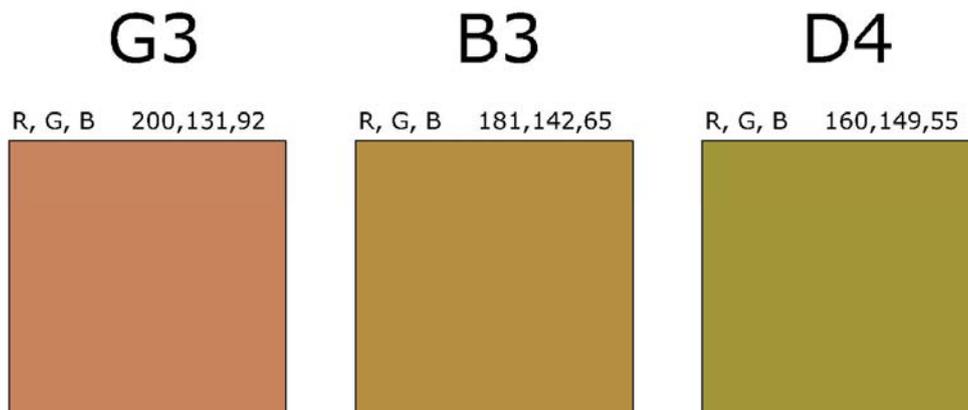


Figura 58. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Acorde G3-B3-D4

Las notas del acorde emitidas por el piano se pueden "ver" en los espectros representados en la figura 59.

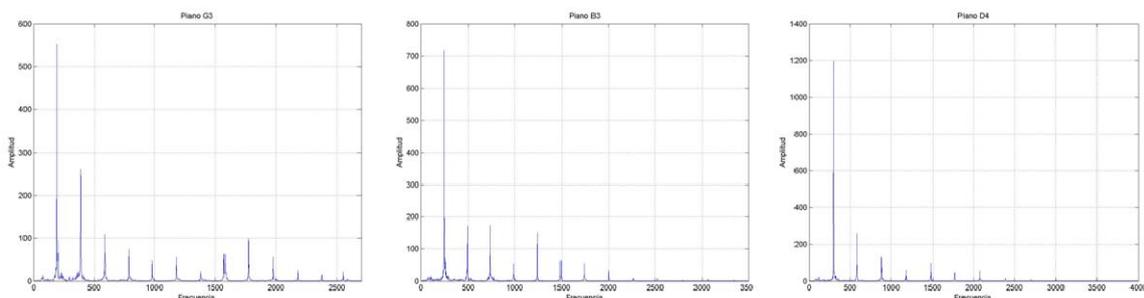


Figura 59. Espectros de notas G3, B3 y D4 emitidas por el piano.

3.2.1.3 El piano interpreta el acorde mayor de D4: (D4-F4#-A4)

Para el análisis del acorde de D4 se ha utilizado el sonido del piano de cola.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y *hue* expuestas en Anexo C los colores relativos a las notas del acorde D4 son:

Sonido	Sonido f (Hz)	Sonido λ_m (m)	Color λ_c (nm)	Color R, G, B
D4	293,665	1,158	588	255,230,0
F4#	369,994	0,919	572	231,255,0
A4	440,000	0,773	559	192,255,0

Tabla 25. Correspondencia entre sonido y color para D4, F4# y A4.

Con el mismo procedimiento realizado para los acordes E3 y G3, analizados anteriormente, se obtienen los valores normalizados de *hue* y valores ajustados en *value* y *chroma* para tener una combinación armónica.

SONIDO	COLOR												
	f (Hz)	λ_m (m)	Colores teóricos					Colores ajustados					
			λ_c (nm)	R, G, B	Munsell			Munsell			R,G,B		
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B	
D4	293,665	1,158	588	255,230,0	8.47Y	8,98	12,62	8.50Y	6	7	160	149	55
F4#	369,994	0,919	572	231,255,0	4.26GY	9,44	13,60	4.50GY	6	7	136	156	67
A4	440,000	0,773	559	192,255,0	6.39GY	9,19	14,78	6.50GY	6	7	124	159	77

Tabla 26. Datos Munsell y R,G,B del acorde D4-F4#-A4.

A igual que para los acordes analizados anteriormente, para el acorde de D4 emitido por el piano se propone su correspondiente combinación armónica en el acorde de color relativo al piano.

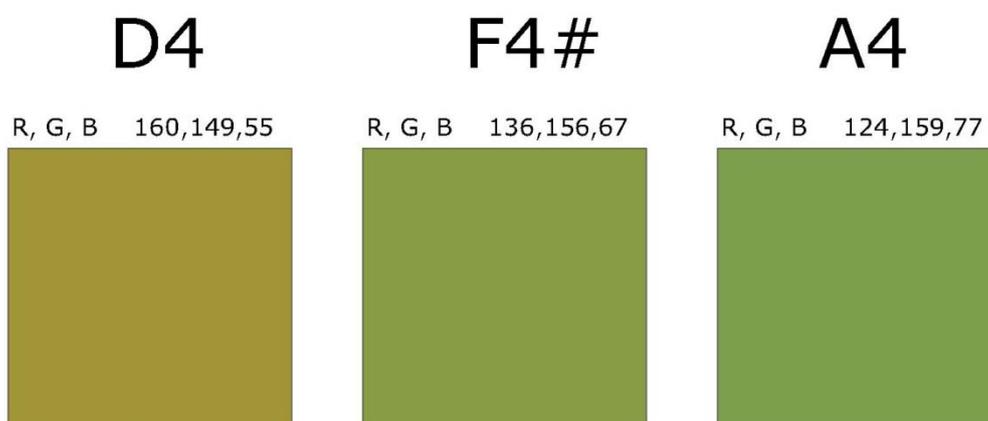


Figura 60. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Acorde D4-F4#-A4

3.2.1.4 El piano interpreta el acorde mayor de B5: (B5-D6#-F6#)

Para el análisis del acorde de B5 se ha utilizado el sonido del piano de cola.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y *hue* expuestas en Anexo C los colores relativos a las notas del acorde B5 son:

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B
B5	987,767	0,344	501	0,255,135
D6#	1244,508	0,273	484	0,230,255
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255

Tabla 27. Correspondencia entre sonido y color para B5, D6# y F6#.

Con el mismo procedimiento que para el acorde de E3, G3 y D4 analizados anteriormente, se obtienen los valores normalizados de *hue* y valores ajustados en *value* y *chroma* para tener una combinación armónica.

SONIDO		COLOR											
f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	Colores teóricos			Colores ajustados							
			R, G, B	Munsell		Munsell			R,G,B				
			Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B		
B5	987,767	0,344	501	0,255,135	2.18G	8,74	15,19	2.00G	6	7	87	163	110
D6#	1244,508	0,273	484	0,230,255	0.64B	8,28	9,36	0.50B	6	7	30	163	173
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6,76	10,80	10.00B	6	7	87	155	192

Tabla 28. Datos Munsell y R,G,B del acorde B5-D6#-F6.

Para el acorde de B5 emitido por el piano se propone su correspondiente combinación armónica en el acorde de color relativo al piano.

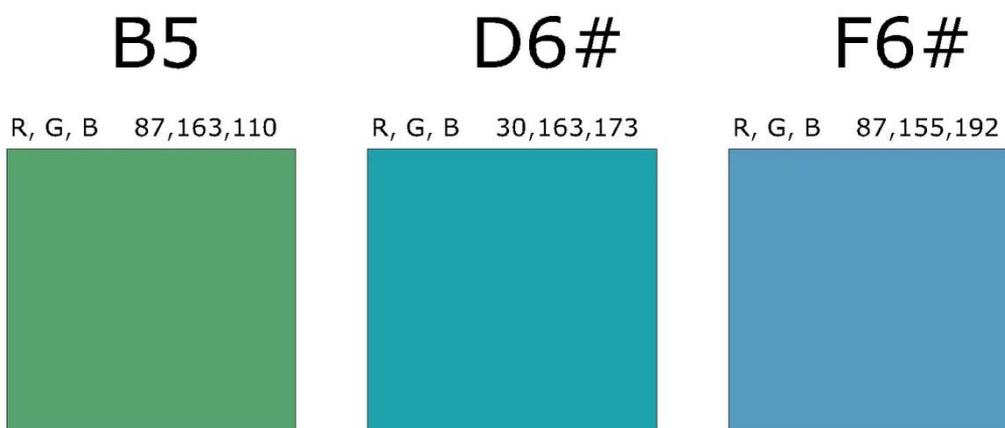


Figura 61. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Acorde B5-D6#-F6#.

3.2.2 SUCESIONES DE NOTAS DE INTERVALOS DE QUINTAS

Se han construido sucesiones de notas musicales en intervalos de quintas.

3.2.2.1 El piano interpreta el intervalo de quinta A4-E5-B5.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y *hue* expuestas en Anexo C los colores relativos a las notas A4, E5 y B5 son:

Sonido	Sonido f (Hz)	Sonido λ_m (m)	Color λ_c (nm)	Color R, G, B
A4	440,000	0,773	559	192,255,0
E5	659,255	0,516	530	94,255,0
B5	987,767	0,344	501	0,255,135

Tabla 29. Correspondencia entre sonido y color para A4, E5 y B5.

Con el mismo procedimiento seguido para los acordes anteriormente analizados, se obtienen los valores normalizados de *hue* y valores ajustados en *value* y *chroma* para tener una combinación armónica.

SONIDO	COLOR												
	f (Hz)	λ_m (m)	Colores teóricos						Colores ajustados				
			λ_c (nm)	R, G, B	Munsell			Munsell			R,G,B		
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B	
A4	440,000	0,773	559	192,255,0	6.39GY	9,19	14,78	6.50GY	6	7	124	159	77
E5	659,255	0,516	530	94,255,0	9.25GY	8,77	18,21	9.00GY	6	7	108	161	91
B5	987,767	0,344	501	0,255,135	2.18G	8,74	15,19	2.00G	6	7	87	163	110

Tabla 30. Datos Munsell y R,G,B del intervalo de quintas A4-E5-B5.

Para la sucesión de quintas A4, E5 y B5 se propone la siguiente combinación armónica en el acorde de color relativo al piano.

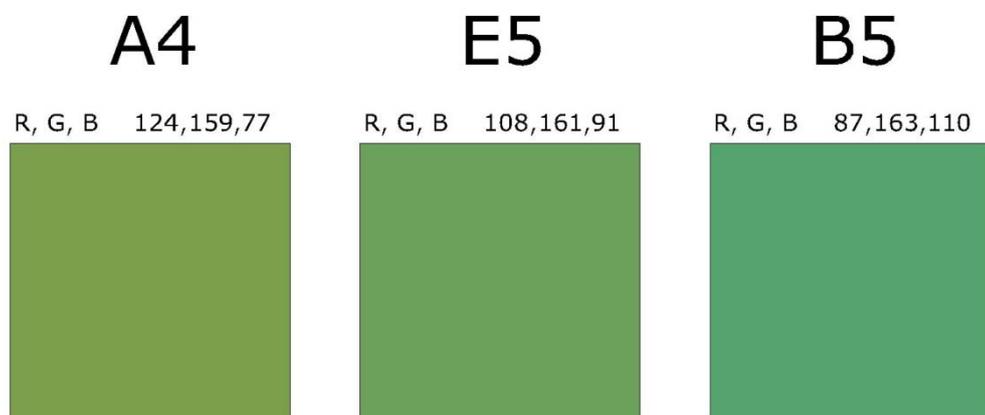


Figura 62. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Intervalo de quintas A4-E5-B5.

3.2.2.2 El órgano interpreta el intervalo de quintas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7#.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y *hue* expuestas en Anexo C los colores relativos al intervalo de quintas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7# son:

Sonido	Sonido <i>f</i> (Hz)	Sonido λ_m (m)	Color λ_c (nm)	Color R, G, B
C3	130,813	2,599	647	255,0,0
G3	195,998	1,735	618	255,126,0
D4	293,665	1,158	588	255,230,0
A4	440,000	0,773	559	192,255,0
E5	659,255	0,516	530	94,255,0
B5	987,767	0,344	501	0,255,135
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255
C7#	2217,461	0,153	443	0,27,255

Tabla 31. Correspondencia entre sonido y color para C3, G3, D4, A4, E5, B5, F6# y C7#.

Con el mismo procedimiento seguido para los acordes anteriormente analizados, se obtienen los valores normalizados de *hue* y valores ajustados en *value* y *chroma* para tener una combinación armónica. Los valores del espacio HLS se han obtenido según lo expuesto en Anexo J.

SONIDO		COLOR									
<i>f</i> (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	Valores teóricos			Valores ajustados					
			R, G, B	Hue	Munsell Value	Chroma	HLS				
				H	L	S					
C3	130,813	2,599	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	0	50	100		
G3	195,998	1,735	255,126,0	3.63YR	6,52	14,74	30	50	100		
D4	293,665	1,158	255,230,0	8.47Y	8,98	12,62	50	50	100		
A4	440,000	0,773	192,255,0	6.39GY	9,19	14,78	75	50	100		
E5	659,255	0,516	94,255,0	9.25GY	8,77	18,21	98	50	100		
B5	987,767	0,344	0,255,135	2.18G	8,74	15,19	152	50	100		
F6#	1479,978	0,230	0,178,255	9.86B	6,76	10,80	198	50	100		
C7#	2217,461	0,153	0,27,255	8.82R	3,25	19,82	234	50	100		

Tabla 32. Datos Munsell y H,L,S del intervalo de quintas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7#.

La serie de colores teóricos propuestos para el intervalo de quintas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7# es la que se muestra en la figura 63.

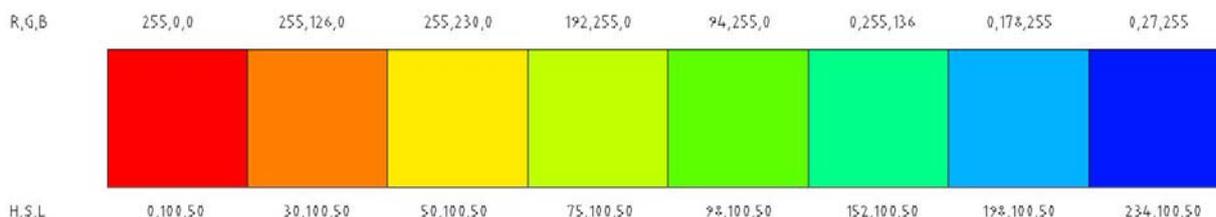


Figura 63. Serie teórica de colores C3, G3, D4, A4, E5, B5, F6# y C7#. (La serie desde el rojo al azul basada en intervalos de quintas se asemeja a la sucesión de notas y colores propuesta por Alexander Scriabin. Anexo U).

De la serie teórica de colores expuesta (figura 63) se observa un contraste en el *value*. Para que el *value* propio de los colores no influya en una percepción armónica de los mismos, se han ajustado el *value* de los colores. En la figura 64 se muestra la serie de colores ajustada para una mayor uniformidad en el *value*.

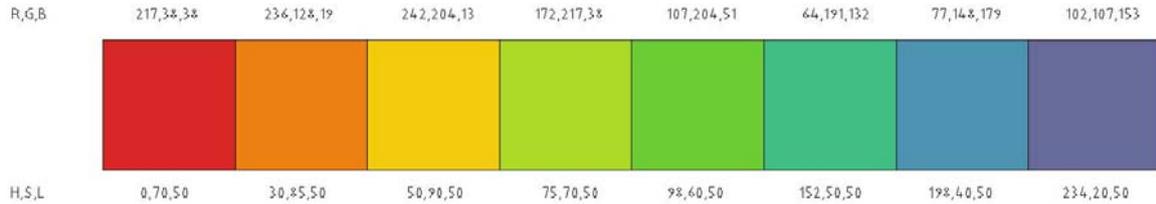


Figura 64. Correspondencia de colores y notas musicales del órgano. Intervalo de quintas C3, G3, D4, A4, E5, B5, F6# y C7#.

3.2.3 SUCESIONES DE NOTAS DE INTERVALOS DE OCTAVAS

Se han construido sucesiones de notas musicales en intervalos de octavas.

3.2.3.1 El piano interpreta la secuencia de octavas C3-C4-C5-C6-C7-C8.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y *hue* expuestas en Anexo C los colores relativos a la secuencia de octavas C3-C4-C5-C6-C7-C8 son:

Sonido	Sonido <i>f</i> (Hz)	Sonido λ_m (m)	Color λ_c (nm)	Color R, G, B
C3	130,813	2,599	647	255,0,0
C4	261,626	1,300	597	255,200,0
C5	523,251	0,650	547	153,255,0
C6	1046,502	0,325	497	0,255,181
C7	2093,005	0,162	447	0,53,255
C8	4186,009	0,081	397	129,0,169

Tabla 33. Correspondencia entre sonido y color para C3, C4, C5, C6, C7 y C8.

Con los valores R,G,B se han obtenido los valores de *hue*, *value* y *chroma*.

SONIDO	COLOR													
	<i>f</i> (Hz)	λ_m (m)	Colores teóricos						Colores ajustados					
			λ_c (nm)	R, G, B		Munsell			Munsell			R,G,B		
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B		
C3	130,813	2,599	647	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	8.00R	6	7	204	127	113	
C4	261,626	1,300	597	255,200,0	3.84Y	8,23	12,50	4.00Y	6	7	174	144	60	
C5	523,251	0,650	547	153,255,0	7.86GY	8,99	15,90	7.50GY	6	7	116	160	83	
C6	1046,502	0,325	497	0,255,181	4.57G	8,82	12,78	4.50G	6	7	74	164	122	
C7	2093,005	0,162	447	0,53,255	7.05PB	3,58	25,28	7.00PB	6	7	130	146	195	
C8	4186,009	0,081	397	129,0,169	4.71P	3,24	17,84	5.00P	6	7	165	136	184	

Tabla 34. Datos relativos a sonido y color para la serie de octavas C3, C4, C5, C6, C7 y C8.

Para la sucesión de notas C3, C4, C5, C6, C7 y C8 se obtiene la siguiente combinación armónica en la serie de colores relativa al piano.

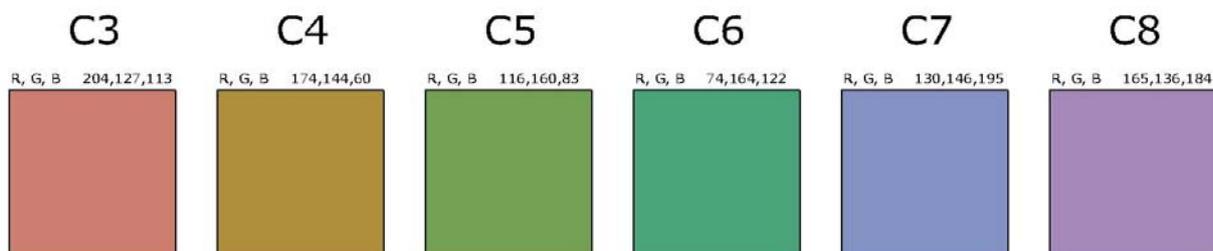


Figura 65. Correspondencia de colores y notas musicales del piano. Secuencia de octavas C3 a C8. Colores 8R 6/7, 4Y 6/7, 7.5 GY 6/7, 7PB 6/7 y 5P 6/7

3.2.4 Sucesiones de notas de intervalos de dobles octavas

Se han construido sucesiones de notas musicales en intervalos de dobles octavas.

3.2.4.1 El órgano interpreta las notas E3-E5-E7.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y *hue* expuestas en Anexo C los colores relativos a la secuencia de dobles octavas E3-E5-E7 son:

Sonido	Sonido f (Hz)	Sonido λ_m (m)	Color λ_c (nm)	Color R, G, B
E3	164,814	2,063	630	255,79,0
E5	659,255	0,516	530	94,255,0
E7	2637,020	0,129	430	61,0,255

Tabla 35. Correspondencia entre sonido y color para E3, E5 y E7.

Con los valores R,G,B se han obtenido los valores de *hue*, *value* y *chroma*.

SONIDO			COLOR										
f (Hz)	λ_m (m)	Colores teóricos						Colores ajustados					
		λ_c (nm)	R, G, B	Munsell			Munsell			R,G,B			
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B	
E3	164,814	2,063	630	255,79,0	9.53R	5,70	17,37	9.53R	5.5	13	226	93	54
E5	659,255	0,516	530	94,255,0	9.25GY	8,77	18,21	9.25GY	5.5	13	31	156	12
E7	2637,020	0,129	430	61,0,255	7.50PB	3,33	27,58	7.50PB	5.5	13	104	128	225

Tabla 36. Datos relativos a sonido y color para la serie de octavas E3, E5, y E7.

Para la sucesión de notas E3, E5, y E7 se obtiene la siguiente combinación armónica en la serie de colores relativa al órgano.

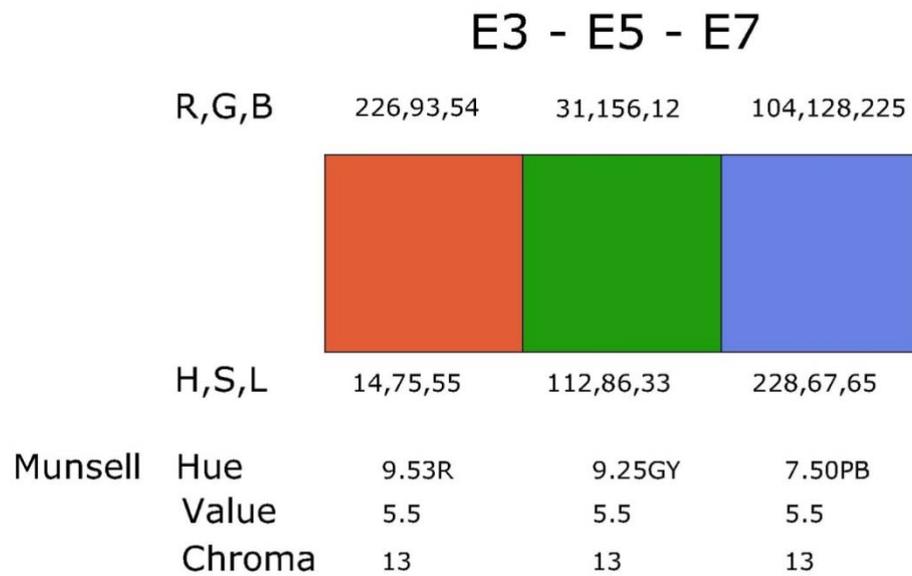


Figura 66. Correspondencia de colores y notas musicales del órgano. Secuencia de dobles octavas E3-E5-E7.

4 ANÁLISIS ENTRE CHROMA Y TIMBRE MUSICAL

El objetivo de este estudio es obtener una propuesta de concordancia entre colores, del mismo *hue* y *value*, e instrumentos musicales que emiten la misma nota con el mismo volumen.

COLOR		SONIDO	
	VALOR		VALOR
Hue	Constante	Altura	Constante
Value	Constante	Volumen	Constante
Chroma	Variable	Timbre	Variable

Tabla 37. Valores de los atributos del color y sonido para la concordancia entre chroma y timbre de instrumento musical.

4.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

Una nota musical no se distingue mejor cuando suena más fuerte sino cuando suena sola. Cuando suenan al unísono varias notas de distinta frecuencia, el sonido resultante dificulta la distinción de cada una de ellas. Cuando suena una sola nota musical el sonido se distingue mejor (es más limpio). En el primer caso el sonido de la nota dominante se distingue menos. Se puede decir entonces: *“El sonido de una sola nota musical es más puro que el sonido de varias notas musicales de distintas frecuencias sonando al unísono”*. En términos de sonido musical, la pureza se relaciona con la menor cantidad de longitudes de onda distintas emitidas. Así, una nota musical emitida por un instrumento puede considerarse más pura cuanto menor número de armónicos genere.

Para un *hue* determinado, el *chroma* representa la separación entre la mayor o menor cantidad de color respecto al gris del mismo *value*. Para un mismo nivel de claridad (*value*), un color es más saturado (puro, cromático) cuanto más se aleja del gris. En términos de color, la pureza (el *chroma*) se relaciona con la menor cantidad de longitudes de onda distintas.



Figura 67. Color rojo con 10 %, 60 % y 100 % de pureza.

Para el análisis de la relación entre la variación del *chroma* y el timbre de notas musicales se han utilizado colores con valores constantes de *hue* y *value*. Las series utilizadas se han obtenido del sistema Munsell. La figura 68 muestra un ejemplo con tres colores ubicados en un mismo *hue*, con el mismo *value* y con un distanciamiento proporcional en *chroma*.

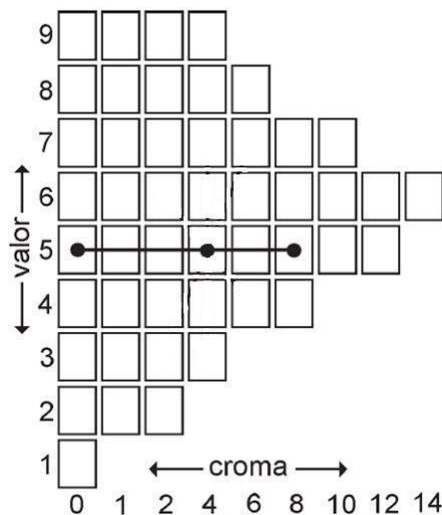


Figura 68. Variaciones de *chroma* para un mismo *hue* y *value*.

4.2 El violonchelo y el fagot emiten la nota A2

La misma nota musical (A2) es emitida por dos instrumentos distintos. Instrumentos de la familia de las cuerdas (violonchelo) y de la familia de viento madera (fagot). Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y tonos de color expuestas en Anexo C, el color de la nota A2 es:

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B
A2	110,000	3,091	659	255,0,0

Tabla 38 Correspondencia entre sonido y color para A2.

La asignación del *chroma* correspondiente a cada instrumento se ha llevado a cabo en estudio anterior sobre el timbre de sonido (2.2.1.3 Grado de pureza de la nota), donde se obtuvo un grado de pureza del 59% para el violonchelo y del 6% para el fagot. En la tabla 39 se exponen los valores en espacio HLS para cada grado de pureza. Para este caso, los colores se han generado en espacio HLS por su relación directa del grado de pureza con la saturación.

SONIDO			COLOR								
NOTA	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B	Valores teóricos			Valores ajustados			
					Munsell		HLS			Pureza de COLOR	
					Hue	Value	Chroma	H	L		S
A2	110,000	3,091	659	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	0	50	100	100 %
								0	50	59	59 %
								0	50	6	6 %

Tabla 39. Datos de la nota A2 y valores de colores relativos al grado de pureza..

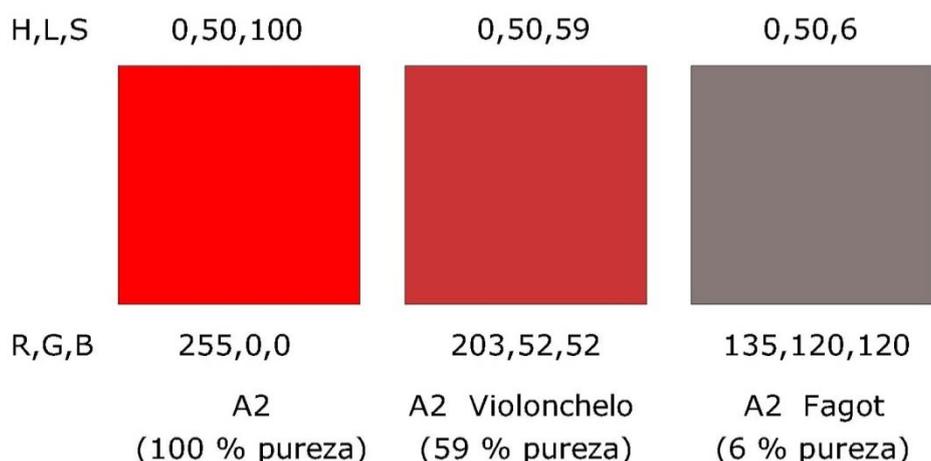


Figura 69. Colores correspondientes a A2 para violonchelo y fagot.

4.3 La trompeta, el violonchelo y el órgano emiten la nota G3#

La misma nota musical (G3#) es emitida por instrumentos tan dispares como son la trompeta, el violonchelo y el órgano.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y tonos de color expuestas en Anexo C, el color de la nota G3# es:

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B
G3#	207,652	1,637	613	255,145,0

Tabla 40. Correspondencia entre sonido y color para G3#.

Con los valores R,G,B y mediante la utilización del programa informático "Munsell Conversión 2008" se han obtenido los valores de *hue*, *value* y *chroma*. La figura 70 muestra la hoja de datos obtenidos introduciendo los valores R,G,B.

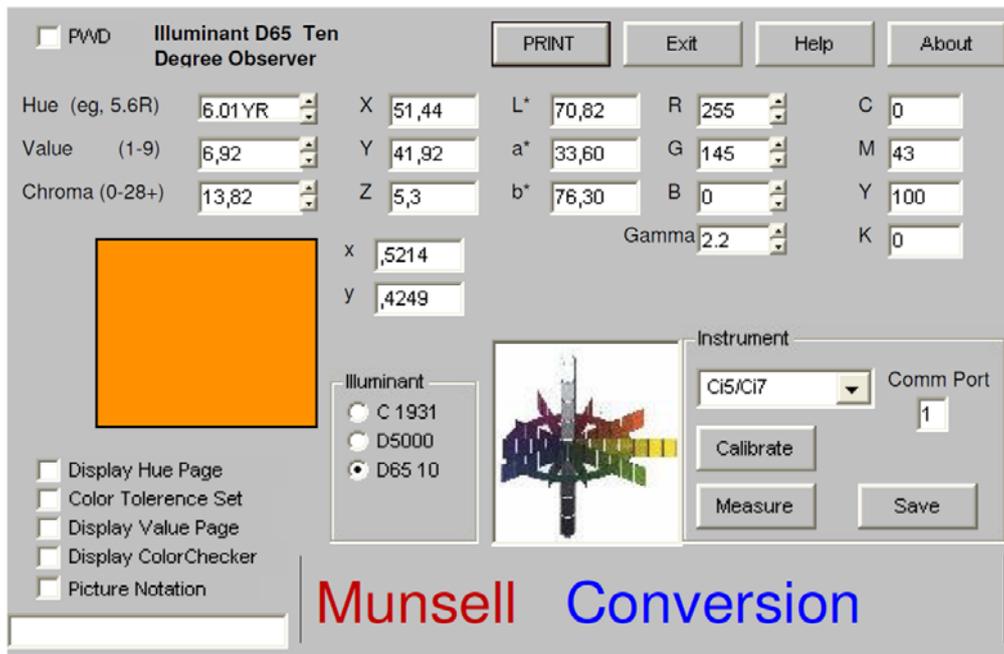


Figura 70. Hoja de datos del color. Partiendo de R,G,B de (255, 145, 0).

Valores de G3# centrados a hojas Munsell

El valor del *hue*, se ha normalizado a 6YR y el *value* a 7. Teniendo en cuenta los espectros de armónicos de cada instrumento (figura 71), se ha estimado un *chroma* de 6 para la trompeta, 9 para el violonchelo y 12 para el órgano.

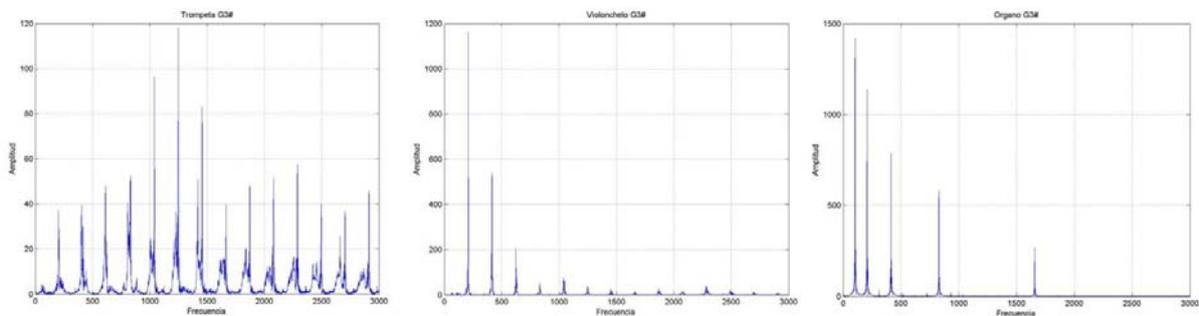


Figura 71. Armónicos de G3# emitidos por la trompeta, violonchelo y órgano.

A partir de los valores normalizados de H, V y C se han obtenido, mediante la utilización del programa informático "Munsell Conversión 2008", los nuevos valores de R,G,B para poder generar los colores mediante programa informático gráfico.

SONIDO			COLOR										
f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	Colores teóricos			Colores normalizados							
			R, G, B	Munsell		Munsell			R, G, B				
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B	
G3#	207,652	1,637	613	255,145,0	6.01YR	6,92	13,82	6.00YR	7	6	219	162	116
G3#	207,652	1,637	613	255,145,0	6.01YR	6,92	13,82	6.00YR	7	9	235	157	87
G3#	207,652	1,637	613	255,145,0	6.01YR	6,92	13,82	6.00YR	7	12	248	151	49

Tabla 41. Datos de la nota G3# normalizados a hojas Munsell.

La serie de colores concordante con los valores anteriores es la que se muestra en la figura 72. Con *hue* 6YR y *value* 7 se ha compuesto la siguiente variación armónica de colores con el mismo escalado de *chroma*

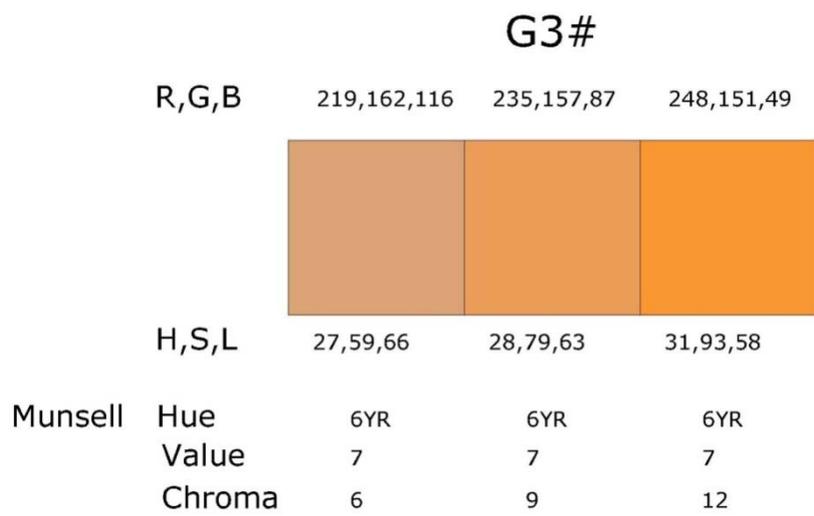


Figura 72. Serie de colores correspondiente a la nota G3# emitida por la trompeta, violonchelo y órgano.

4.4 La trompeta, el violonchelo y el órgano emiten la nota E3

La misma nota musical (E3) es emitida por tres instrumentos distintos. Instrumentos tan dispares como la trompeta, el violonchelo y el órgano.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y tonos de color expuestas en Anexo C, el color de la nota E3 es:

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B
E3	164,814	2,063	630	255,79,0

Tabla 42. Correspondencia entre sonido y color para E3.

Con los valores R,G,B y mediante la utilización del programa informático "Munsell Conversión 2008" se han obtenido los valores de *hue*, *value* y *chroma*. La figura 73 muestra la hoja de datos obtenidos introduciendo los valores R,G,B.

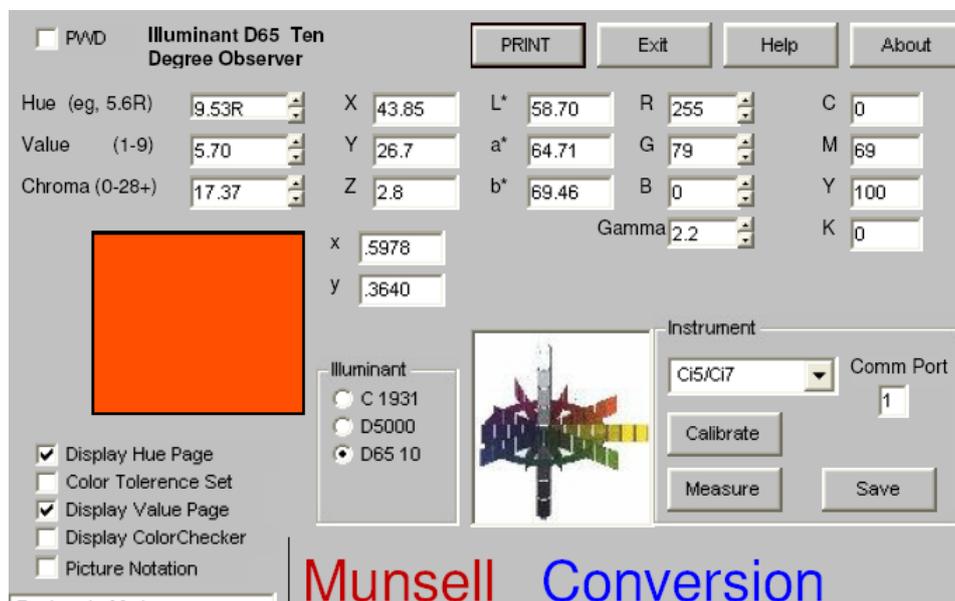


Figura 73 . Hoja de datos del color. Partiendo de R,G,B de (255, 79, 0).

Valores de E3 centrados a hojas Munsell

El valor del *hue*, se ha normalizado a 9.50 R y el *value* a 5. Teniendo en cuenta los espectros de armónicos de cada instrumento, se ha estimado un *chroma* de 6 para la trompeta, 9 para el violonchelo y 12 para el órgano.

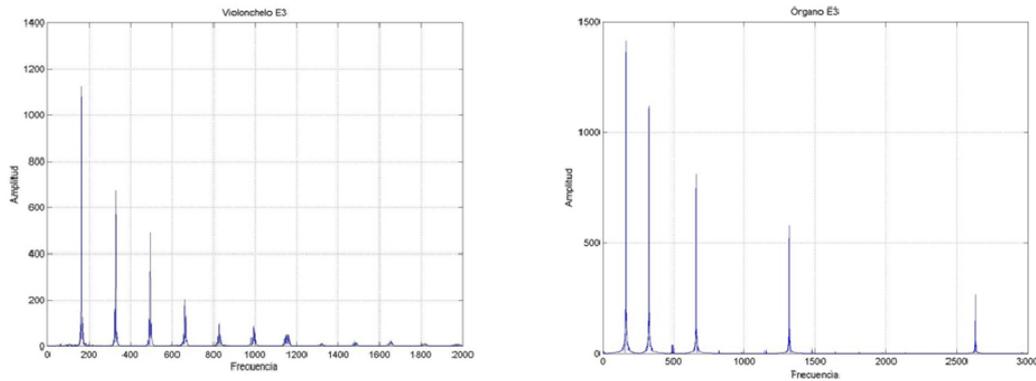


Figura 74. Armónicos de E3 emitidos por el violonchelo y el órgano.

A partir de los valores normalizados de *hue* y *value* y los valores considerados de *chroma*, se han obtenido, mediante la utilización del programa informático "Munsell Conversión 2008", los nuevos valores de R,G,B para generar los colores mediante programa informático gráfico. En la figura 75 se exponen los valores R,G,B obtenidos, a partir del dato 9.50R 5/12, para la nota E3 emitida por el órgano.

Figura 75 . Hoja de datos del color 9.50 R 5/12.

Los valores de la nota musical E3 y sus correspondientes valores de color, así como los valores normalizados de *hue*, *value* y *chroma* se muestran en la tabla 43.

SONIDO	COLOR														
	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	Colores teóricos			Colores ajustados								
				R, G, B			Munsell			Munsell			R, G, B		
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B			
E3	164,814	2,063	630	255,79,0	9.53R	5,70	17,37	9.50R	5	6	170	105	88		
E3	164,814	2,063	630	255,79,0	9.53R	5,70	17,37	9.50R	5	9	189	95	70		
E3	164,814	2,063	630	255,79,0	9.53R	5,70	17,37	9.50R	5	12	206	82	54		

Tabla 43. Datos de la nota E3 ajustados a hojas Munsell.

La serie de colores concordante con los valores anteriores es la que se muestra en la figura 76. Con *hue* 9.50R y *value* 5 se ha compuesto la siguiente variación armónica de colores con un mismo escalado enter valores de *chroma*

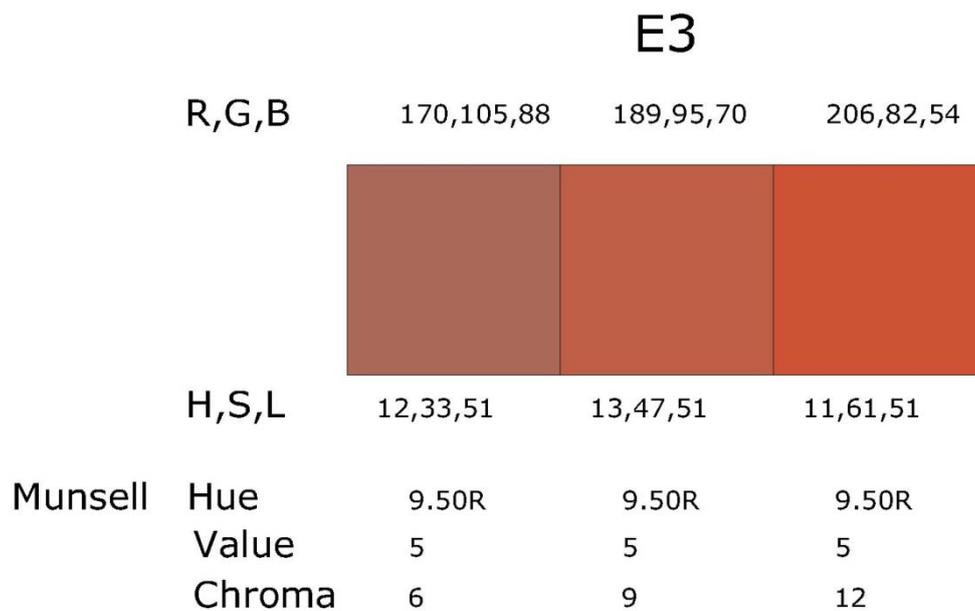


Figura 76. Serie de colores correspondiente a la nota E3 emitida por la trompeta, violonchelo y órgano.

4.5 El piano y el violín emiten el acorde mayor de B5: (B5-D6#-F6#)

La serie de notas del acorde mayor de B5 son emitidas por el piano y por el violín.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y tonos de color expuestas en Anexo C, los colores de cada nota del acorde son:

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B
B5	987,767	0,344	501	0,255,135
D6#	1244,508	0,273	484	0,230,255
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255

Tabla 44. Correspondencia entre sonido y color para B4, D6# y F6#.

Con los valores R,G,B y mediante la utilización del programa informático "Munsell Conversión 2008", se han obtenido los valores de *hue*, *value* y *chroma*.

SONIDO		COLOR											
f (Hz)	λ_m (m)	Colores teóricos						Colores normalizados					
		λ_c (nm)	R, G, B	Munsell			Munsell			R,G,B			
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B	
B5	987,767	0,344	501	0,255,135	2.18G	8,74	15,19	2.00G	6	7	87	163	110
D6#	1244,508	0,273	484	0,230,255	0.64B	8,28	9,36	0.50B	6	7	30	163	173
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6,76	10,80	10.00B	6	7	87	155	192

Tabla 45. Datos del acorde B5-D6#-F6# normalizados a hojas Munsell. Piano.

El acorde de B5 emitido por el piano se analizó en el apartado 3.2.1.4, donde se propuso el siguiente acorde de colores.



Figura 77. Acorde de colores B5-D6#-F6# a concordar con el piano. Colores 2G 6/7, 0.5B 6/7 y 10B 6/7

Con los mismos valores de *hue* y *value* y con mayor valor de *chroma* se ha asignado el siguiente acorde de colores para el violín.

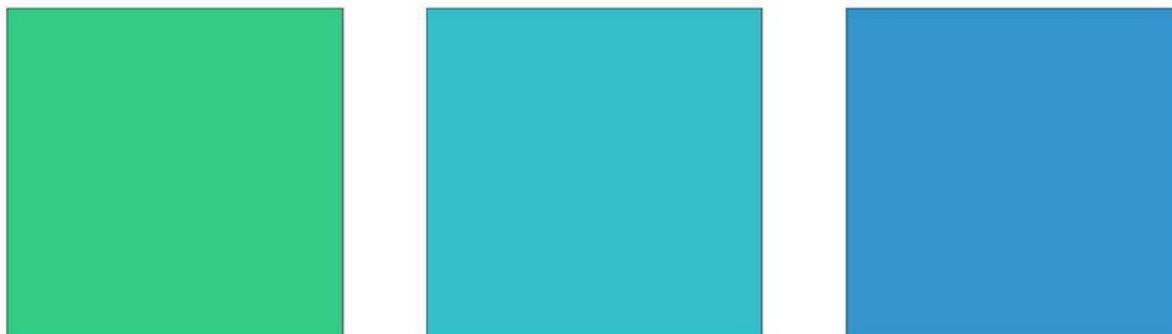


Figura 78. Acorde de colores B5-D6#-F6# a concordar con el violín. Colores 2G 6/20, 0.5B 6/20 y 10B 6/20

4.6 El fagot, violonchelo y órgano interpretan el tema musical "Ilagosta"

En una composición musical, dentro de una tonalidad determinada, existe una nota dominante que es capaz de sonar en cualquier momento del pasaje musical sin provocar disonancia. Es por ello que es posible imaginar y relacionar la misma melodía, interpretada por cada instrumento determinado, con un mismo color dominante.

Para este caso y más allá de una nota o sucesión de notas de acorde o quintas se ha concordado un mismo tema musical interpretado por tres instrumentos diferentes con sus respectivos colores. En la figura 79 se representa un fragmento de un tema musical para dos voces. El pentagrama superior se ha asignado al acompañamiento y el pentagrama indicado con "voz" se ha asignado como voz solista de cada instrumento.



Figura 79. Fragmento de "Ilagosta". Composición propia. (Ver partitura en Anexo N)

Aunque el pentagrama de la voz tiene escrita la melodía entre las notas C4 y B4, las notas reales que suenan por el fagot, violonchelo o el órgano están en la altura entre C3 y B3.

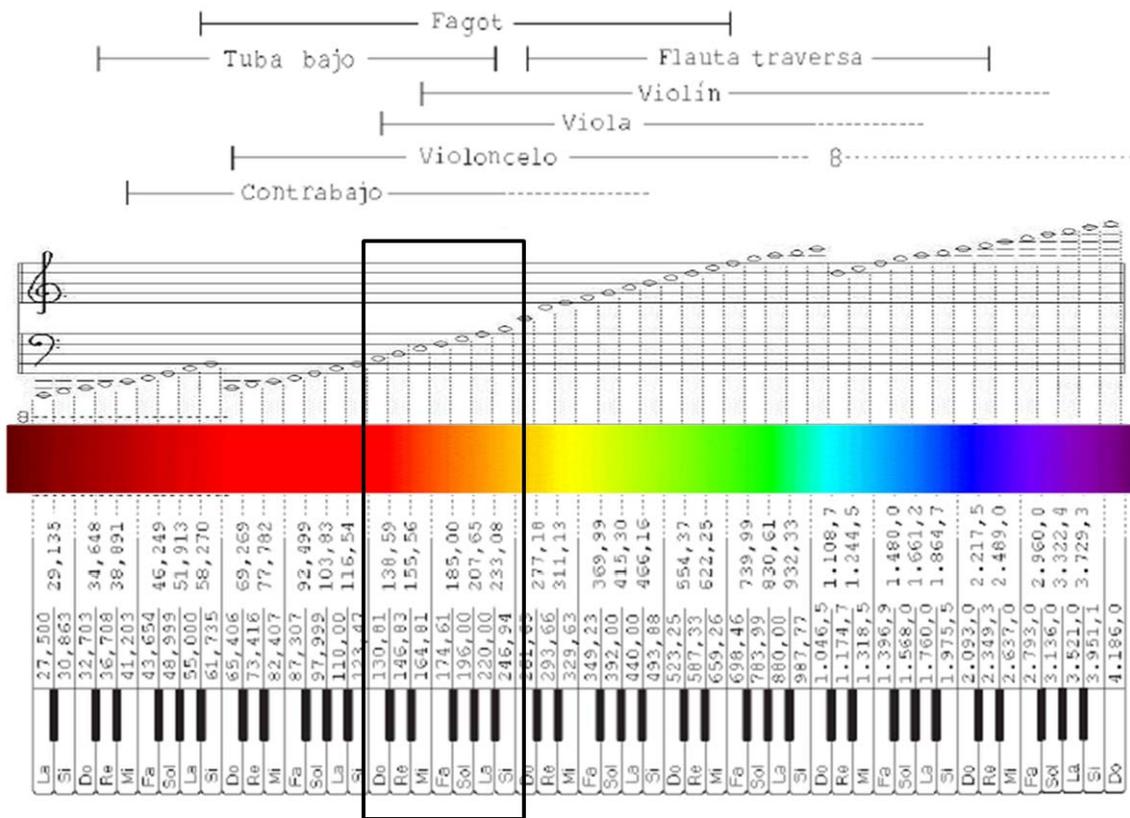


Figura 80. Tonalidad musical y franja relativa de tonos de color.

De esta manera, teniendo en cuenta el grado de pureza de los tres instrumentos, cada cual puede relacionarse con el color dominante de la tonalidad.

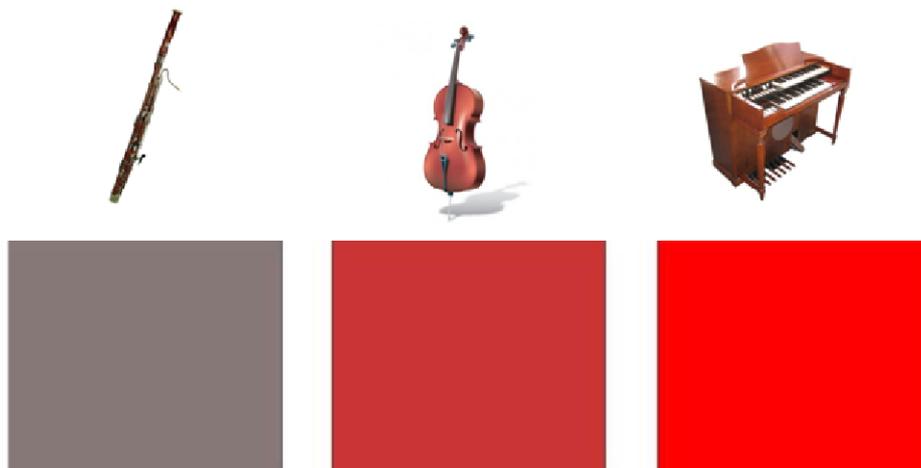


Figura 81. Correspondencia entre instrumento musical y color.

La sucesión de colores para la interpretación de la melodía por cada uno de los instrumentos sería tal como muestra la figura 82.

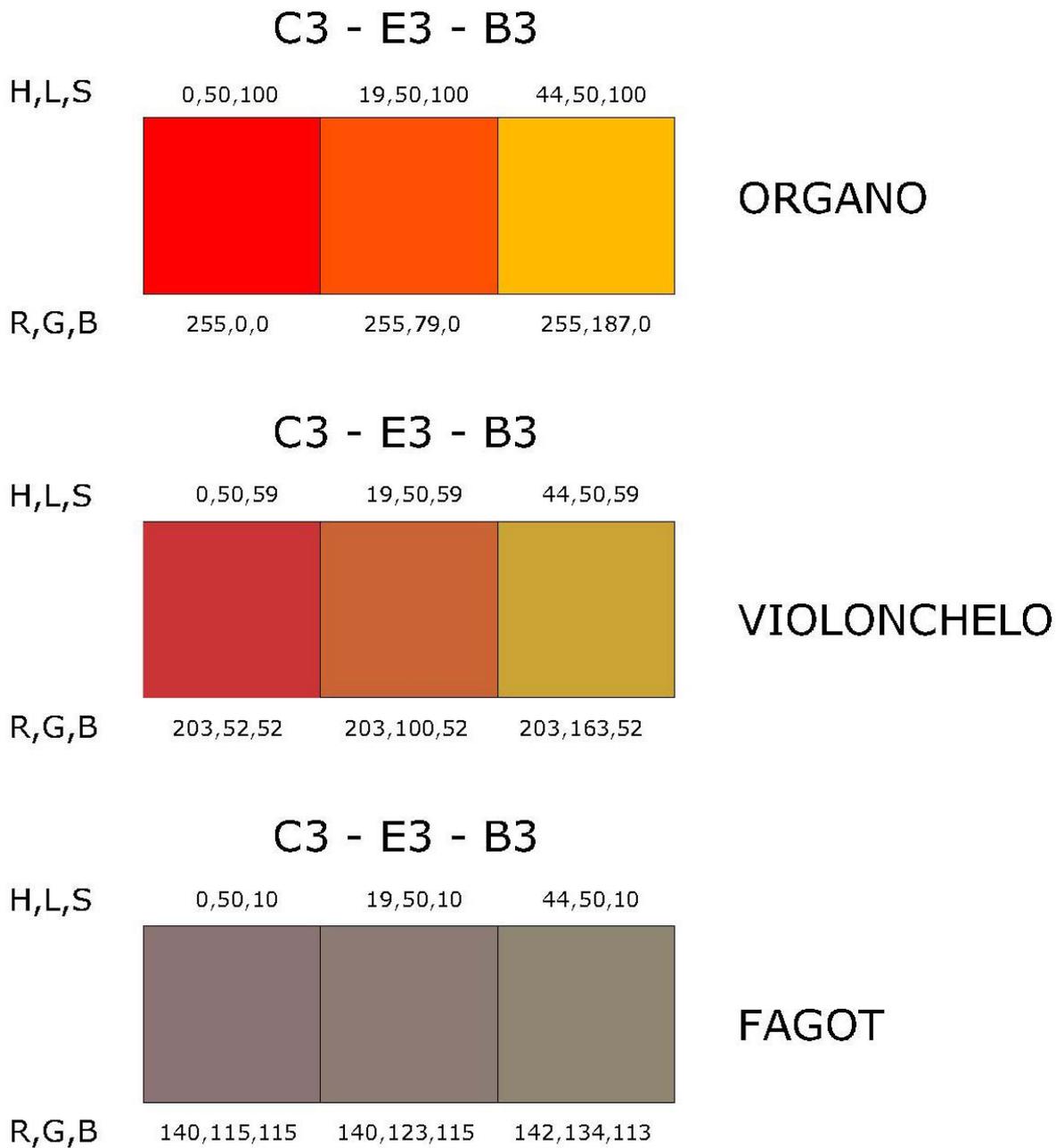


Figura 82. Colores correspondientes a notas C3, E3 y B3 para órgano, violonchelo y fagot.

4.7 Observaciones derivadas del análisis entre *chroma* y timbre musical

Si una misma melodía es interpretada por instrumentos distintos, el color que se relaciona con ella debe estar acorde al instrumento intérprete.

Ya que el fagot tiene una pureza de sonido de un 6 % y el violonchelo de un 59 %, a la misma melodía interpretada por cada uno de estos instrumentos le corresponde un color de distinto *chroma*.



Figura 83. Propuesta de relación de color para el fagot y para el violonchelo. (VII Congreso de Investigación "La investigación ante la sociedad del conocimiento. Sostenibilidad y medioambiente").

La primera línea de investigación para el encuentro entre *chroma* de color y timbre de instrumento musical podría tomar validez tras las propuestas de ordenación y correlación de pureza en color y sonido.

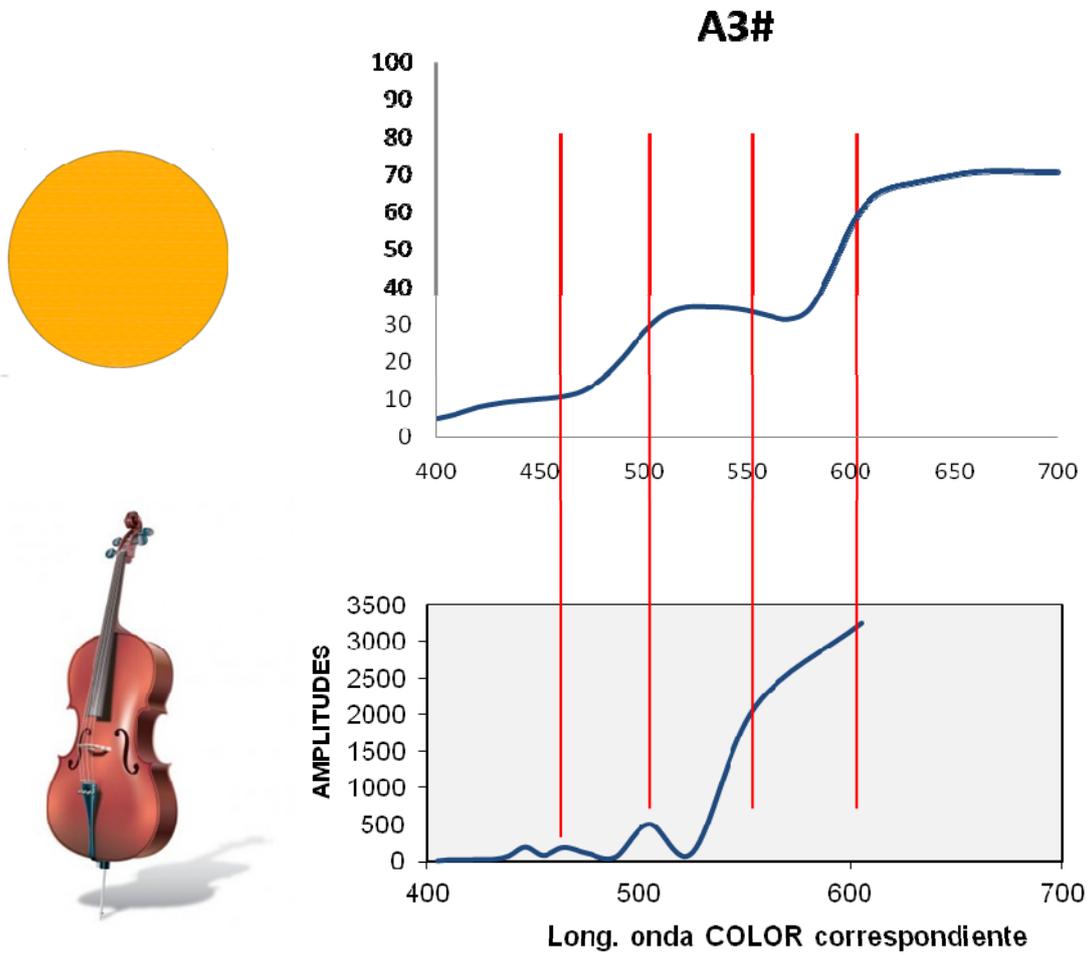


Figura 84. Correspondencia entre gráficos de espectros de color y sonido musical.

5 ANÁLISIS ENTRE VALUE E INTENSIDAD DE SONIDO

El objetivo de este estudio es una propuesta de concordancia entre la variación de *value* (en series de colores del mismo hue y *chroma*) y la variación de la intensidad sonora de una nota musical emitida por un instrumento musical.

COLOR		SONIDO	
	VALOR		VALOR
Hue	Constante	Altura	Constante
Value	Variable	Volumen	Variable
Chroma	Constante	Timbre	Constante

Tabla 46. Valores de los atributos del color y sonido para la concordancia entre value e intensidad de sonido musical.

5.1 CONSIDERACIONES PREVIAS

Un color más claro se percibe más cercano que el mismo color más oscuro. En la figura 85 se puede observar que en la propia gama cromática existen colores más claros que otros.



Figura 85. Claridad de la gama cromática [27]

En grafismo, al representar un volumen se utiliza el claro-oscuro (figura 86) para transmitir el efecto de **cercanía** sobre una superficie plana. Así mismo, sobre una base de papel blanco, una zona de color más oscuro tiene mayor peso que una zona con el mismo color más claro.

Percibimos con mayor claridad las superficies de los objetos más cercanos al observador. Y es habitual usar variaciones de sombras y luces para generar información de relieve o profundidad (tridimensional) sobre un plano.



Figura 86. Madona amamantando a su hijo. Miguel Angel. [27]

En la figura 87 se exponen los niveles energéticos de luminosidad de los colores luz primarios y secundarios. Los colores cian, amarillo y magenta tienen mayor energía. el blanco es el de mayor energía y el negro el de menor energía.

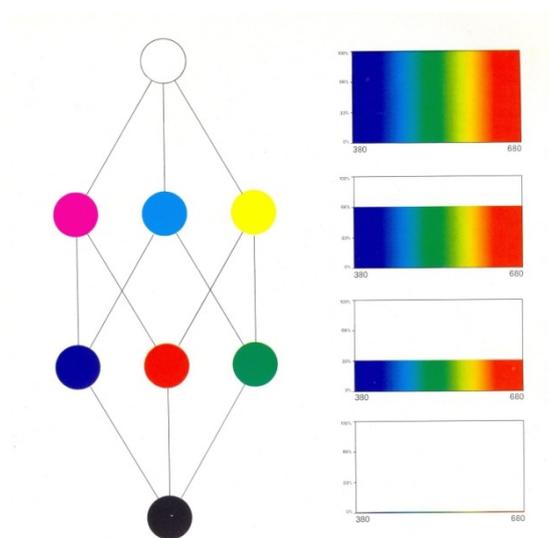


Figura 87. Romboedro de Küppers. [28]

El sonido se percibe con mayor energía cuanto más cerca está el receptor respecto al cuerpo emisor. Para dos instrumentos musicales y un observador situado a la misma distancia de ambos, se percibe como más cercano aquel instrumento con mayor intensidad de volumen.

Así, tanto la vista como el oído perciben como más cercano aquello que refleja, emite o transmite la luz o el sonido con mayor intensidad. Por consiguiente, se puede relacionar un mayor o menor *value* con un mayor o menor volumen o intensidad de sonido.

Para el estudio o análisis de la relación entre la variación de *value* del color y la intensidad (volumen) de notas musicales se han utilizado colores con el mismo *hue* y *chroma* Munsell.

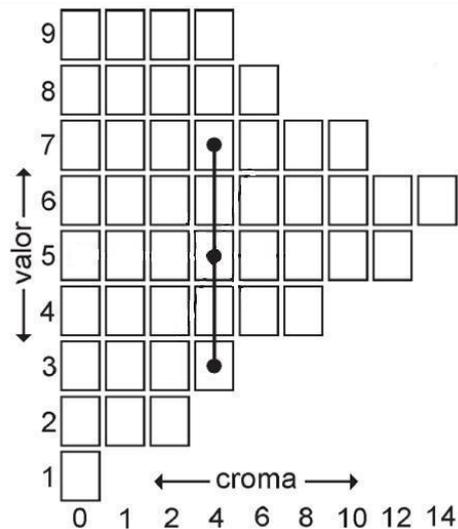


Figura 88. Variaciones de *value* para un mismo *hue* y *chroma*.

Se han preparado cuatro casos de relación entre *value* del color e intensidad (volumen) del sonido.

5.2 Suena el tambor

Siendo que el tambor es un instrumento de percusión y no emite ninguna nota musical concreta, no se puede relacionar con ningún *hue*. Para esta relación se han utilizado tres valores de la escala de grises Munsell.



Figura 89. Colores acromáticos con variación de *value*.

5.3 Suena la guitarra eléctrica

Para este caso se relaciona la variación de volumen de la nota C4 emitida por una guitarra eléctrica con variaciones de *value* para un *hue* dado. En este caso se ha utilizado un sonido con efecto overdrive.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y tonos de color expuestas en Anexo C, el color correspondiente a la nota C4 es:

SONIDO MUSICAL			COLOR		
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B	Hue
C4	261,626	1,300	597	255,200,0	3.84Y

Tabla 47. Correspondencia entre sonido y color para C4.



Figura 90. Color amarillo con variación de *value*.

Se ha utilizado un color sucio (*) para simular la saturación del color correspondiente con el timbre emitido por la guitarra eléctrica con efecto overdrive.

(*) Los adjetivos utilizados para describir niveles altos de las variables percibidas relacionadas con la cromacidad son: *saturado*, *cromático*, *puro*, *intenso*, *vivo* o *fuerte*. Los adjetivos utilizados para describir niveles bajos son: *sucio*, *gris*, *apagado*.

En la figura 91 se observan los espectros de sonido característicos de una guitarra eléctrica con sonido limpio y con efecto.

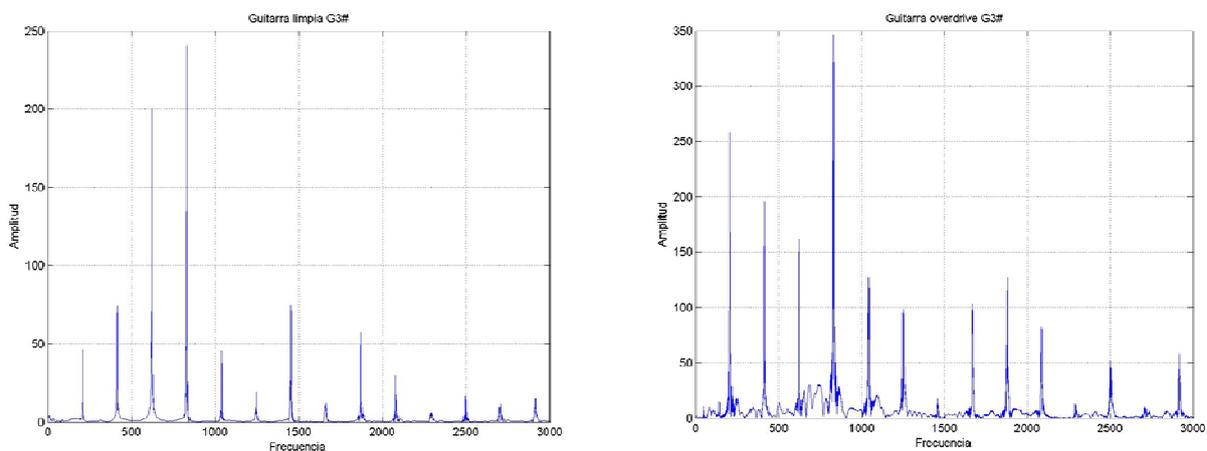


Figura 91. Espectros de guitarra eléctrica. Izquierda: Espectro de la nota G3# con sonido limpio. Derecha: Espectro de la misma nota con efecto overdrive.

5.4 El piano emite la nota C3

Para este caso se relaciona la variación de volumen de la nota C3 emitida por el piano con variaciones de *value* para un *hue* dado. Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y tonos de color expuestas en Anexo C el color correspondiente a la nota C3 es:

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B
C3	130,813	2,599	647	255,0,0

Tabla 48. Correspondencia entre sonido y color para C3.

Con los valores R,G,B se han obtenido los valores de *hue* normalizados, *value* igualmente espaciados y *chroma* en anillo 5.

SONIDO	COLOR												
	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	Colores teóricos			Colores ajustados						
				R, G, B	Munsell		Munsell			R,G,B			
Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B					
C3	130,813	2,599	647	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	8.00R	8	5	247	186	173
C3	130,813	2,599	647	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	8.00R	6	5	190	134	123
C3	130,813	2,599	647	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	8.00R	4	5	137	82	75

Tabla 49. Datos relativos a sonido y color para C3 y 8.00R 8/5, 6/5 y 4/5.

Los colores a concordar con la nota C3 emitida por el piano con aumento paulatino de volumen son 8.00R 4/5, 8.00R 6/5 y 8.00R 8/5.



Figura 92. Colores 8.00R 4/5, 8.00R 6/5 y 8.00R 8/5.

5.5 El piano emite la nota F6#

Para este caso se relaciona la variación de volumen de la nota F6# emitida por el piano con variaciones de *value para un hue dado*.

Teniendo en cuenta las correspondencias entre notas musicales y tonos de color expuestas en Anexo C el color correspondiente a la nota F6# es:

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255

Tabla 50. Correspondencia entre sonido y color para F6#.

Con los valores R,G,B se han obtenido los valores de *hue* normalizados , *value* igualmente espaciados y *chroma* en anillo 6.

5 ANÁLISIS ENTRE VALUE E INTENSIDAD DE SONIDO

SONIDO			COLOR										
f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	Colores teóricos					Colores ajustados					
			R, G, B	Munsell			Munsell			R,G,B			
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B	
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6.,76	10,80	10.00B	8	6	147	209	242
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6.,76	10,80	10.00B	7	6	124	181	212
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6.,76	10,80	10.00B	6	6	98	154	185
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6.,76	10,80	10.00B	5	6	73	128	159
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6.,76	10,80	10.00B	4	6	45	102	134

Tabla 51. Datos relativos a sonido y color para F6# y 10.00B 8/6, 7/6, 6/6, 5/6 y 4/6.

Los colores a concordar con la nota F6# emitida por el piano con aumento paulatino de volumen son 10.00B 4/6, 10.00B 5/6, 10.00B 6/6, 10.00B 7/6 y 10.00B 8/6.

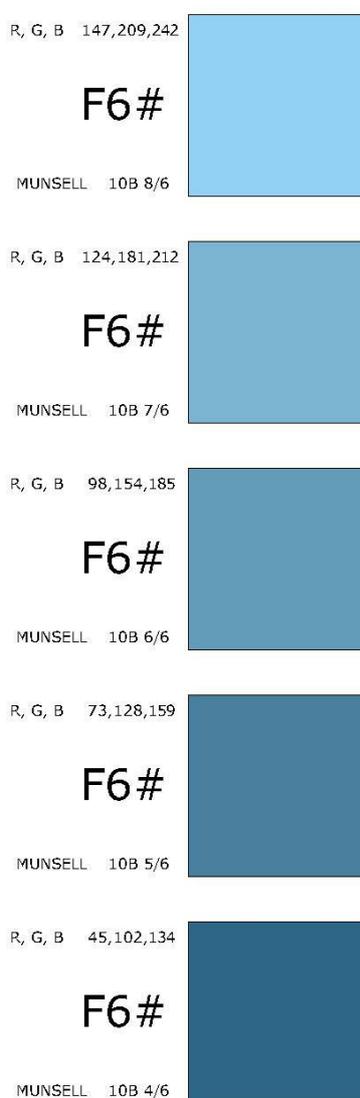


Figura 93. Colores 10.00B 4/6, 5/6, 6/6, 7/6 y 8/6.

6 EVALUACIÓN PERCEPTIVA ENTRE ESTÍMULOS VISUALES Y AUDITIVOS

El objetivo de esta sección es la validación psicofísica de la metodología teórica y práctica anteriormente propuesta para la generación de estímulos cromáticos armónicos que provoquen respuestas auditivas correlacionadas con cierto grado de armonía musical en base a las hipótesis propuestas de correlación/similitud entre *hue* y nota musical (altura de sonido), entre *chroma* y timbre y entre *value* y volumen. Para ello se ha diseñado un cuestionario con varias secciones que se han realizado a una muestra poblacional de personas con visión cromática normal y con diversidad de conocimientos musicales y de percepción visual.

6.1 Consideraciones previas

En todos los géneros musicales existen elementos distintos de la propia música (escenas visuales, título y letra de la canción, libreto de la ópera, etc.) que realzan la música en sí misma; la inteligencia establece una correspondencia concreta y dirigida entre el sonido y su significado, y el resultado es la comprensión por parte del oyente-espectador de los efectos musicales que difícilmente podría comprender sin todo ello [29]. Para que estos elementos no afecten ni dirijan la percepción y significado del propio sonido musical, los fragmentos de melodías utilizados son partes de temas instrumentales.

6.2 Diseño del test

Los grupos de series o sucesiones de notas musicales concordadas con los tonos de color y utilizadas en las cuestiones del test son los propuestos en los capítulos anteriores (3, 4 y 5).

El observador de este cuestionario debe escuchar los sonidos observando los colores y marcando la mejor conjugación color-sonido de entre las opciones propuestas. Puede tomarse el tiempo necesario para escuchar y observar antes de decidirse y marcar su respuesta.

6.2.1 Cuestión 1 (identificación de anomalías visuales)

Las condiciones y el procedimiento normalizado para realizar la observación deben efectuarse de acuerdo con la Norma UNE 48260, de la que se extraen las siguientes indicaciones: *"El sujeto observador debe poseer una visión normal del color. Para comprobar que el observador tiene una visión normal del color y detectar cualquier defecto personal en su visión del color, puede recurrirse a cualquier método o dispositivo adecuado para detectar defectos de visión del color, como por ejemplo el anomaloscopio, o bien, como ensayo previo y rápido, a los denominados Test de Ishihara, que permiten identificar las desviaciones más acusadas"*. [30]

Para los fines del presente test se ha considerado necesaria la realización de una cuestión basada en la detección de las anomalías de visión del color más frecuentes como son las dicromatopsias. Se han seleccionado tres imágenes de láminas pseudoisocromáticas para poder distinguir a sujetos protanopes (deficiencia de conos L), deuteranopes (deficiencia de conos M) y tritanopes (deficiencia de conos S). Se trata de detectar alguna deficiencia de visión en todo el espectro de color. Las imágenes utilizadas pertenecen a dibujos de test pertenecientes al método Stilling-Hertel [28].



Figura 94. Imagen del test para la cuestión 1.

El observador deberá indicar aquello que ve en cada una de las imágenes [28]:

- En la primera imagen deben leerse las letras *CH*. Un sujeto protanope verá el número *31* o una combinación de caracteres.
- En la segunda imagen debe leerse la cifra *3*. Un sujeto deuteranope verá la cifra *8*.
- En la tercera imagen debe leerse el número *49*. Un sujeto tritanope no verá ninguna cifra. El que no lo distingue tiene una alteración visual en la zona espectral azul-violeta. Aunque él pueda distinguir los colores rojo-naranja y verde, no puede separar estos dos del azul-violeta.

6.2.2 Cuestiones relativas a la concordancia entre *HUE* Munsell y *NOTA* musical.

Para las cuestiones relativas a la concordancia entre el *Hue* Munsell y nota musical se han tomado las propuestas de relación expuestas en el capítulo 2.

Se han construido series de colores sucesivos en direcciones desde el tono ROJO al AZUL y desde el tono AZUL al ROJO. Las series de colores se han relacionado con series de sucesiones de notas musicales.

Con esta serie de cuestiones se busca relacionar el sonido de una sucesión de notas musicales con una secuencia de tonos de colores representados:

6.2.2.1 Cuestión 2 (colores cálidos y fríos)

Se relacionan las gamas de colores "térmicos" (colores cálidos y colores fríos), cuya correlación psicofísica está inversamente relacionada con la temperatura correlacionada de color (T_c) de colores luz [31], con los tonos graves y agudos.



Figura 95 Gamas de colores cálidos (izquierda) y fríos (derecha).

Se han creado unos pasajes musicales basados en los dos primeros compases de la 9ª Sinfonía de Beethoven dependientes del instrumento que los interpreta.

Teniendo en cuenta la relación tono de color con nota musical y la tesitura de cada instrumento musical se ha creado una melodía para el contrabajo y otra para el violín. Así, los pasajes melódicos utilizados (primeros compases de la 9ª Sinfonía de Beethoven) están escritos dependientes del instrumento que la interpreta (Anexo O).

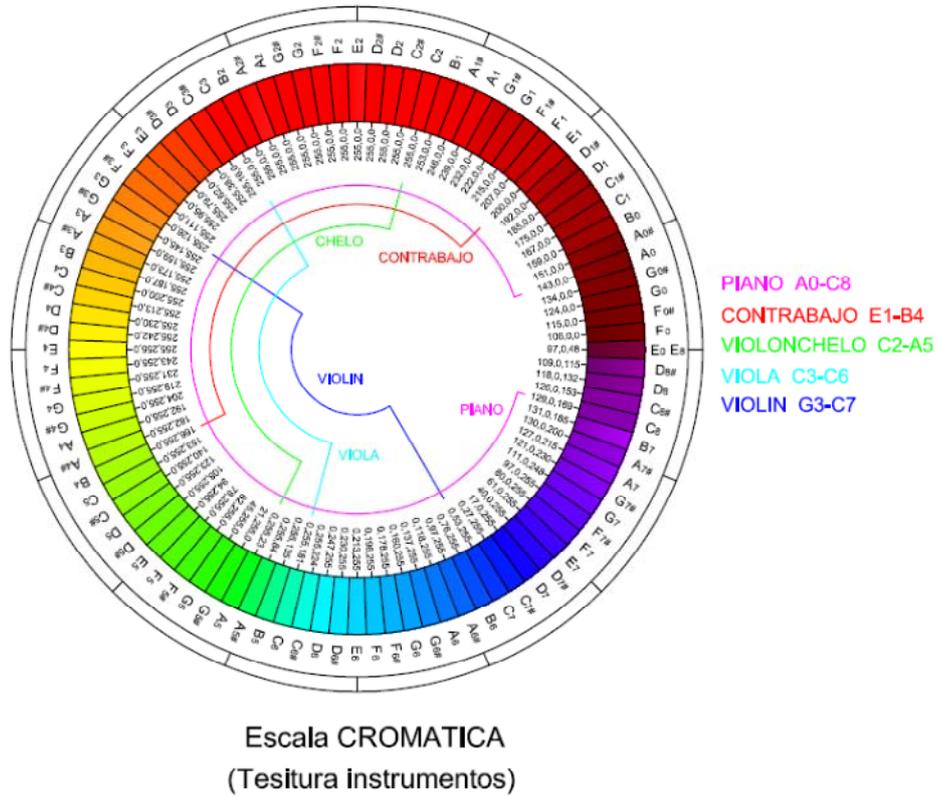


Figura 96 . Situación de instrumentos musicales dentro del círculo cromático tonal-musical.

Las melodías son interpretadas por instrumentos de la misma familia (cuerda en este caso). La melodía interpretada por el contrabajo se encuentra en el rango de las notas Bb2 a F3 (figura 97), por lo que se relaciona con los tonos rojos (figura 98).

9ª Sinfonía en SibM

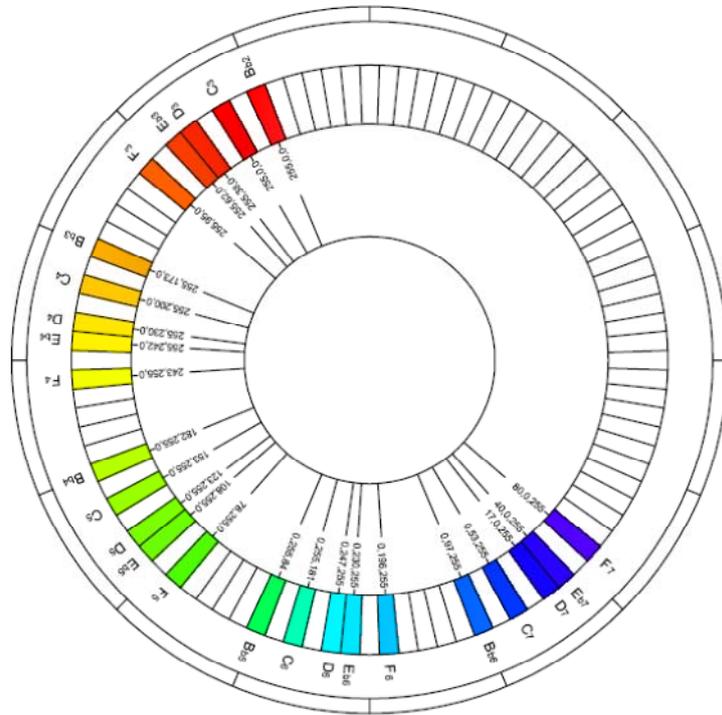
Composición para 5 tonalidades RGB

Beethoven



Figura 97. Compases interpretados por el contrabajo.

Del mismo modo, la melodía interpretada por el violín se encuentra en el rango de las notas Bb5 a F6 y se relaciona con los tonos cian (figura 98).



9ª sinfonía en BbM (Beethoven)

Figura 98. Franjas de melodías.

Cuestión: 2 Relacionar sonido musical con imagen



Sonido 1

Imagen A



Sonido 2

Imagen B




Figura 99. Imagen del test para la cuestión 2.

El observador deberá relacionar cada melodía con una imagen.

6.2.2.2 Cuestión 3 (salida y puesta de sol)

Se comparan la salida y puesta de sol y el medio día con los tonos graves y agudos.

Tal como expone Ptolomeo en el capítulo 10 de su libro Armónicas [22]: *“Las regiones del orto y el ocaso las asimilamos a los sonidos más graves y las que se hallan en el meridiano (Medio Cielo) a los agudos. Pues el brillo en el orto y en el ocaso comprende el comienzo y el final de las apariciones, aquél como partiendo de lo no surgido aún o no visible todavía, éste en cambio como a punto de desaparecer definitivamente”.*

Ptolomeo sigue exponiendo: *“Además, puesto que los elementos con que se forman los sonidos más graves están abajo, y los que se forman los más agudos arriba (por eso decimos que las tensiones graves salen del pecho y las agudas de la cabeza), y los más bajos son el orto y el ocaso, mientras que los más altos son los que se hallan en el Medio Cielo, se pueden estos últimos correctamente comparar con los sonidos agudos y aquellos con los graves. De este modo, el movimiento que va del orto al mediodía, en los astros, responde adecuadamente a la variación de sonido de las tensiones más graves a las más agudas, y al contrario, los que hay desde el Medio Cielo hasta el ocaso, aquellas que van de los agudos a los graves”.*

Se han creado dos pasajes musicales basados en los dos primeros compases de la 9ª Sinfonía de Beethoven. Las melodías, en tonalidades distintas, son interpretadas por el órgano.



Figura 100. Imagen del test para la cuestión 3.

El observador deberá relacionar cada sonido con una imagen.

6.2.2.3 Cuestión 4 (el violonchelo interpreta el acorde mayor de E3)

En esta cuestión se relaciona la sucesión de notas del **acorde mayor** de E3, interpretado por el violonchelo, con dos secuencias de colores. La sucesión de notas musicales utilizadas (de dirección grave-agudo) se ha relacionado con dos secuencias de colores de dirección rojo-azul y su opuesta.

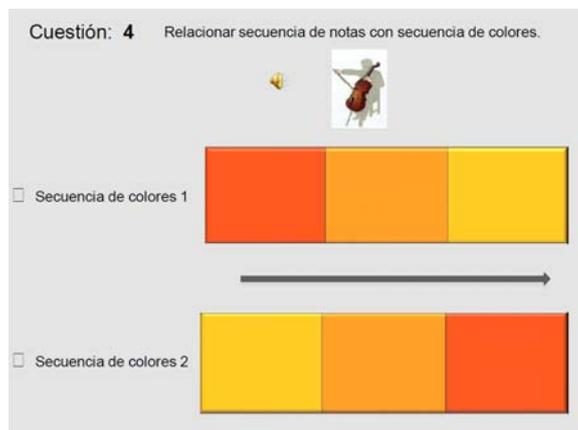


Figura 101. Imagen del test para la cuestión 4.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.2.4 Cuestión 5 (el piano interpreta el acorde mayor de G3)

En cuestión 5 se utiliza la sucesión de notas (G3-B3-D4) del **acorde mayor** de G3. En esta cuestión es el piano quien interpreta la sucesión de notas.

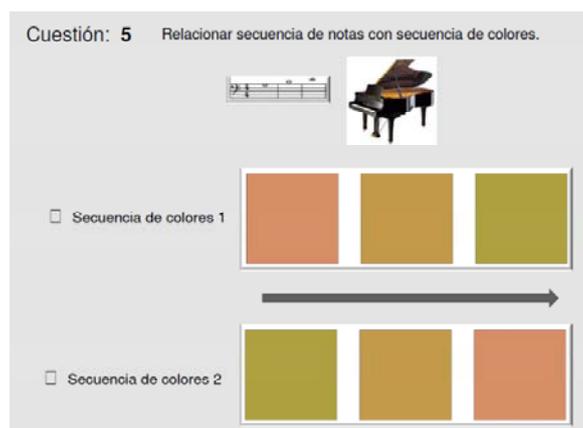


Figura 102. Imagen del test para la cuestión 5.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.2.5 Cuestión 6 (el piano interpreta el acorde mayor de D4)

En cuestión 6 se utiliza la sucesión de notas (D4-F4#-A4) del **acorde mayor** de D4. En esta cuestión es el piano quien interpreta la sucesión de notas.

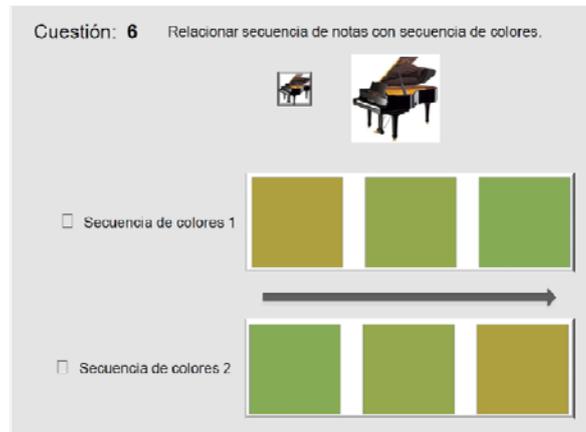


Figura 103. Imagen del test para la cuestión 6.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.2.6 Cuestión 7 (el piano interpreta el intervalo de quintas A4-E5-B5)

En la cuestión 7, la sucesión de notas musicales son **intervalos de quintas**. En esta cuestión se utiliza la sucesión de notas A4-E5-B5. Se ha cambiado el intervalo entre notas musicales para evitar monotonía en las secuencias.

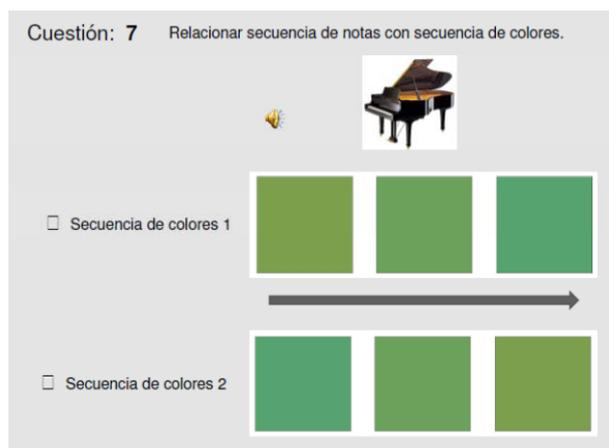


Figura 104. Imagen del test para la cuestión 7.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.2.7 Cuestión 8 (el piano interpreta el acorde mayor de B5)

En la cuestión 8 se vuelve a la sucesión de notas del **acorde mayor**. En este caso se utiliza la sucesión de notas (B5-D6#-F6#) del acorde mayor de B5.

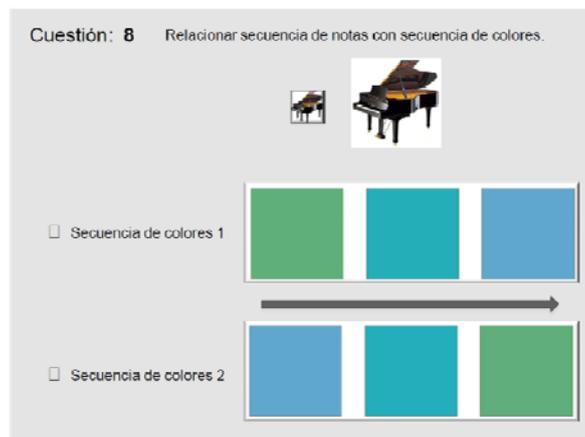


Figura 105. Imagen del test para la cuestión 8.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.2.8 Cuestión 9 (el piano interpreta la secuencia de octavas C3-C4-C5-C6-C7-C8)

En la cuestión 9, la sucesión de notas musicales son **intervalos de octavas**. En esta cuestión se amplían los intervalos de notas y colores abriendo el abanico a toda una representación de colores. La secuencia de notas utilizada es C3-C4-C5-C6-C7-C8. En esta cuestión la dirección de graves-agudos frente a rojos-azules o azules-rojos se muestra más evidente.

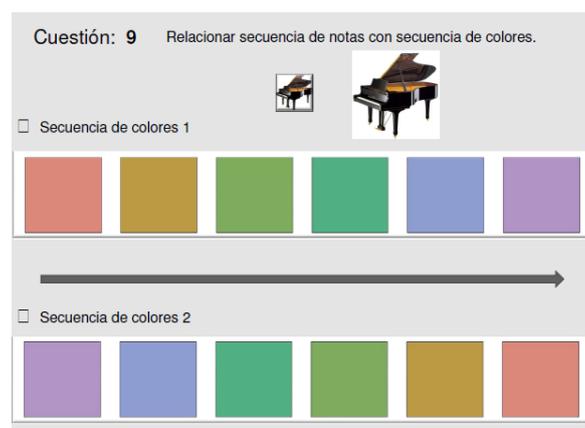


Figura 106. Imagen del test para la cuestión 9.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.2.9 Cuestión 10 (El órgano interpreta el intervalo de quintas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7)

En la cuestión 10, la sucesión de notas musicales son **intervalos de quintas**. En esta cuestión se vuelven a permutar los intervalos de notas musicales y se amplía así mismo el abanico de representación de colores. Se cambia el instrumento intérprete y, con él, la saturación de los colores.

El órgano interpreta las notas C3-G3-D4-A4-E5-B5-F6#-C7#.

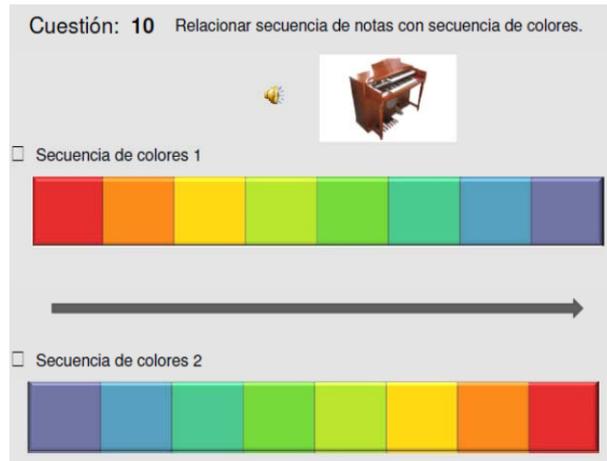


Figura 107. Imagen del test para la cuestión 10.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.2.10 Cuestión 11 (el órgano interpreta las notas E3-E5-E7)

En la cuestión 11, la sucesión de notas musicales son **intervalos de dobles octavas**. En esta cuestión se vuelven a permutar los intervalos de notas musicales reduciendo, esta vez, el abanico de representación de colores.

Siendo que esta secuencia es la de mayor intervalo entre notas se ha colocado en el último lugar de las cuestiones que relacionan nota musical con *hue* de color.

El órgano interpreta las notas E3-E5-E7.

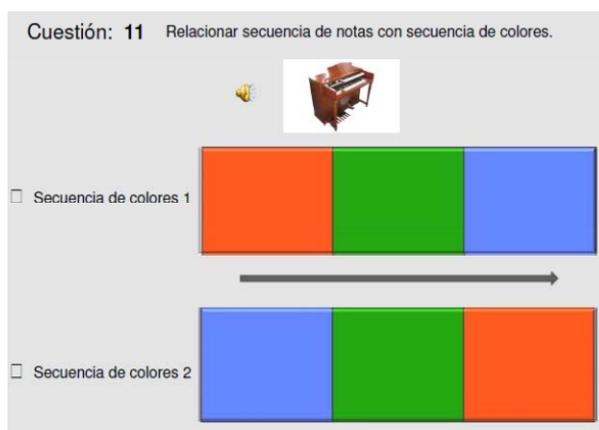


Figura 108. Imagen del test para la cuestión 11.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.3 Cuestiones relativas a la concordancia entre VALUE Munsell y VOLUMEN de nota musical.

Para las cuestiones relativas a la concordancia entre el *value* Munsell y volumen de nota musical se han tomado las propuestas de relación expuestas en el capítulo 5.

Se han construido series de colores con disminución de *value* y se han relacionado con series de la misma nota musical y con variación de volumen.

Con esta serie de cuestiones se busca relacionar una sucesión de un mismo color con variación de *value* respecto a una secuencia de sonidos con variación de volumen.

6.2.3.1 Cuestión 12 (suena el tambor)

En esta cuestión se ha utilizado tres valores de la escala de grises. Teniendo en cuenta que el tono de color utilizado es acromático el sonido relativo al mismo debe ser emitido por un instrumento de percusión; el instrumento utilizado es un tambor.



Figura 109. Imagen del test para la cuestión 12.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.3.2 Cuestión 13 (suena la guitarra eléctrica)

En esta cuestión se utilizan tres *values* de la escala para un *hue* dado. Por ello la secuencia de sonidos debe ser emitida por un instrumento musical que no sea una percusión. O sea, esta vez se utilizará un instrumento capaz de emitir notas musicales. El color utilizado no es saturado, por lo que el instrumento elegido es una guitarra eléctrica con efecto de distorsión. La guitarra emite la nota C4.

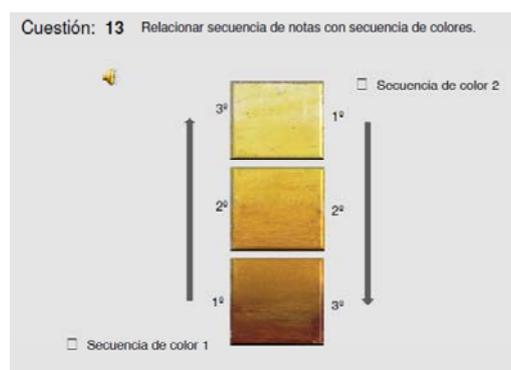


Figura 110. Imagen del test para la cuestión 13.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.3.3 Cuestión 14 (el piano emite la nota C3)

Esta cuestión compara la sucesión de colores propuesta en apartado 5.4

El piano emite la nota C3 con aumento o disminución paulatina de volumen. Los colores a concordar con la nota C3 emitida por el piano y con aumento paulatino de volumen son 8.00R 4/5, 8.00R 6/5 y 8.00R 8/5.

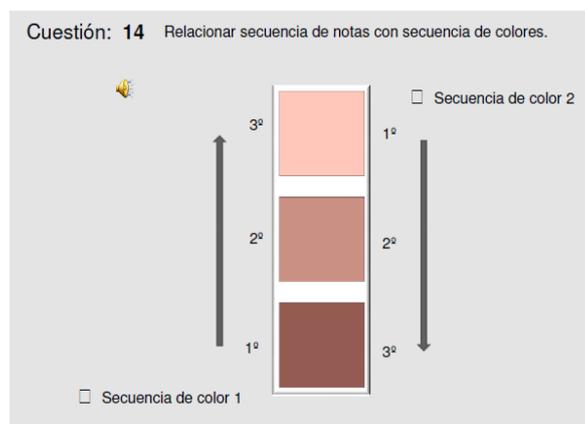


Figura 111. Imagen del test para la cuestión 14.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.3.4 Cuestión 15 (el piano emite la nota F6#)

Esta cuestión compara la sucesión de colores propuesta en apartado 5.5

En esta cuestión se reducen los intervalos de amplitud o volumen de sonido y como consecuencia se amplía el número de muestras de notas y colores. El piano emite la nota F6#. Los colores a concordar con la nota F6# emitida por el piano y con aumento paulatino de volumen son 10.00B 4/6, 10.00B 5/6, 10.00B 6/6, 10.00B 7/6 y 10B 8/6.

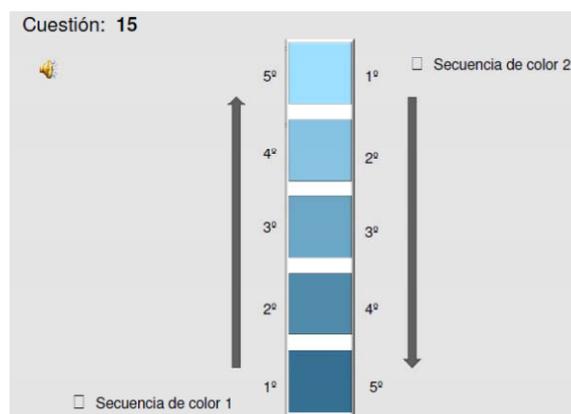


Figura 112. Imagen del test para la cuestión 15.

El observador deberá indicar aquella secuencia de colores que mejor relacione con la sucesión de notas musicales.

6.2.4 Cuestiones relativas a la concordancia entre CHROMA Munsell y TIMBRE de un instrumento musical.

Para las cuestiones relativas a la concordancia entre la *chroma* Munsell y timbre de instrumento musical nota musical se han tomado las propuestas de relación expuestas en el capítulo 4.

Se han construido series de colores con disminución de saturación y se han relacionado con dos series de notas musicales emitidas por distintos instrumentos.

Con esta serie de cuestiones se busca relacionar una secuencia de colores con una secuencia de instrumentos.

6.2.4.1 Cuestión 16 (la trompeta, el violonchelo y el órgano emiten la nota E3)

En esta cuestión se emiten dos series de tres sonidos con la misma nota musical (E3) emitida por tres instrumentos distintos. Cada serie tiene una ordenación distinta de los sonidos.

Las notas musicales son emitidas por instrumentos tan dispares como la trompeta, el violonchelo y el órgano.

Los colores utilizados tienen el mismo *hue* y *value*, variando solo el *chroma* Munsell.

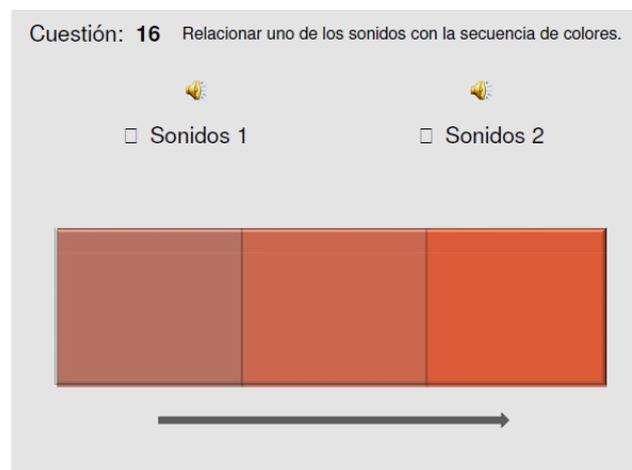


Figura 113. Imagen del test para la cuestión 16.

El observador deberá indicar aquella sucesión de sonidos que mejor relacione con la secuencia de colores.

6.2.4.2 Cuestión 17 (la trompeta, el violonchelo y el órgano emiten la nota G3#)

En esta cuestión se emiten dos series de tres sonidos con la misma nota musical (G3#) emitida por tres instrumentos distintos. Cada serie tiene una ordenación distinta de los sonidos.

Las notas musicales son emitidas por instrumentos tan dispares como la trompeta, el violonchelo y el órgano.

Los colores utilizados tienen el mismo *hue* y *value*, variando solo el *chroma* Munsell.



Figura 114. Imagen del test para la cuestión 17.

El observador deberá indicar aquella sucesión de sonidos que mejor relacione con la secuencia de colores.

6.2.4.3 Cuestión 18 (el violonchelo y el fagot interpretan el intervalo de quintas A2-E3-B3)

En esta cuestión se emiten una sucesión de tres sonidos con **intervalos de quintas**. La sucesión de sonidos es A2-E3-B3.

El sonido 1 lo emite un violonchelo y el sonido 2 lo emite un fagot. Ambos instrumentos tienen tesituras similares pero diferentes timbres.

Se trata de relacionar cada sonido con cada color representado.

Los colores representados tienen el mismo *hue* y *value*, variando solo el *chroma* Munsell.



Figura 115. Imagen del test para la cuestión 18.

El observador deberá indicar el color que mejor relacione con cada secuencia de notas musicales.

6.2.4.4 Cuestión 19 (el piano y el violín interpretan el acorde mayor de B5)

En esta cuestión se emiten una sucesión de tres sonidos (B5-D6#-F6#) correspondientes al **acorde mayor** de B5.

El sonido 1 lo emite un piano de cola y el sonido 2 lo emite un violín. La secuencia de color A tiene menos *chroma* que la secuencia de color B.

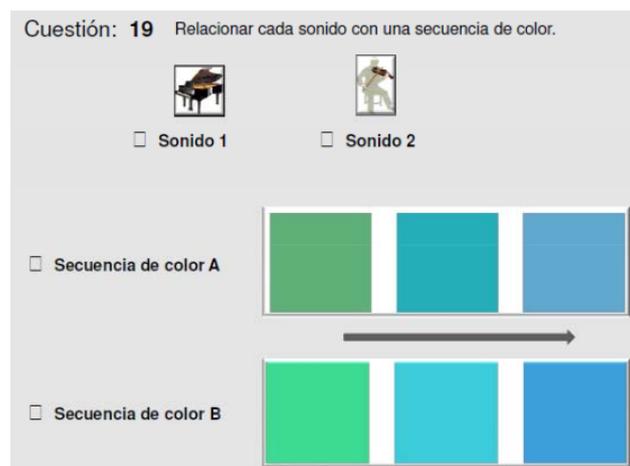


Figura 116. Imagen del test para la cuestión 19.

El observador deberá indicar cada secuencia de colores que mejor relacione con cada secuencia de notas musicales.

6.2.4.5 Cuestión 20 (El fagot, violonchelo y órgano interpretan el tema musical "Ilagosta")

En esta cuestión se emite un mismo tema musical cuya línea melódica es interpretada por tres instrumentos diferentes. (Ver partitura en Anexo N)

En el sonido 1 el instrumento que interpreta la melodía es un violonchelo, en el sonido 2 la interpreta un fagot y en el sonido 3 la interpreta un órgano.

Aún tratándose de una melodía (sucesión de notas) y no de una nota, se trata de una composición en una tonalidad determinada; y en cualquier tonalidad existe una nota dominante que es capaz de sonar en cualquier momento del pasaje musical sin provocar disonancia. Es por ello que es posible imaginar y relacionar la misma melodía, interpretada por cada instrumento determinado, con un mismo color dominante.

Cuestión: 20 Relacionar cada sonido con un color.

Sonido 1 Sonido 2 Sonido 3

Pau Casals
Desiré-Hippolyte Duhau
L'Orchestre de l'Opéra - Edgar Degas 1890
John Lord

Color dom. A Color dom. B Color dom. C

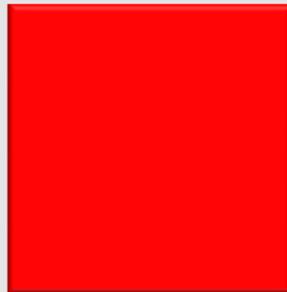
  

Figura 117. Imagen del test para la cuestión 20.

El observador deberá indicar cada melodía con aquel color que mejor relacione.

6.3 TEST (Toma de datos)

Como parte introductoria y posible clasificadora cada participante contestó a las preguntas siguientes:

- Nacionalidad:
- Sexo Hombre Mujer
- Edad:

En el campo musical me considero:

- COMPOSITOR (compongo temas musicales)
- INTERPRETE (interpreto temas musicales existentes)
- OYENTE (me deleito con la escucha)

En el campo de las artes plásticas me considero:

- CREADOR (hago mis propias obras)
- COPISTA (hago copias de obras existentes)
- OBSERVADOR (me deleito con la observación)

6.4 TEST (Puesta en marcha)

Para su participación vía internet, se realizó en programación HTML-PHP y en base de datos SQLITE. El test se encuentra ubicado en <http://clapton.alc.upv.es/jperez/>

Se invitó a participar a un gran número de personas, de las que se obtuvo una elevada participación.

Los participantes no han sabido el porqué de las cuestiones. En ningún momento se ha informado sobre los parámetros de color y música que se ponían en relación.

Para el análisis de resultados se utilizó el programa de cálculo Microsoft Office Excel.

6.4 TEST (Resultados)

Se obtuvieron un total de 93 encuestas cuyos resultados se adjuntan en anexos P, Q, R, S y T. Las contestaciones con la cifra 1 significan que las respuestas son coincidentes con la relaciones color-música propuestas, las contestaciones con la cifra 0 son traducidas como la no coincidencia con las relaciones color-música propuestas.

6.4.1 Resultados relativos a deficiencias visuales

Del total de participantes, 17 personas resultaron con alguna deficiencia visual, que representa un 7,9%. Valor coincidente con lo expresado por Küppers. [28]

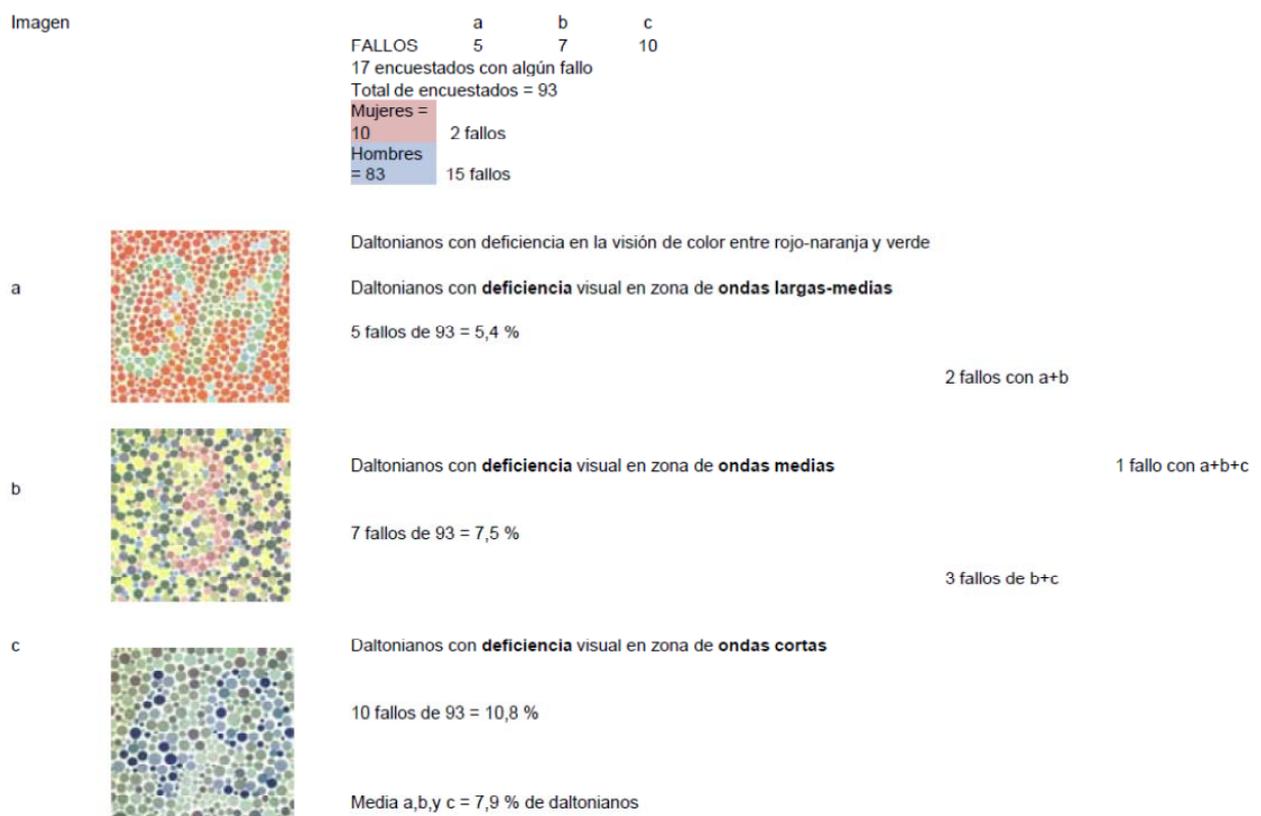


Figura 118. Esquema de resultados de la cuestión 1a, 1b y 1c.

En el análisis de las respuestas de cada cuestión se descartan aquellos observadores con deficiencia visual en el rango de longitudes de onda considerados.

6.4.2 Resultados relativos a la concordancia entre TONO de color y NOTA musical

De la cuestión 2, que relacionaba la gama de colores térmicos con las notas musicales, se obtuvo un 67% del total de encuestados sin deficiencia visual de color relativa que relacionaron el calor con notas graves y el frío con notas agudas.

De la cuestión 3, que relacionaba la analogía de las fases diurnas del sol con las notas musicales graves y agudas, el 68% de individuos sin deficiencia visual de color relacionaron el tono rojizo del amanecer o atardecer con notas graves y el tono azulado del mediodía con notas agudas.

Del grupo de cuestiones entre *hue* y nota musical, el 63% de encuestados sin deficiencia visual de color relacionaron la sucesión de notas del acorde mayor E3-G3#-B3 con la sucesión de colores R-YR-Y, el 52% relacionaron la sucesión de notas de un acorde mayor D4-F4#-A4 con la sucesión de colores Y-GY-G, el 60% relacionaron la sucesión de notas de un acorde mayor B5-D6#-F6# con la sucesión de colores G-BG-B y el 64% de encuestados relacionaron la secuencia de notas de intervalos de octavas C3-C4-C5-C6-C7-C8 con la sucesión de colores de dirección rojo-azul (figura 119)



Figura 119. Colores 8R 6/7, 4Y 6/7, 7.5GY 6/7, 4.5G 6/7, 7PB 6/7 y 5P 6/7.

Por consiguiente, más de del 50% de los encuestados (válidos) confirmaron la hipótesis inicial.

6.4.3 Resultados relativos a la concordancia entre CLARIDAD de color y VOLUMEN de nota musical

Siendo que para estas cuestiones no hay un cambio de *hue* en los colores utilizados, se ha contado con la opinión del 100% de los participantes. El resultado obtenido es opuesto al esperado. Sólo un 22% en la cuestión 12, un 33% en la cuestión 13, un 22% en la cuestión 14 y un 40 % en la cuestión 15 contestaron positivamente a la concordancia entre el mayor *value* con el mayor volumen del sonido.

Del resultado obtenido se deduce que la mayoría de los encuestados asociaron la mayor intensidad de sonido con una mayor cantidad de color lo que deriva en una mayor sensación de peso; lo cual es más propio para los colores superficie que para los colores luz.

6.4.4. Resultados relativos a la concordancia entre CHROMA de color y TIMBRE de instrumento musical

Del grupo de cuestiones comparativas del *chroma* de color con el timbre musical, el 68% de los encuestados relacionaron el acorde mayor de A2 emitido por el fagot con el color rojo con un 10% de *chroma*, el emitido por el violonchelo con el color rojo con un 60% de *chroma* y el emitido por el órgano con el color rojo con un 100% de *chroma*, el 74% relacionaron la nota E3 de una trompeta con el color 9.5R 5/6, la de un violonchelo con el color 9.5R 5/9 y la de un órgano con el color 9.5R 5/12, el 66% relacionaron la nota G3# emitida por la trompeta, violonchelo y órgano con los colores 6YR 7/6, 6YR 7/9 y 6YR 7/12 respectivamente (figura 120) y el 86 % relacionaron la sucesión de notas del acorde mayor de B5 emitidas por el piano de cola con la sucesión de colores 2G 6/7, 0.5B 6/7, 10B 6/7 y las emitidas por un violín con una sucesión de colores con mayor valor de *chroma*.

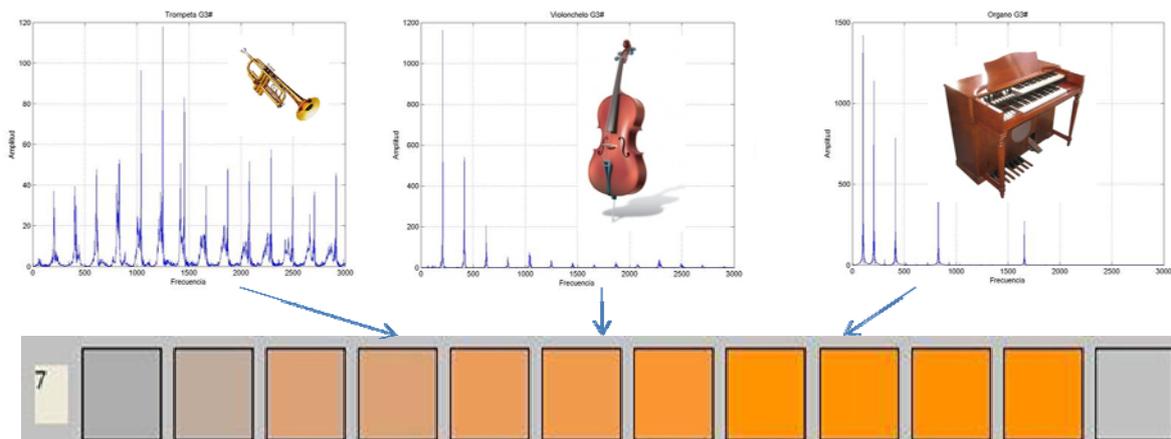


Figura 120. Concordancia entre instrumentos y colores. Armónicos de G3# emitidos por la trompeta, violonchelo y órgano. Colores 6YR 7/6, 6YR 7/9 y 6YR 7/12

Por consiguiente, más del 50% de los encuestados (válidos) confirmaron la hipótesis inicial.

7 CONCLUSIONES

Sobre el timbre de sonido de instrumentos musicales

1ª Se puede asignar un valor de importancia (v_i) a cada armónico generado por una nota musical en función de la menor o mayor desviación respecto a la nota normalizada dentro de la escala temperada.

2ª Se crea el concepto de "envolvente ideal armónica" definida como la curva patrón compuesta por los armónicos 1º, 2º, 4º, 8º y 16º generados por una nota musical a los cuales se le asigna el valor de 5, 4, 3, 2 y 1 respectivamente y representa la pureza de timbre musical.

3ª Se establece el procedimiento de aplicación de la "envolvente ideal armónica", la cual se dibuja asíntota sobre la "envolvente de la sensación de sonoridad". El mayor o menor acercamiento entre las diferentes envolventes refleja la mayor o menor pureza de nota musical.

4ª Es posible establecer un orden de pureza en el sonido entre instrumentos musicales en base a la aplicación de la "envolvente ideal armónica".

5ª Se establece el concepto de "sonoridad valorada", para una nota musical, en función de la sensación de sonoridad de cada armónico y del valor de importancia del armónico considerado.

$$\text{Sonoridad valorada} = \sum S_i \cdot v_i$$

6ª Se establece el concepto de "sonoridad valorada ideal" función del valor de la sensación sonoridad del 1er armónico en la "envolvente ideal armónica".

$$\text{Sonoridad valorada ideal, } S' = 10,8 \cdot S'_1$$

7ª Se establece el concepto de "grado de pureza" como la relación entre la "sonoridad valorada" y la "sonoridad valorada ideal".

8ª Es posible establecer un valor objetivo en la pureza del sonido musical aplicando el concepto de "grado de pureza" obteniéndose la siguiente escala:

- 1º Violonchelo con un 59 % de pureza,
- 2º Piano con un 58% de pureza,
- 3º Corno con un 8% de pureza y
- 4º Fagot con un 6% de pureza.

Sobre la concordancia entre color y música

9^a El encuentro entre color y sonido musical se ha llevado a cabo desde un contexto armónico natural teniendo en cuenta el uso de colores percibidos y el uso de sonidos emitidos por instrumentos musicales tradicionales.

10^a En la relación de un determinado color con un instrumento musical se debe tener en cuenta que el *hue* tiene correspondencia con alguna nota musical dentro de la tesitura del instrumento.

11^a En la relación de un determinado color con un instrumento musical se debe tener en cuenta que el *chroma* debe ser proporcional al grado de pureza de sonido del propio instrumento.

12^a En las relaciones entre series de colores y notas musicales se deben considerar las combinaciones armónicas de colores y los intervalos armónicos de los sonidos.

13^a Las combinaciones armónicas de color se han construido manteniendo constantes el *value* y el *chroma* en sistema Munsell. Las combinaciones armónicas consistentes se han construido manteniendo constante solamente el *chroma*.

14^a Se ha relacionado una melodía con un solo color percibido mediante la tonalidad y color dominante.

15^a A una misma melodía interpretada por distintos instrumentos musicales le corresponde un color percibido con el mismo *hue* y distinto *chroma*.

16^a En la concordancia armónica entre color y música, el *hue* marca la tonalidad, el *chroma* determina la calidad y el *value* indica la intensidad sonora.

17^a En la relación entre color e instrumento musical, el *hue* marca la tesitura, el *chroma* determina la familia a la que pertenece y el *value* indica la fuerza con la que se ejecuta.

Sobre el test

18^a En todas las cuestiones que relacionaban el *hue* con notas musicales, más del 50% de encuestados sin deficiencia visual de color asociaron los tonos de color con longitudes de onda larga, media y corta con las notas musicales de longitudes de onda larga, media y corta respectivamente.

19^a En todas las cuestiones que relacionaban el *chroma* con el timbre, más del 60% de encuestados sin deficiencia visual de color asociaron las notas musicales más puras con los colores más cromáticos.

20^a En todas las cuestiones que relacionaban el *value* con el volumen, menos del 40% de encuestados asociaron un aumento de *value* con un aumento de volumen.

21^a Existe un encuentro armónico de sensaciones entre estímulos visuales y auditivos de longitudes de onda proporcionales y con la misma dirección. Y, aun cuando un tono de color pueda vibrar en armonía con una misma nota musical emitida por diversos instrumentos musicales, la sensación de bienestar, en el receptor de ambos estímulos, estará más presente en cuanto exista una mayor concordancia del croma del color con la pureza del timbre del sonido musical. Así mismo, la mayor o menor intensidad de ese sonido se percibirá mejor concordada junto con una menor o mayor claridad del color.

8 PERSPECTIVAS

1ª Tras el análisis de espectros de armónicos se ha observado tanto una constancia como una variación de los formantes en la sensación de sonoridad a lo largo de la tesitura de un instrumento musical. Este hecho podría ser utilizado para medir la calidad sonora del mismo, ya que la premisa de que un comportamiento variable en los formantes de armónicos a lo largo de la tesitura de un instrumento musical indica una merma en la calidad sonora del instrumento.

Con esta línea de trabajo se podrían encontrar la forma y método para valorar la calidad de sonido a lo largo de la tesitura de un instrumento musical.

2ª En este trabajo sobre el color y la música se han generado notas y colores mediante la ayuda de programas informáticos. Para un estudio más cualitativo y cuantitativo de las correlaciones propuestas es necesario el registro directo de instrumentos musicales y la utilización de fichas de colores en situaciones y condiciones adecuadas.

3ª En el test de concordancia entre *value* e intensidad de sonido no se ha obtenido el resultado esperado. Por ello se precisa un rediseño de test dinámico con la utilización de diversos parámetros de forma y tamaño en áreas de colores, de secuencias de aparición y de variación de fondos.

4ª Sería posible la confección de un sistema de clasificación y ordenamiento espacial de instrumentos musicales en base a su pureza de timbre y dentro de un sistema de ordenación de color existente. Sistema de ordenamiento para el uso de las correlaciones entre color e instrumento musical y aplicación en cualquier trabajo audiovisual.

Como aplicación de las propuestas de este trabajo, se está construyendo un instrumento musical con sistema transductor, para la puesta en "escena" de la música y color conjuntados. El instrumento emisor es una guitarra eléctrica, el sistema transductor es un programador aplicado a la conversión de las señales y el receptor es el propio cuerpo del instrumento.

Se está trabajando en el análisis de audiovisuales existente para la recomposición de melodías, colores o instrumentos musicales en base a las correlaciones propuestas de este trabajo.

REFERENCIAS

1. PEACOCK, Kenneth. *Instruments to Perform Color-Music: Two Centuries of Technological Experimentation*. Leonardo, vol. 21, nº 4, 1988, pp. 397-406.
2. RIMINGTON, Alexander Wallace. *A. Wallace Rimington's colour-music*. Editorial I ANY ED. [Doylestown] : Wildside:0809511908 : 2004
3. GRAVES, Maitland. *The art of color and design*. McGraw-Hill. 1941.
4. GARNER, W. *The relationship between colour and music*, Leonardo, nº 2, 1978, pp. 225-226.
5. WELLS, Alan. *Music and visual color: A proposed correlation*, Leonardo nº 13, 1980, pp. 101-107.
6. SEBBA, Rachel. *Structural correspondence between music and color*, 1991, Color Research and Application nº 16, pp. 81-88.
7. PRIDMORE, Ralph W. *Music and color: Relations in the psychophysical perspective*, Feb. 1992, Color Research and Application nº 17, pp. 57-61.
8. CAIVANO, José Luis. *Color y sonido: Correlación sobre bases físicas y psicofísicas*. ArgenColor 1992. Actas del primer congreso argentino del color. Buenos Aires 1994. pp. 27-40.
9. RANGEL MACEDO, André. *Visible and Audible Spectrums. A proposal of correspondence*. 2009, Universidade Católica Portuguesa.
10. WOODWORTH, Robert S., SCHLOSBERG, Harold. *Experimental psychology*. 1954, Nueva York: Holt, Rinehart and Winston.
11. CAIVANO, José Luis. *Sinestesia visual y auditiva: la relación entre color y sonido desde un enfoque semiótico*. 2003. De Signis, nº 4, pp. 175-186.
12. STEVENS, Stanley Smith, GUIRAO, Miguelina. *Subjective scaling of length and area and the matching of length to loudness and brightness*, 1963, Journal of Experimental Psychology, Nº 66, PP. 177-186.
13. M. D. Jorge Vanacloy, A. Giménez Pérez, A. Marín Sanchís, A. Sanchís Sabater, J. Romero Faus, S. Cerdá Jordá, *Sonido y percepción –La música y el color-correspondencias e interacciones*, XXXII Congreso Nacional de Acústica – Tecniacústica 2001, y Encuentro Ibérico de Acústica, Logroño.
14. HERBERT MASSMANN, Rodrigo Ferrer. *Instrumentos musicales. Artesanía y ciencia*, Dolmen Ediciones. p. 55.

15. *Temas de lenguaje musical. Fundamentos teóricos*, 1995. PILES, Editorial de Música, S.A. Valencia (España). ISBN 84-88548-76-1. p. 170.
16. ZANACOIS, V.J. *Tratado de Armonía, libro III*. 7ª edición. 1990. ISBN 84-335-7850-2. Ap. 620. pp. 498-499.
17. HERBERT MASSMANN, Rodrigo Ferrer. *Instrumentos musicales. Artesanía y ciencia*, Dolmen Ediciones. p. 69.
18. HERBERT MASSMANN, Rodrigo Ferrer. *Instrumentos musicales. Artesanía y ciencia*, Dolmen Ediciones. p. 78.
19. ZANACOIS, V.J. *Tratado de Armonía, libro III*. 7ª edición, 1990, p. 499. ISBN 84-335-7850-2. Ap. 621
20. MIYARA, F. *Introducción a la psicoacústica*. Reporte técnico.
21. ISO 266:2003 Acoustics – Preferred frequencies.
22. GOMÉZ PEÑA, Miguel. *Claudio Ptolomeo. Armónicas*, 1ª edición, Miguel Gómez Ediciones, ISBN: 84-88326-13-0.
23. PUJOL, J. *Sistemas de ordenación del color*. Fundamentos de colorimetría, Universitat de València, 2002, pp. 114-116. ISBN 84-370-5436-2
24. PÉREZ FUSTER, J. y GILABERT, Eduardo J. *Color y música: Relaciones físicas entre tonos de color y notas musicales*, Óptica Pura y Aplicada, nº 43 (4), 2010, pp. 267-274.
25. CAIVANO, José Luis. *Armonías del color*, GAC nº 19, Abr. 2004, ISSN 1515-7245.
26. CAIVANO, José Luis. *Sistemas de orden del color*. Serie Difusión 12. Secretaría de Investigaciones en Ciencia y Técnica. Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires. ISSN 0328-2252
27. PARRAMÓN, José M. *Teoría y práctica del color*, 1988, Parramón ediciones, S.A., ISBN 84-342-1021-5.
28. KÜPPERS, Harald, *Color*, 1ª edición, 1973, Editorial Lectura, Caracas.
29. ZANACOIS, V.J. *Tratado de Armonía, libro III*. 7ª edición, 1990, pp. 503-504. ISBN 84-335-7850-2. Ap. 625
30. UNE 48103:2002. Pinturas y barnices. Colores normalizados.

31. GILABERT, Eduardo J. *Medida de la luz y el color*, 2007, Universidad Politécnica de Valencia. ISBN 84-9705-174-2.
32. HERBERT MASSMANN, Rodrigo Ferrer. *Instrumentos musicales. Artesanía y ciencia*, Dolmen Ediciones. p. 21.
33. PUJOL, J. *Colorimetría aplicada en optometría y oftalmología*. Tecnología del color, Universitat de València, 2002, pp. 316-317, 420.

ANEXO A

Tesitura de instrumentos musicales

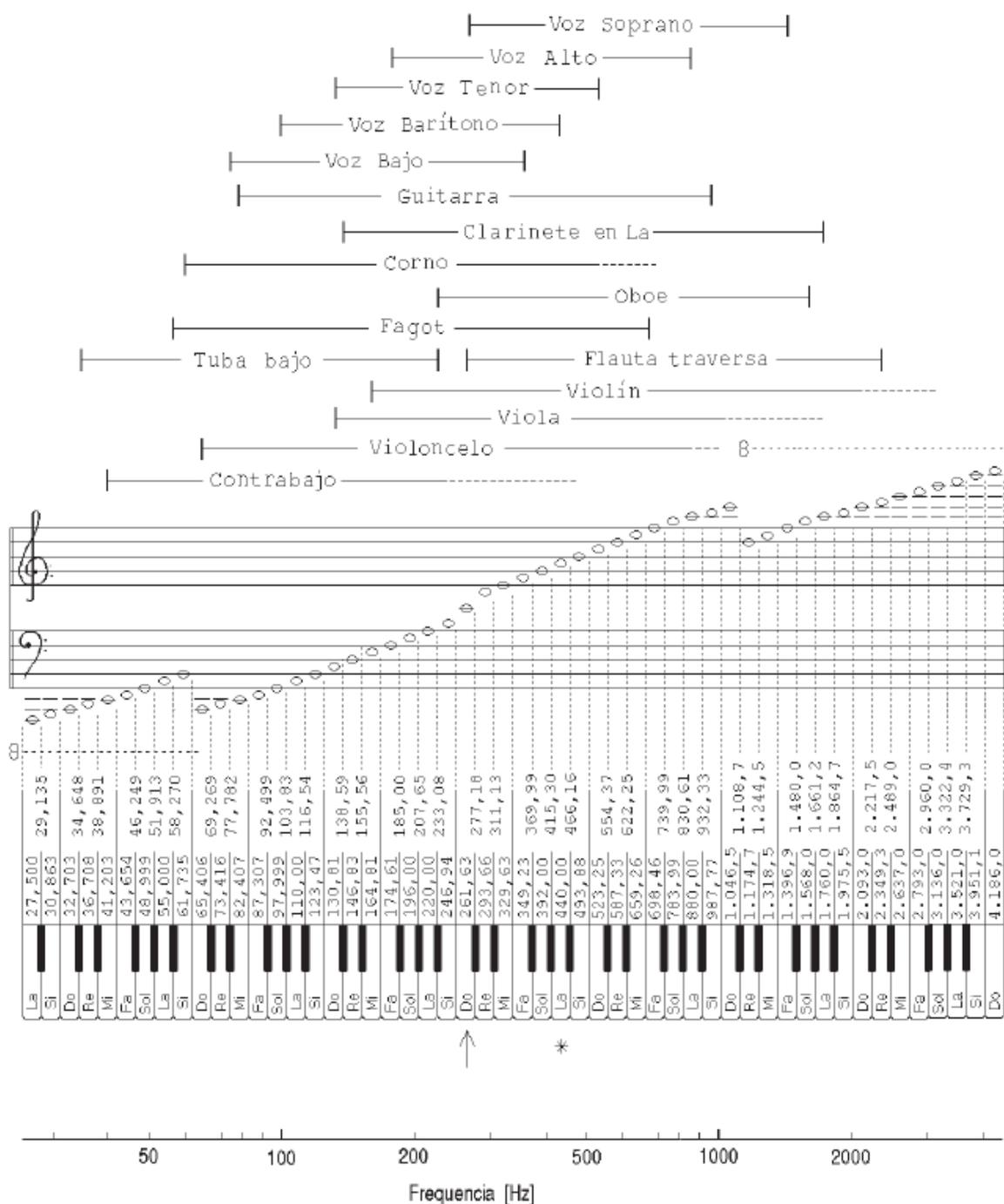
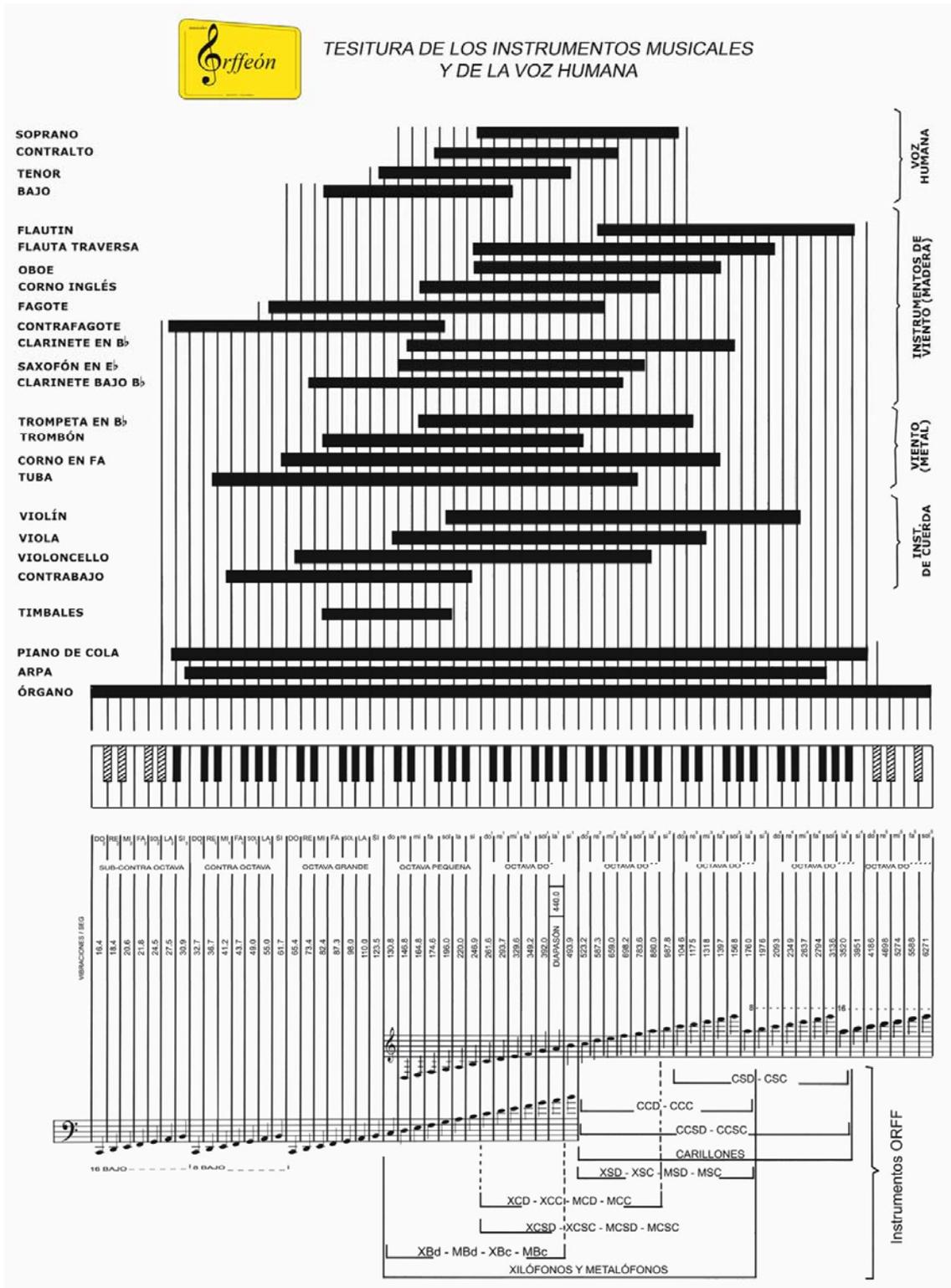


Figura A1. Rango de frecuencias de los sonidos producidos por las voces humanas y por varios instrumentos musicales. En el teclado del piano, el Do central se ha indicado con una flecha y la nota concertino con un asterisco. Las frecuencias de las distintas notas son las correspondientes a la afinación bien temperada. [29]



ANEXO B

Tablas de valores de frecuencias de notas musicales

La relación de valores de todas las notas musicales de la escala temperada dentro de la franja espectro musical audible se muestra en la tabla siguiente. [24]

Nota musical	Frecuencia f (Hz)	Longitud de onda λ_m (m)
E₀	20,601	16,504
F ₀	21,827	15,577
F ₀ #	23,124	14,703
G ₀	24,499	13,878
G ₀ #	25,956	13,099
A ₀	27,500	12,364
A₀#	29,135	11,670
B ₀	30,868	11,015
C ₁	32,703	10,397
C ₁ #	34,648	9,813
D ₁	36,708	9,262
D ₁ #	38,891	8,742
E₁	41,203	8,252
F ₁	43,654	7,789
F ₁ #	46,249	7,351
G ₁	48,999	6,939
G ₁ #	51,913	6,549
A ₁	55,000	6,182
A₁#	58,270	5,835
B ₁	61,735	5,507
C ₂	65,406	5,198
C ₂ #	69,296	4,907
D ₂	73,416	4,631
D ₂ #	77,782	4,371
E₂	82,407	4,126
F ₂	87,307	3,894
F ₂ #	92,499	3,676
G ₂	97,999	3,469
G ₂ #	103,826	3,275
A ₂	110,000	3,091
A₂#	116,541	2,917
B ₂	123,471	2,754
C ₃	130,813	2,599
C ₃ #	138,591	2,453
D ₃	146,832	2,316
D ₃ #	155,563	2,186

Tabla B1. Relación de valores de las notas musicales de la escala temperada. (1ª parte)

Nota musical	Frecuencia f (Hz)	Longitud de onda λ_m (m)
E3	164,814	2,063
F3	174,614	1,947
F3#	184,997	1,838
G3	195,998	1,735
G3#	207,652	1,637
A3	220,000	1,545
A3#	233,082	1,459
B3	246,942	1,377
C4	261,626	1,300
C4#	277,183	1,227
D4	293,665	1,158
D4#	311,127	1,093
E4	329,628	1,031
F4	349,228	0,974
F4#	369,994	0,919
G4	391,995	0,867
G4#	415,305	0,819
A4	440,000	0,773
A4#	466,164	0,729
B4	493,883	0,688
C5	523,251	0,650
C5#	554,365	0,613
D5	587,330	0,579
D5#	622,254	0,546
E5	659,255	0,516
F5	698,456	0,487
F5#	739,989	0,459
G5	783,991	0,434
G5#	830,609	0,409
A5	880,000	0,386
A5#	932,328	0,365
B5	987,767	0,344
C6	1046,502	0,325
C6#	1108,731	0,307
D6	1174,659	0,289
D6#	1244,508	0,273

Tabla B3. Relación de valores de las notas musicales de la escala temperada. (2ª parte)

Nota musical	Frecuencia f (Hz)	Longitud de onda λ_m (m)
E6	1318,510	0,258
F6	1396,913	0,243
F6#	1479,978	0,230
G6	1567,982	0,217
G6#	1661,219	0,205
A6	1760,000	0,193
A6#	1864,655	0,182
B6	1975,533	0,172
C7	2093,005	0,162
C7#	2217,461	0,153
D7	2349,318	0,145
D7#	2489,016	0,137
E7	2637,020	0,129
F7	2793,826	0,122
F7#	2959,955	0,115
G7	3135,963	0,108
G7#	3322,438	0,102
A7	3520,000	0,097
A7#	3729,310	0,091
B7	3951,066	0,086
C8	4186,009	0,081
C8#	4434,922	0,077
D8	4698,636	0,072
D8#	4978,032	0,068
E8	5274,041	0,064

Tabla B3. Relación de valores de las notas musicales de la escala temperada. (3ª parte)

ANEXO C

Valores de notas musicales y colores

Se considera una franja de sonidos audibles musicales en altura entre 20,601 y 5273,856 Hz correspondientes a la notas E0 y E8; la cual abarca todo el espectro musical audible.



Figura C1. Franja de sonidos musicales.

A partir del valor de la frecuencia de la nota musical de la escala temperada, dentro de la franja reproducible dentro de la audible, se obtiene la longitud de onda del color correspondiente [24]:

$$\lambda_c = 72,135 \cdot \ln(\lambda_m) + 577,76$$

Siendo: λ_c (en nm) el valor de la longitud de onda de color, y
 λ_m (en m) el valor de la longitud de onda de la nota musical.

La figura C2 muestra gráficamente la correspondencia obtenida entre las notas musicales y el espectro de color.

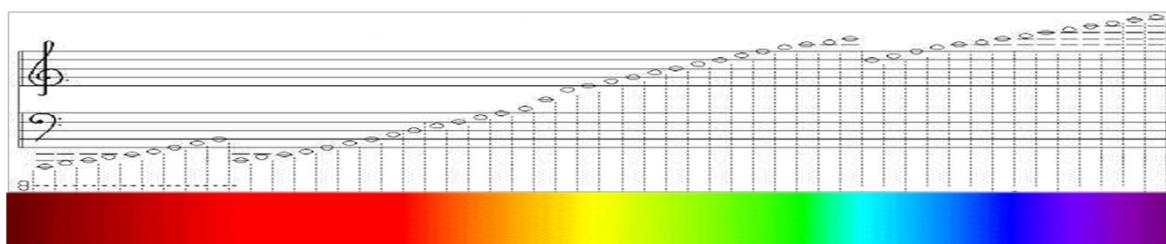


Figura C2. Correspondencia entre tono de color y nota musical.

La relación de valores de λ_c relativas a las notas musicales de la franja del espectro musical considerado (E0 - E8) con los tonos de color se muestra en la tabla A1.

Los valores digitales a 8 bits de R,G,B se han obtenido, en primera aproximación desde el mundo de gráficos por ordenador (computer graphics), a partir de los valores de λ_c mediante el programa informático Spectra.

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

SONIDO MUSICAL			COLOR	
Nota	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B
E₀	20,601	16,504	780	97,0,0
F ₀	21,827	15,577	776	106,0,0
F ₀ #	23,124	14,703	772	115,0,0
G ₀	24,499	13,878	768	124,0,0
G ₀ #	25,956	13,099	763	134,0,0
A ₀	27,500	12,364	759	143,0,0
A₀#	29,135	11,670	755	151,0,0
B ₀	30,868	11,015	751	159,0,0
C ₁	32,703	10,397	747	167,0,0
C ₁ #	34,648	9,813	743	175,0,0
D ₁	36,708	9,262	738	185,0,0
D ₁ #	38,891	8,742	734	192,0,0
E₁	41,203	8,252	730	200,0,0
F ₁	43,654	7,789	726	207,0,0
F ₁ #	46,249	7,351	722	215,0,0
G ₁	48,999	6,939	718	222,0,0
G ₁ #	51,913	6,549	713	232,0,0
A ₁	55,000	6,182	709	239,0,0
A₁#	58,270	5,835	705	246,0,0
B ₁	61,735	5,507	701	253,0,0
C ₂	65,406	5,198	697	255,0,0
C ₂ #	69,296	4,907	693	255,0,0
D ₂	73,416	4,631	688	255,0,0
D ₂ #	77,782	4,371	684	255,0,0
E₂	82,407	4,126	680	255,0,0
F ₂	87,307	3,894	676	255,0,0
F ₂ #	92,499	3,676	672	255,0,0
G ₂	97,999	3,469	668	255,0,0
G ₂ #	103,826	3,275	663	255,0,0
A ₂	110,000	3,091	659	255,0,0
A₂#	116,541	2,917	655	255,0,0
B ₂	123,471	2,754	651	255,0,0
C ₃	130,813	2,599	647	255,0,0
C ₃ #	138,591	2,453	643	255,16,0
D ₃	146,832	2,316	638	255,38,0
D ₃ #	155,563	2,186	634	255,62,0
E₃	164,814	2,063	630	255,79,0
F ₃	174,614	1,947	626	255,95,0
F ₃ #	184,997	1,838	622	255,111,0
G ₃	195,998	1,735	618	255,126,0
G ₃ #	207,652	1,637	613	255,145,0
A ₃	220,000	1,545	609	255,159,0
A₃#	233,082	1,459	605	255,173,0
B ₃	246,942	1,377	601	255,187,0
C ₄	261,626	1,300	597	255,200,0
C ₄ #	277,183	1,227	593	255,213,0
D ₄	293,665	1,158	588	255,230,0
D ₄ #	311,127	1,093	584	255,242,0

E4	329,628	1,031	580	255,255,0
F4	349,228	0,974	576	243,255,0
F4#	369,994	0,919	572	231,255,0
G4	391,995	0,867	568	219,255,0
G4#	415,305	0,819	563	204,255,0
A4	440,000	0,773	559	192,255,0
A4#	466,164	0,729	555	182,255,0
B4	493,883	0,688	551	166,255,0
C5	523,251	0,650	547	153,255,0
C5#	554,365	0,613	543	140,255,0
D5	587,330	0,579	538	123,255,0
D5#	622,254	0,546	534	108,255,0
E5	659,255	0,516	530	94,255,0
F5	698,456	0,487	526	78,255,0
F5#	739,989	0,459	522	62,255,0
G5	783,991	0,434	518	45,255,0
G5#	830,609	0,409	513	21,255,0
A5	880,000	0,386	509	0,255,23
A5#	932,328	0,365	505	0,255,84
B5	987,767	0,344	501	0,255,135
C6	1046,502	0,325	497	0,255,181
C6#	1108,731	0,307	493	0,255,224
D6	1174,659	0,289	488	0,247,255
D6#	1244,508	0,273	484	0,230,255
E6	1318,510	0,258	480	0,213,255
F6	1396,913	0,243	476	0,196,255
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255
G6	1567,982	0,217	468	0,160,255
G6#	1661,219	0,205	463	0,137,255
A6	1760,000	0,193	459	0,118,255
A6#	1864,655	0,182	455	0,97,255
B6	1975,533	0,172	451	0,76,255
C7	2093,005	0,162	447	0,53,255
C7#	2217,461	0,153	443	0,27,255
D7	2349,318	0,145	438	17,0,255
D7#	2489,016	0,137	434	40,0,255
E7	2637,020	0,129	430	61,0,255
F7	2793,826	0,122	426	80,0,255
F7#	2959,955	0,115	422	97,0,255
G7	3135,963	0,108	418	111,0,248
G7#	3322,438	0,102	413	121,0,230
A7	3520,000	0,097	409	127,0,215
A7#	3729,310	0,091	405	130,0,200
B7	3951,066	0,086	401	131,0,185
C8	4186,009	0,081	397	129,0,169
C8#	4434,922	0,077	393	126,0,153
D8	4698,636	0,072	388	118,0,132
D8#	4978,032	0,068	384	109,0,115
E8	5274,041	0,064	380	97,0,97

Tabla C1. Correspondencia de valores entre notas del sonido musical y tonos de color.

ANEXO D

Espectros de colores

Para el encuentro entre color y música a través de la comparativa de sus espectros se generaron todos los colores relacionados con las notas musicales de la escala temperada. Los colores utilizados fueron los obtenidos según la correspondencia derivada de la relación entre longitudes de onda: $\lambda_c = 72,135 \cdot \ln(\lambda_m) + 577,76$

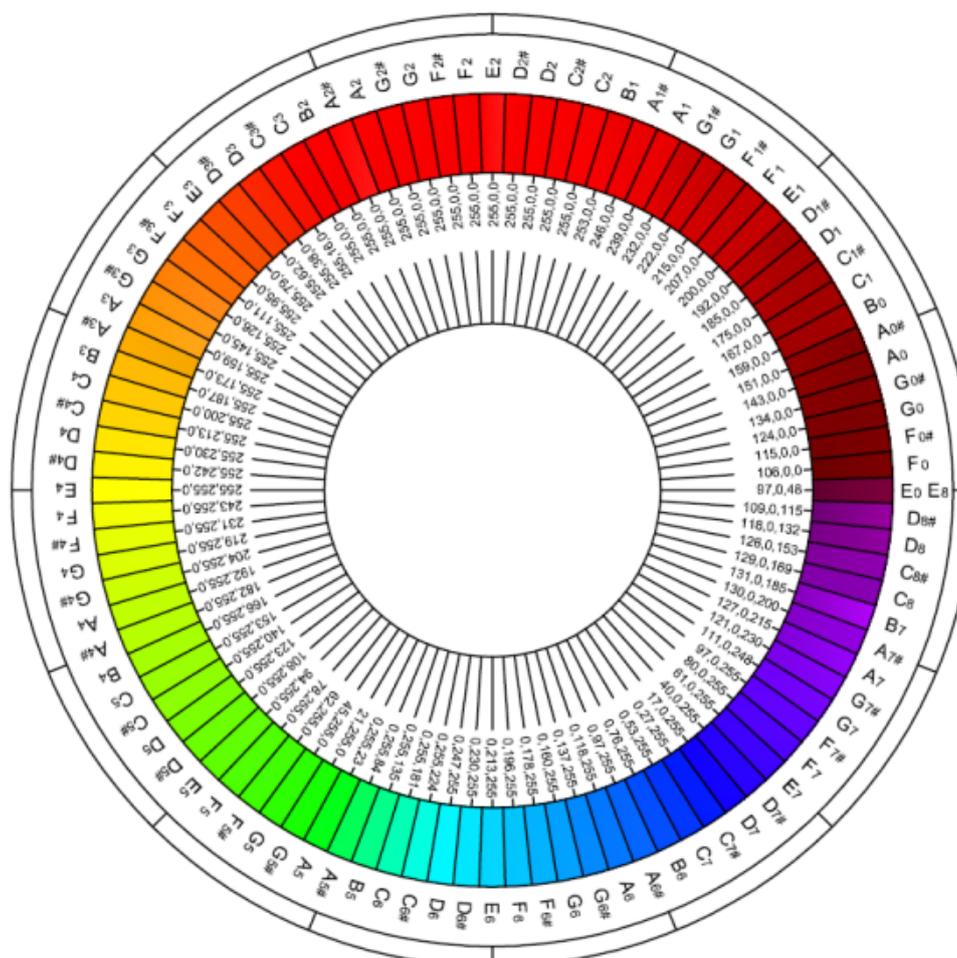


Figura D1. Círculo cromático tonal-musical. Valores R,G,B de notas musicales en sistema temperado.

Para el análisis de color mediante un espectrofotómetro, se generaron figuras circulares rellenas. La figuras se construyeron mediante el programa AutoCAD, se imprimieron (impresora a color HP 2600c) sobre papel y se obtuvieron los valores de reflectancia para cada longitud de onda desde 400 a 700 nm en intervalos de 10 nm. A partir de los valores de reflectancia se obtuvieron, mediante programa informático de hoja de cálculo, los espectros de los colores analizados

Escala de colores básicos y complementarios

La serie de colores utilizada fue la representada en la figura D2.

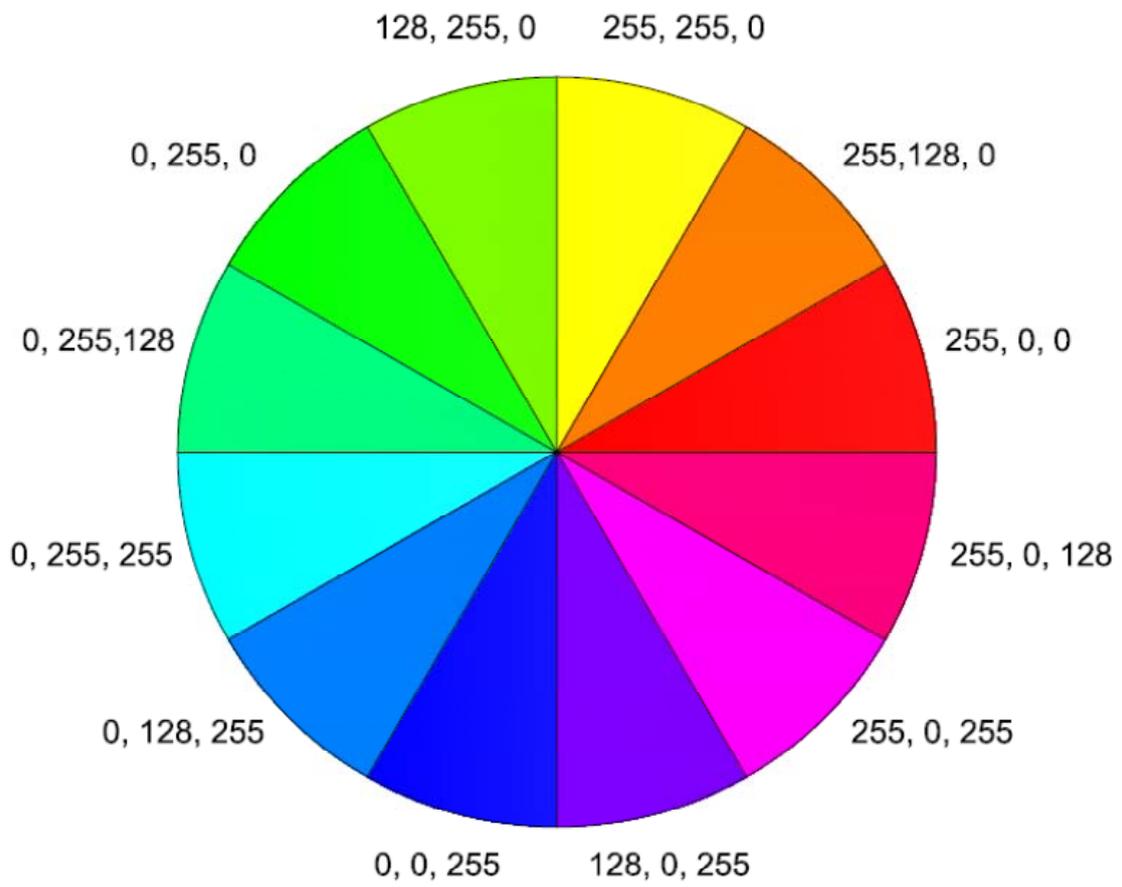


Figura D2. Círculo de colores básicos y sus complementarios.

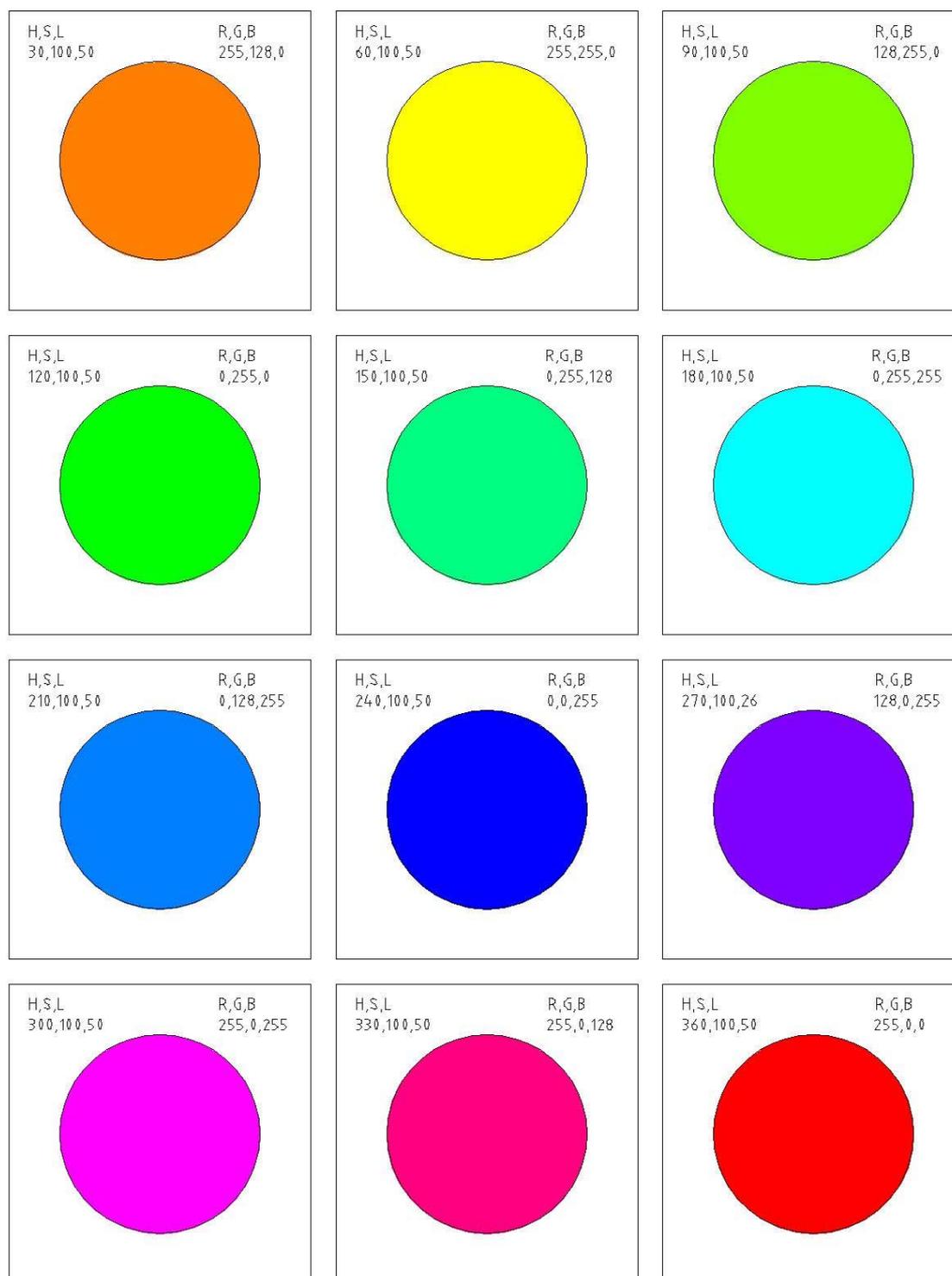


Figura D3. Hoja de colores básicos y sus complementarios. Formato de impresión utilizado para su posterior análisis espectral.

ESPECTROS COLORES

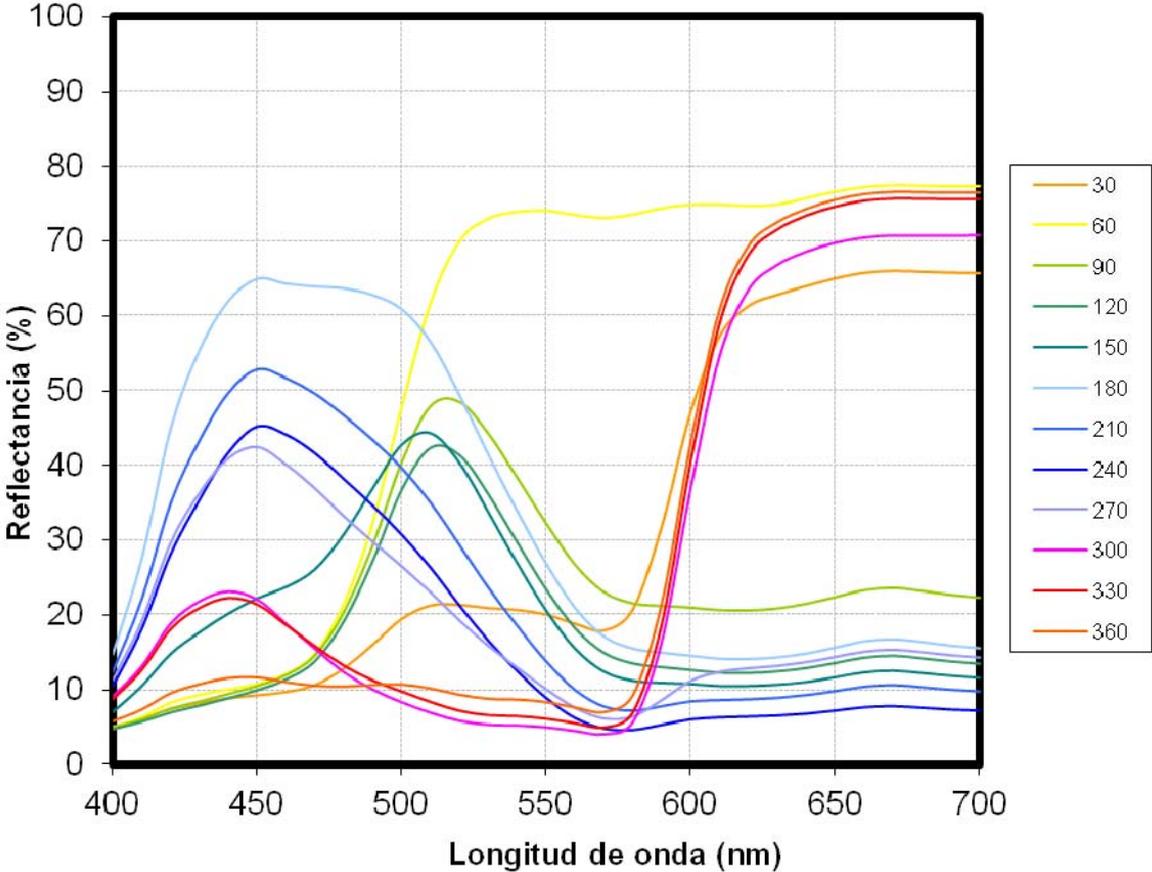


Figura D4 . Imagen de espectros de reflectancia de colores básicos.

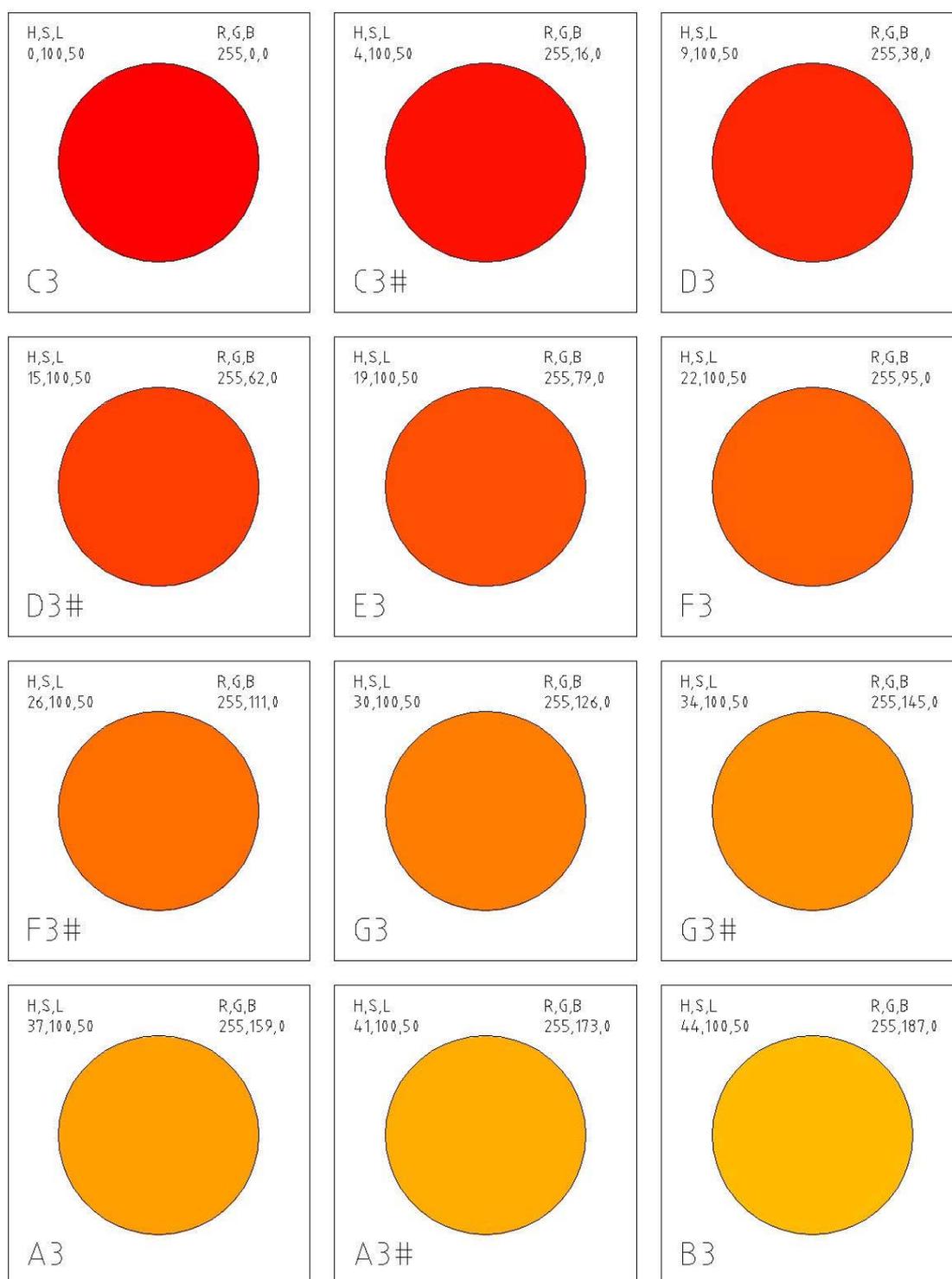


Figura D5. Hoja de colores correspondientes a la escala cromática (12 notas) de C3.

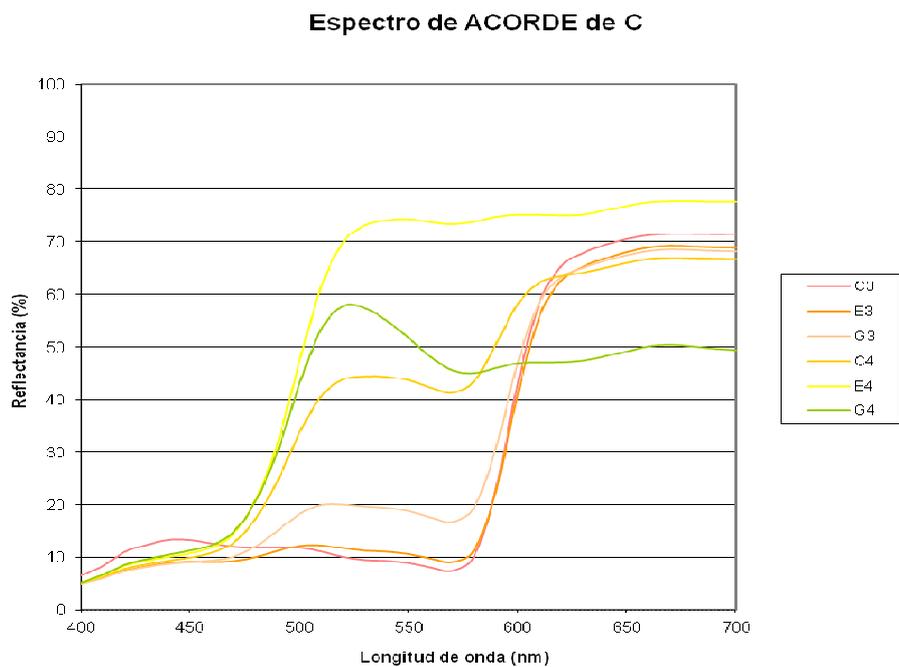


Figura D6. Espectro de acorde de C3.

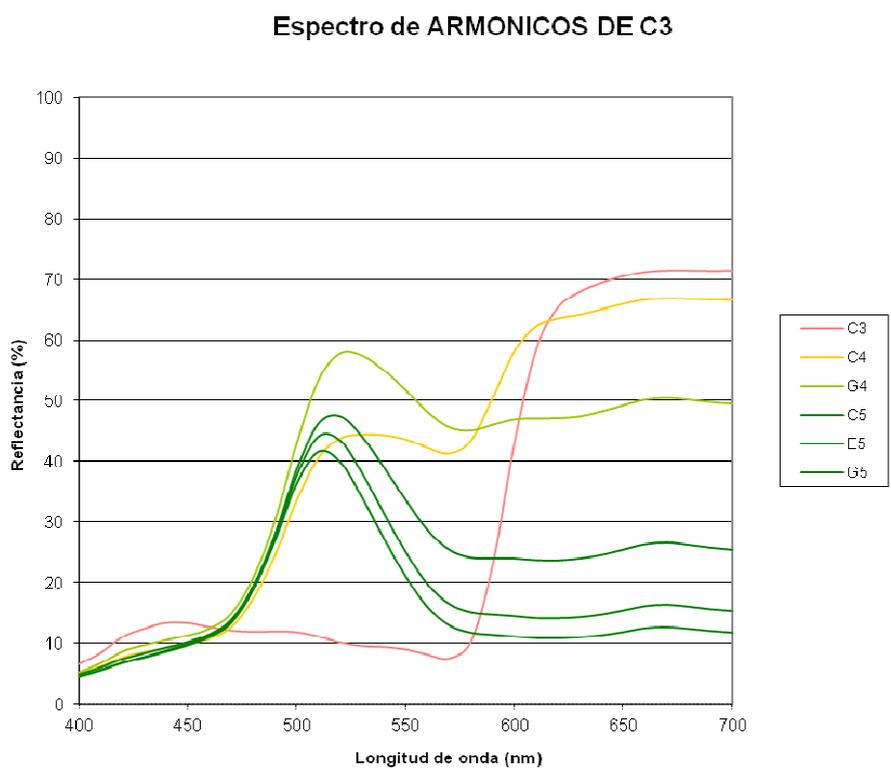


Figura D7. Espectro de armónicos de C3.

Espectro de ARMONICOS DE E3

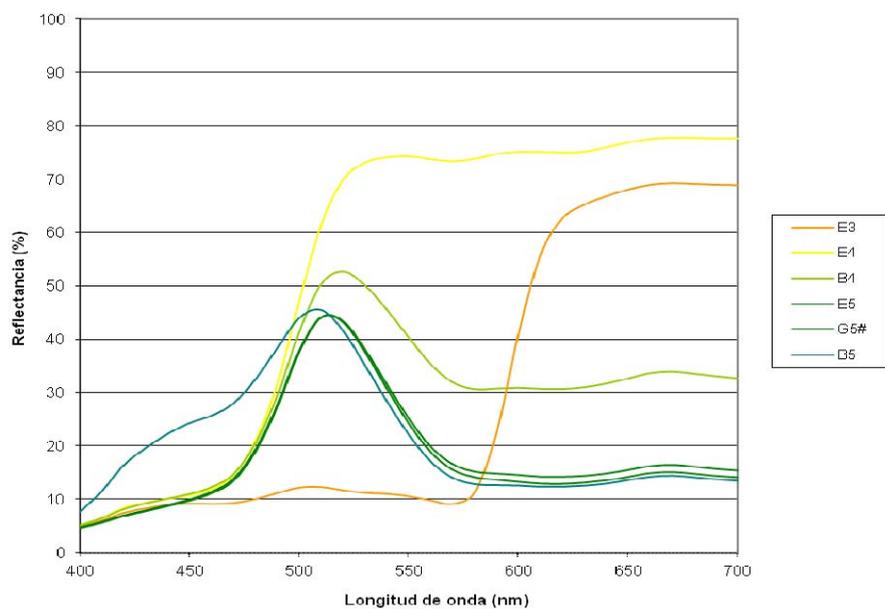


Figura D8. Espectro de armónicos de E3.

Espectro de ARMONICOS de G3

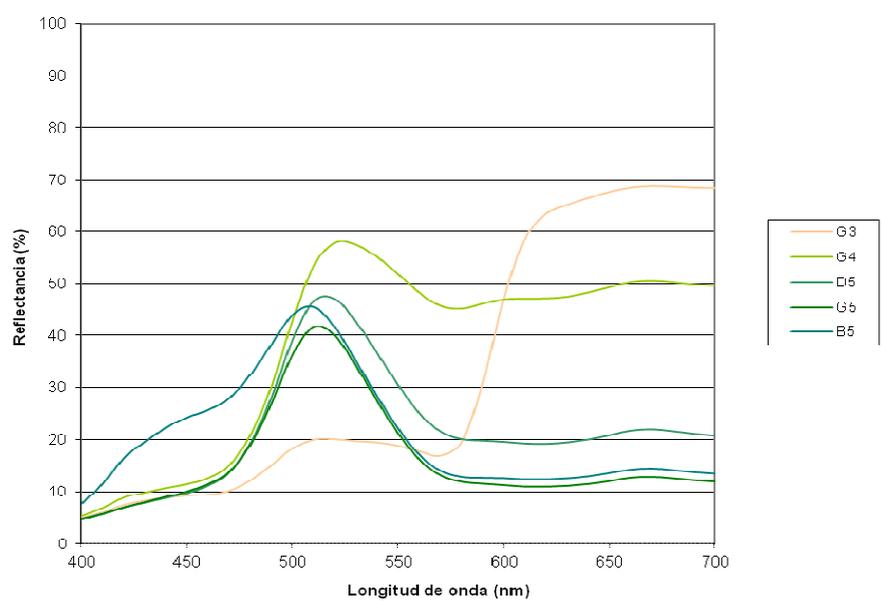


Figura D9. Espectro de armónicos de G3.

Sucesión de semitonos: A3, A3#, B3

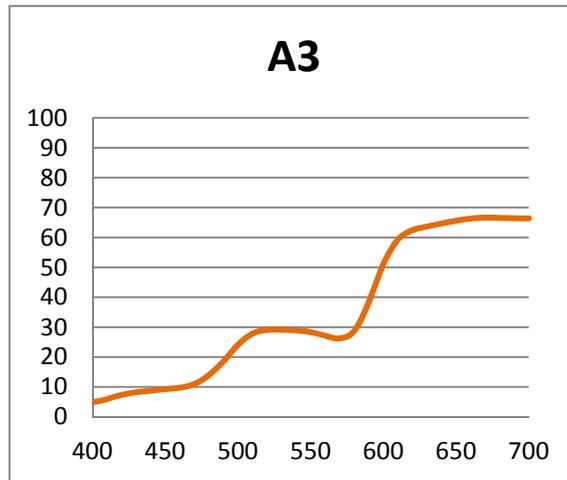


Figura D10. Espectro de armónicos de A3.

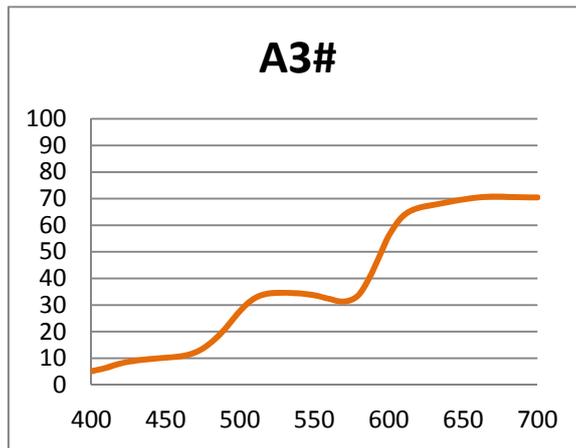


Figura D11. Espectro de armónicos de A3#.

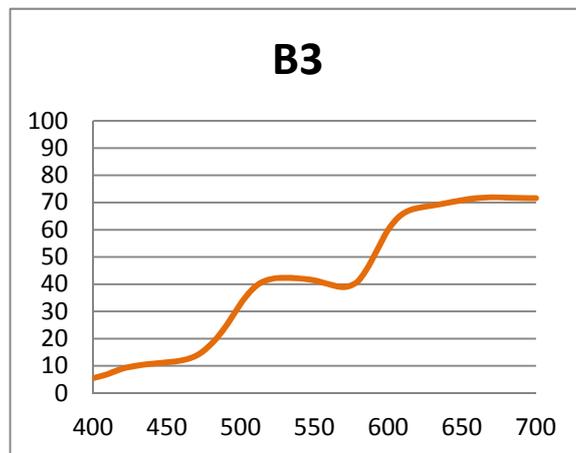


Figura D12. Espectro de armónicos de B3.

Espectros de octavas

Espectro de octavas C

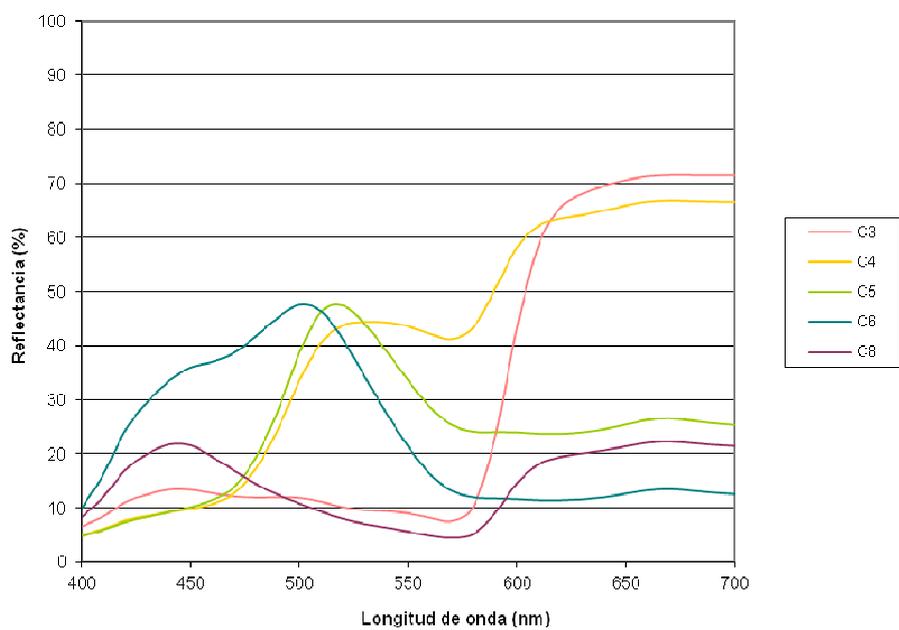


Figura D13. Espectro de octavas de C3.

Espectro de octavas E

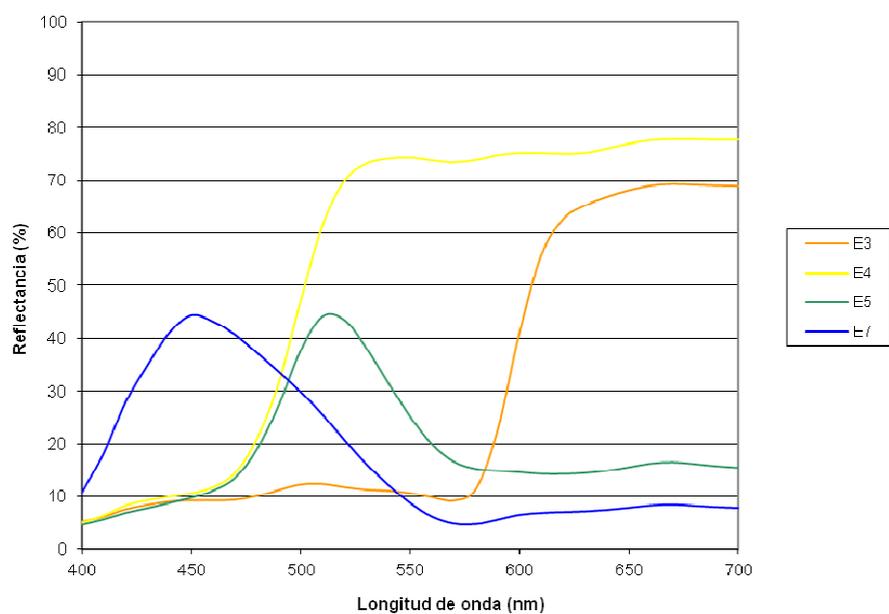


Figura D14. Espectro de octavas de E3.

Sucesión de octavas

A3

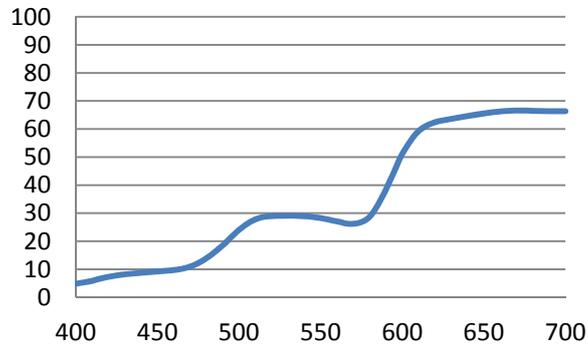


Figura D15. Espectro de octavas de A3.

A4

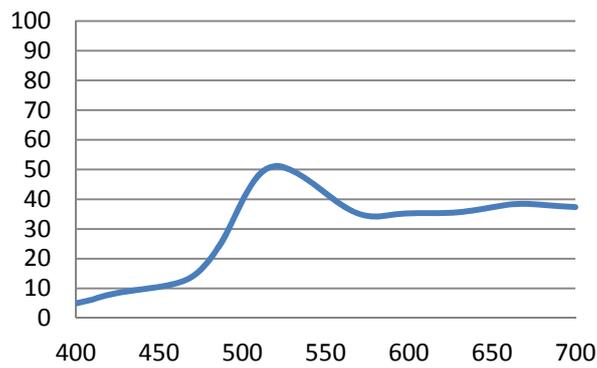


Figura D16. Espectro de octavas de A4.

A5

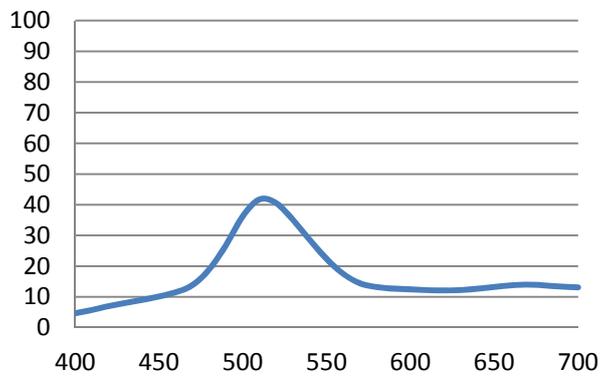


Figura D17. Espectro de octavas de A5.

ANEXO E

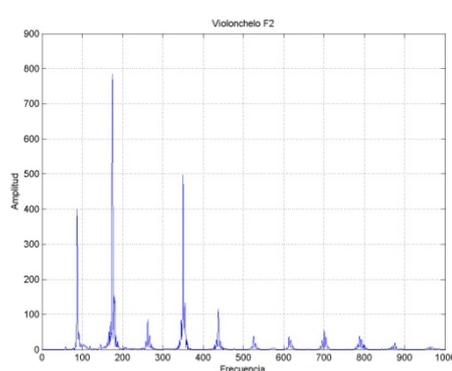
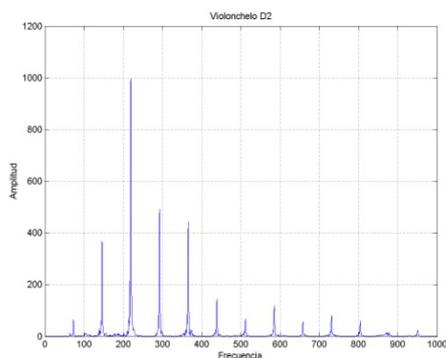
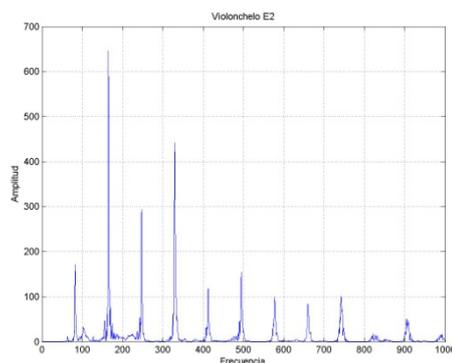
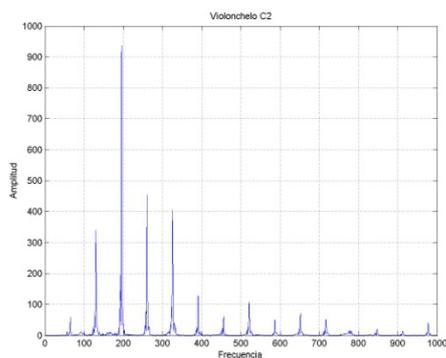
Espectrogramas de notas entre C2 y E5.

Se han generado la serie de notas C2, D2, E2, F2, G2, A2, B2, C3, D3, ... hasta E5 para el violonchelo, corno, fagot y piano. Para la generación de notas se ha utilizado el programa informático "Harmony Assistant"; programa del que se han obtenido los ficheros *wav* de toda la serie de notas para cada instrumento.

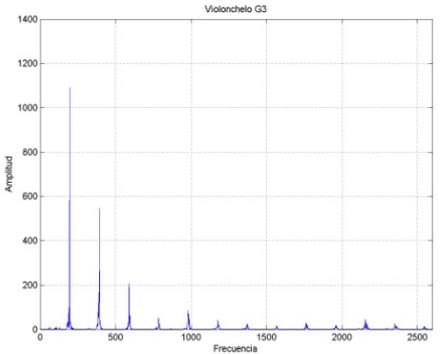
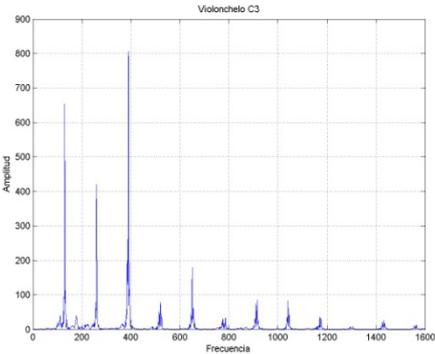
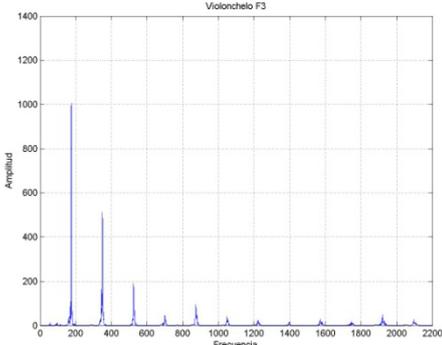
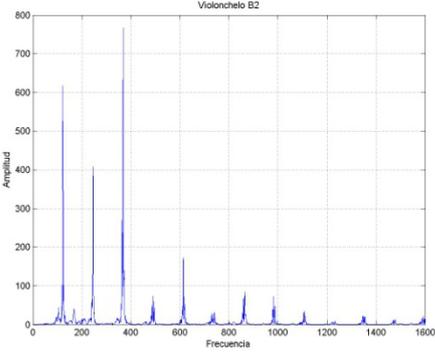
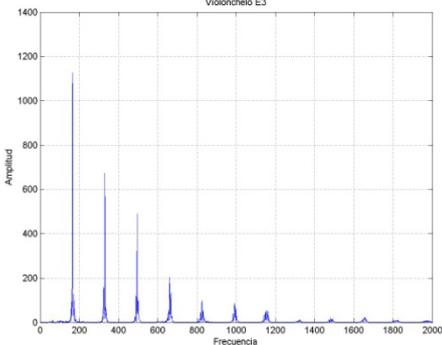
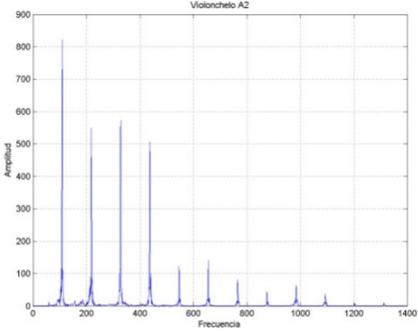
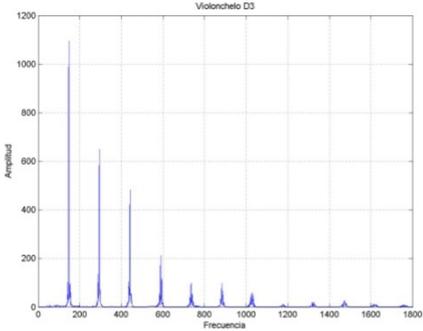
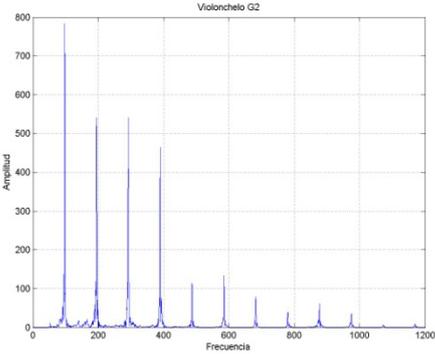
Los gráficos de espectros armónicos de cada nota se han obtenido mediante análisis matemático de los archivos *wav* de cada nota usando análisis básico de Fourier. Para la obtención de los espectros se ha utilizado el programa informático "Matlab"; programa del que se han obtenido los ficheros *jpg* de cada gráfico. La programación (script) para la obtención de los espectrogramas se expone al final del presente anexo.

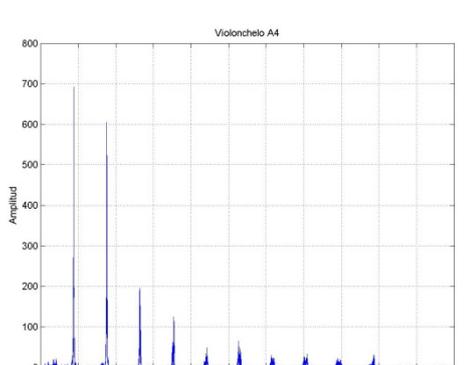
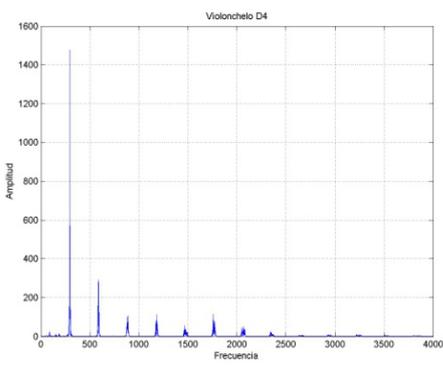
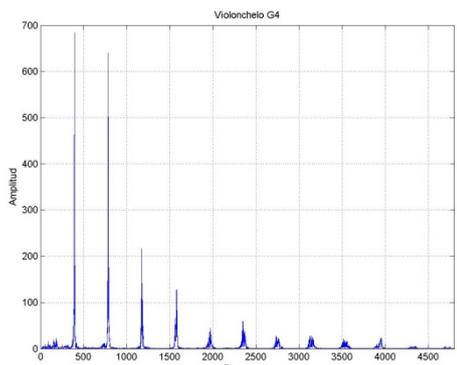
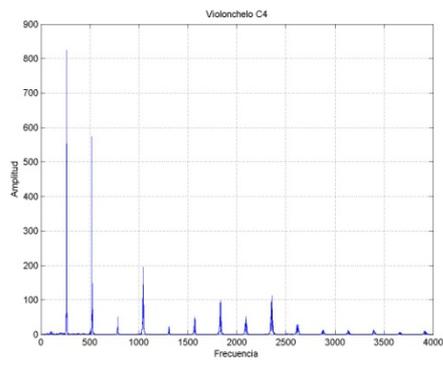
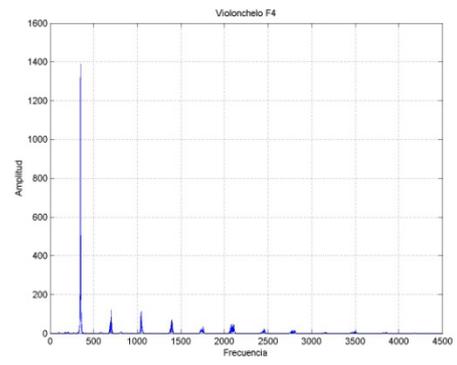
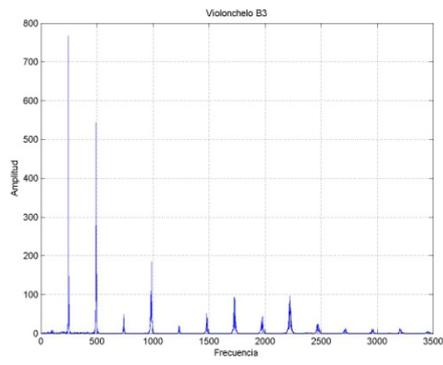
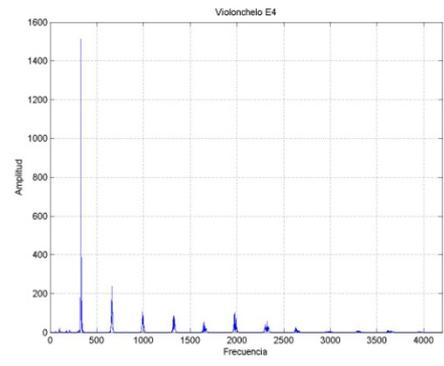
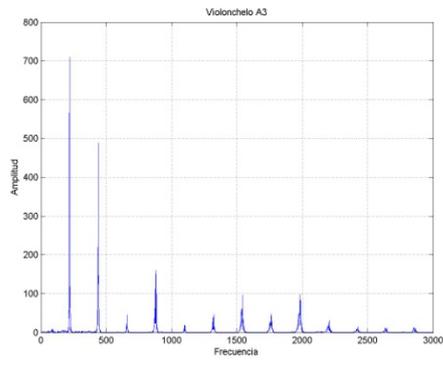
Los gráficos de espectros de la serie de notas analizadas para cada instrumento son los que se muestran.

Espectrogramas de la serie de notas de C2 a E5 para el VIOLONCHELO



COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO





COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

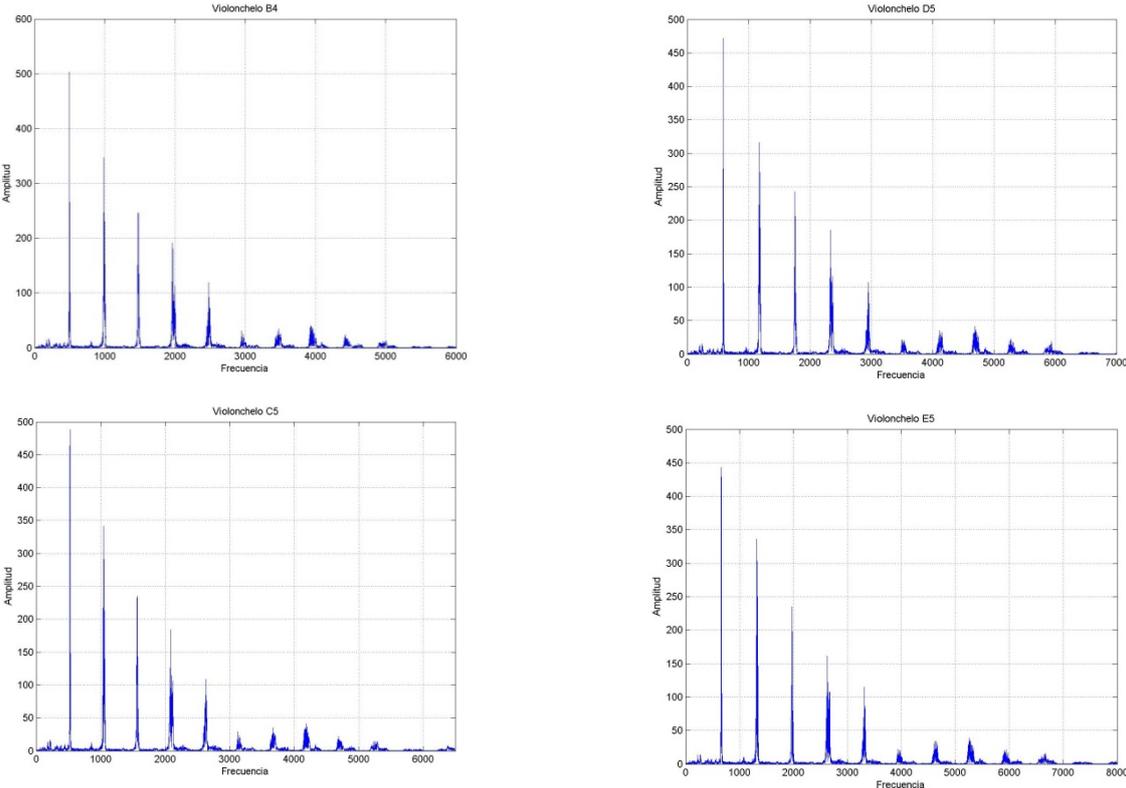
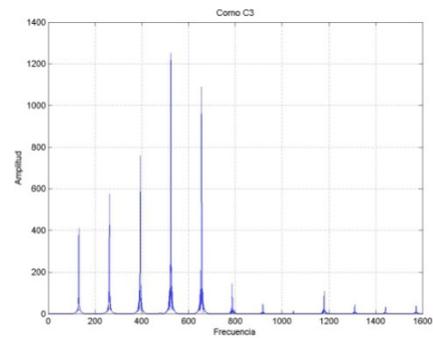
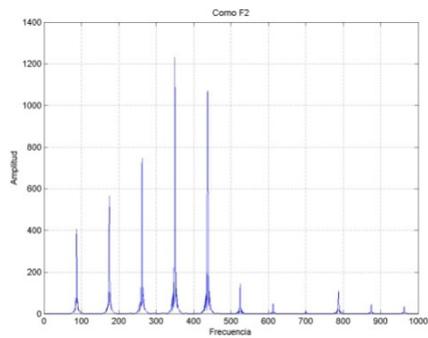
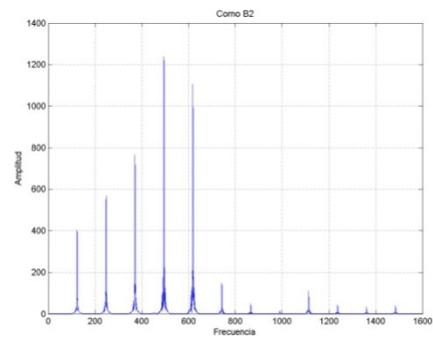
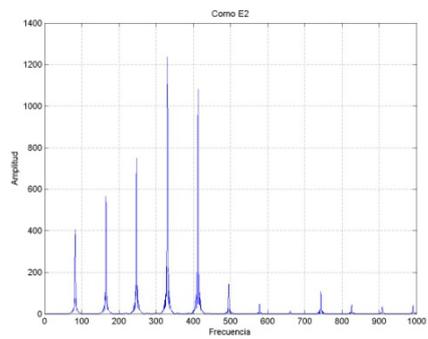
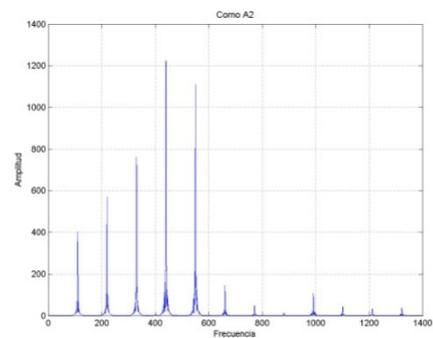
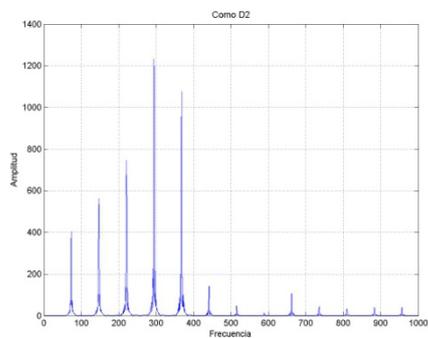
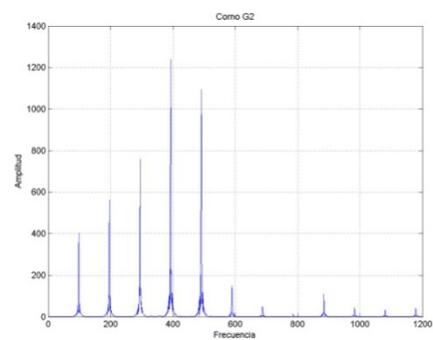
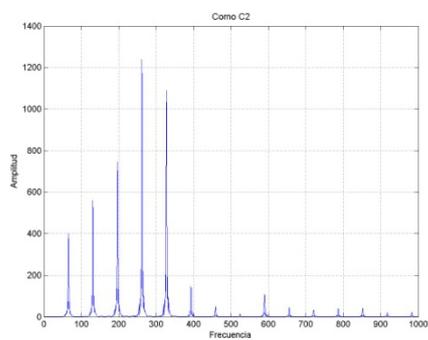
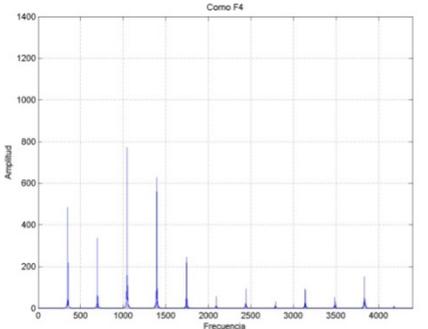
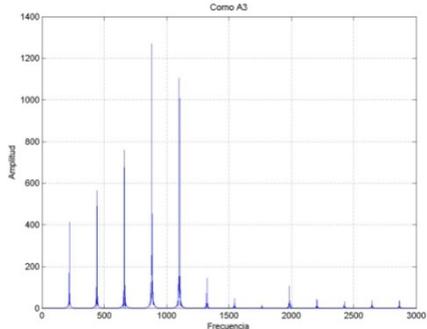
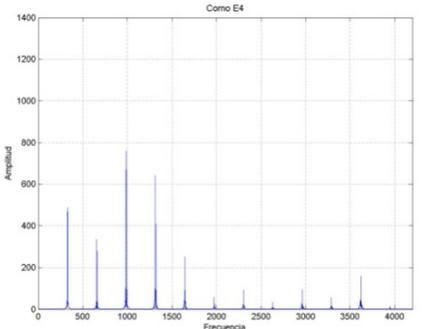
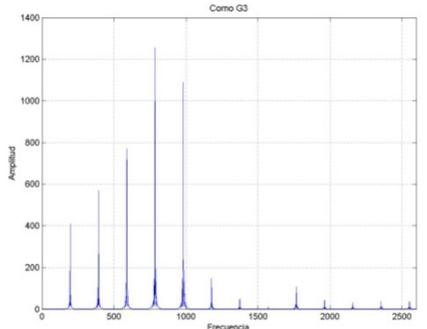
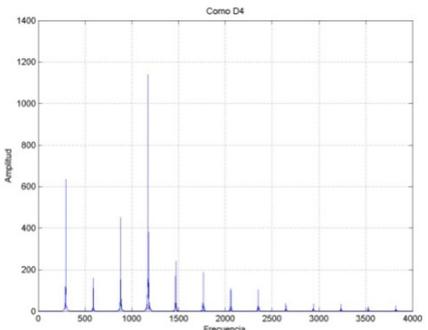
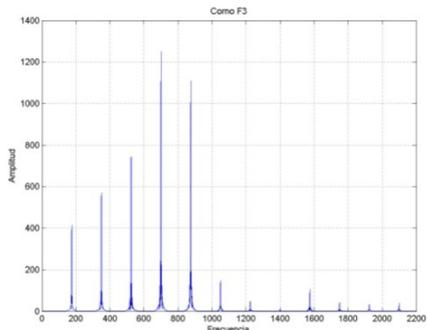
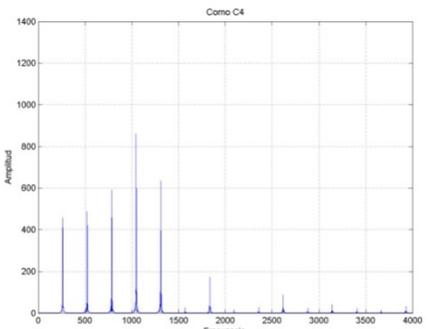
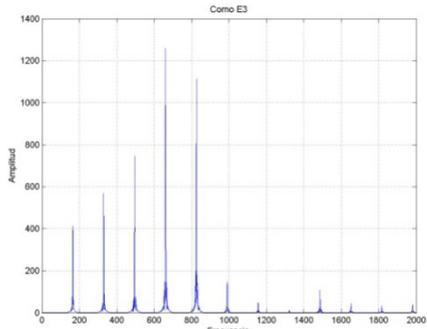
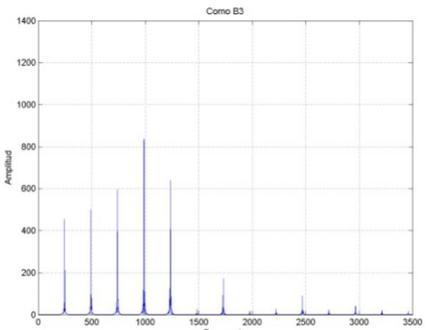
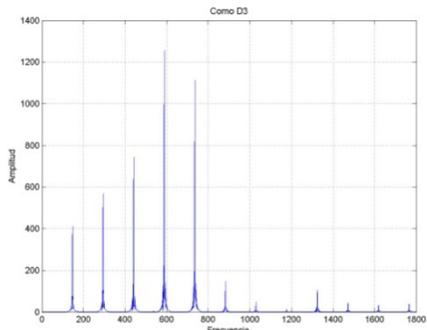


Figura E1. Espectrogramas de notas C2 a E5 para el violonchelo

Espectrogramas de la serie de notas de C2 a E5 para el CORNO



COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO



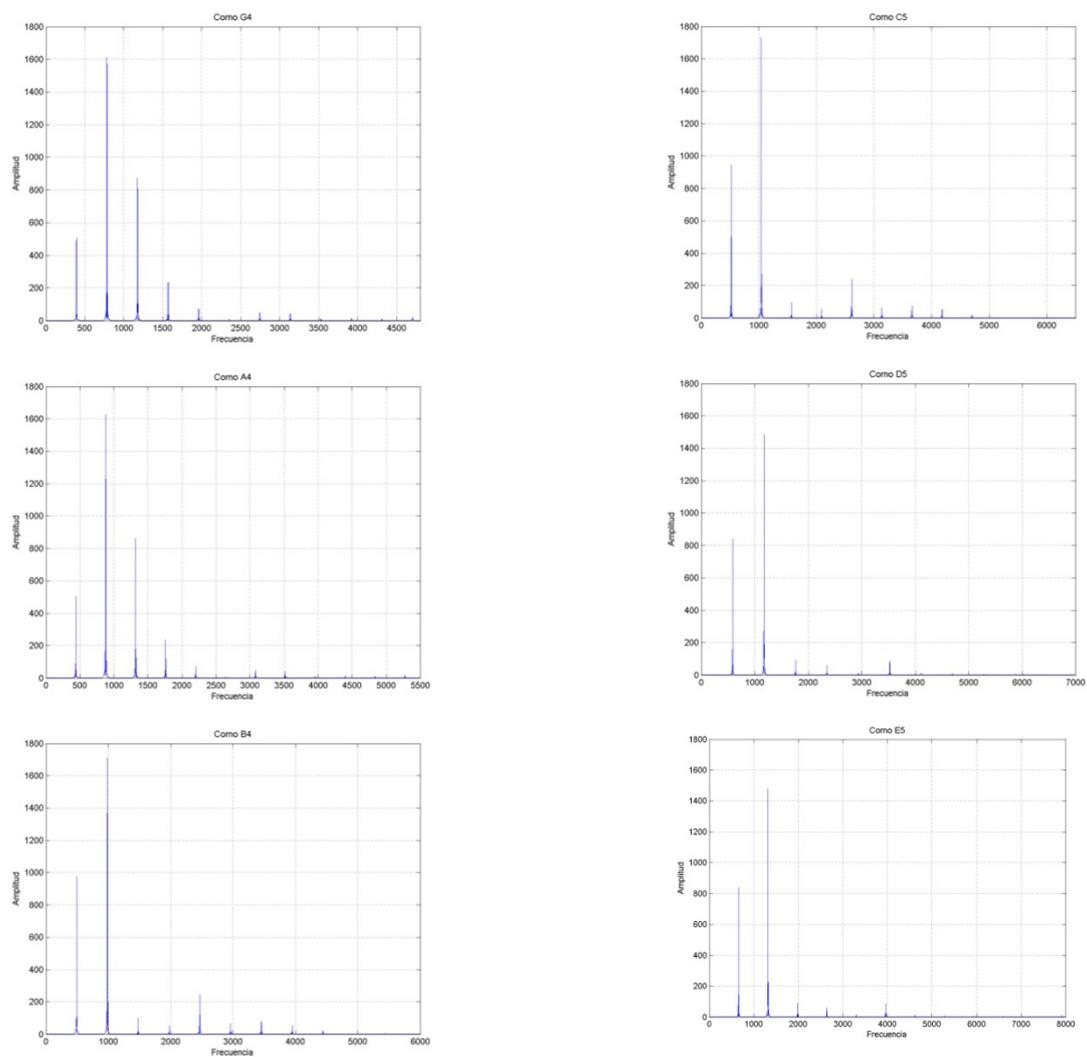
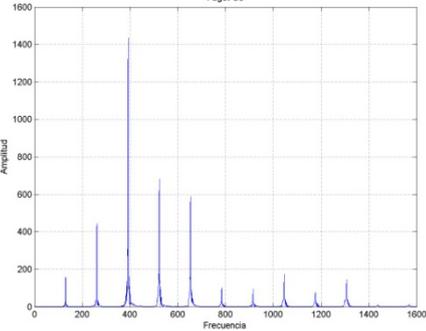
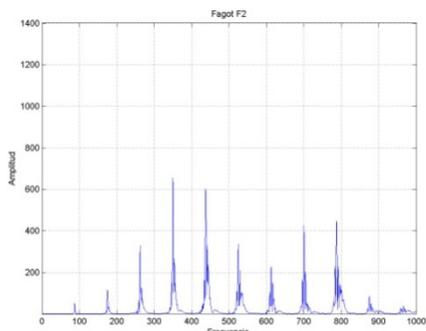
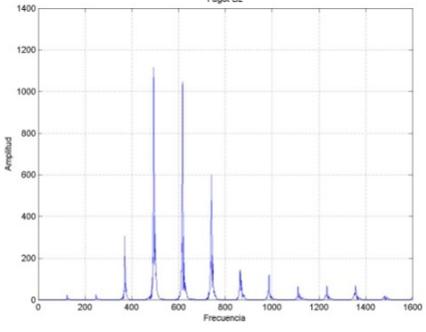
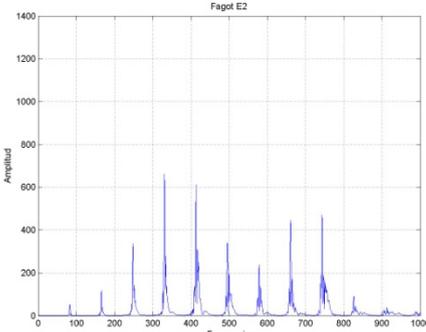
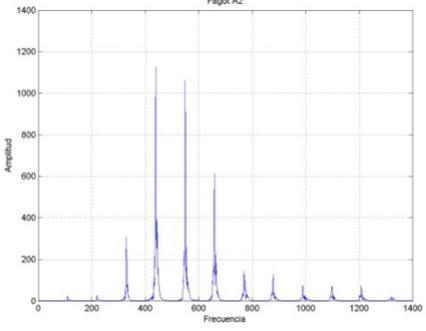
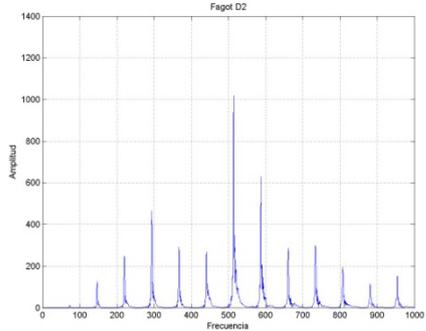
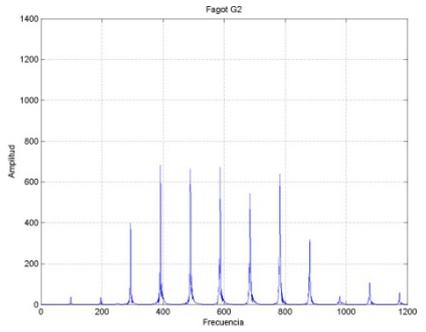
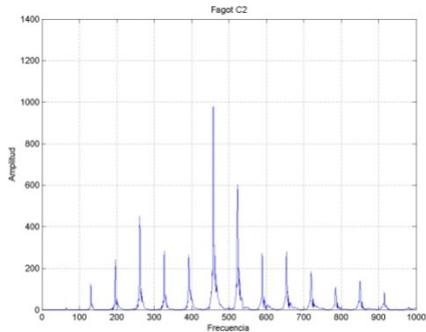
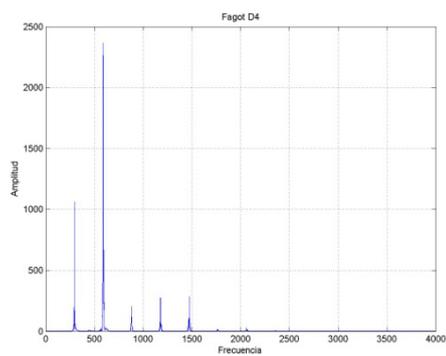
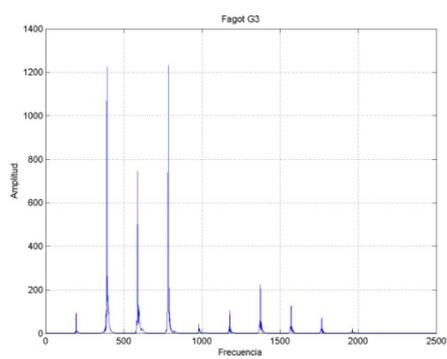
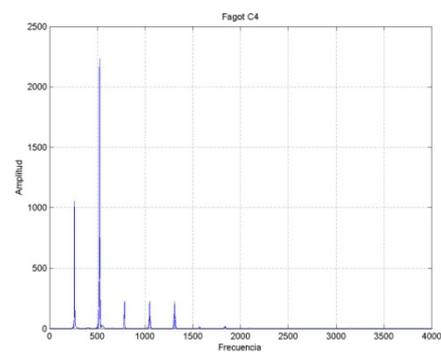
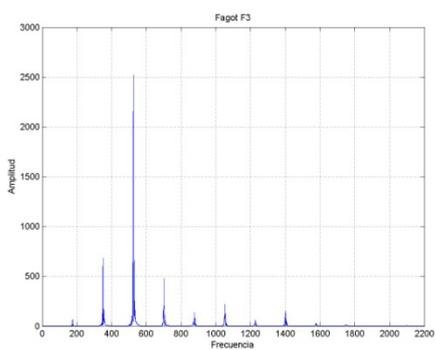
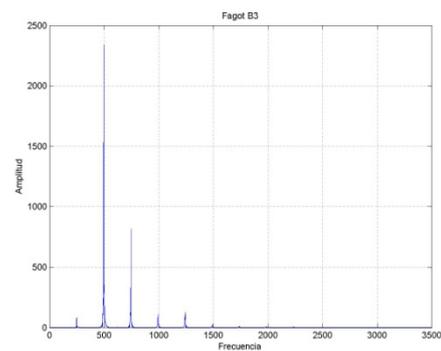
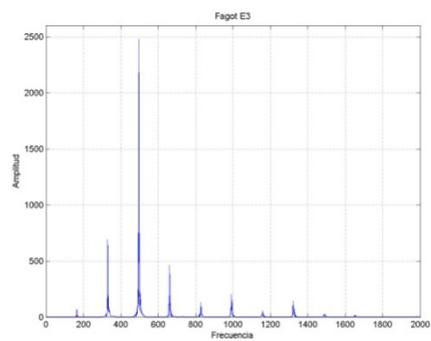
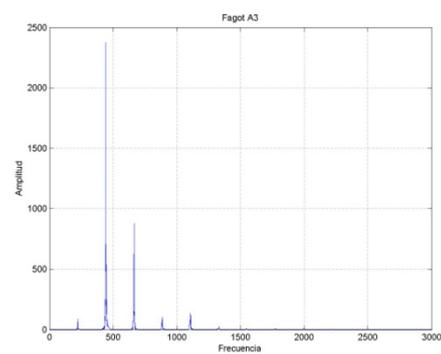
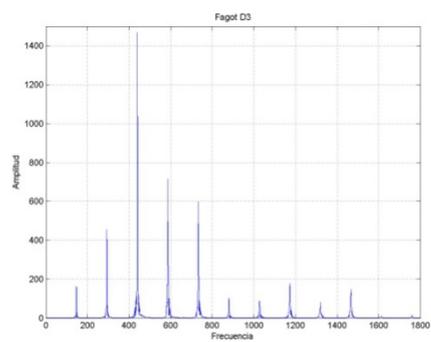


Figura E2. Espectrogramas de notas C2 a E5 para el corno.

Espectrogramas de la serie de notas de C2 a E5 para el FAGOT





COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

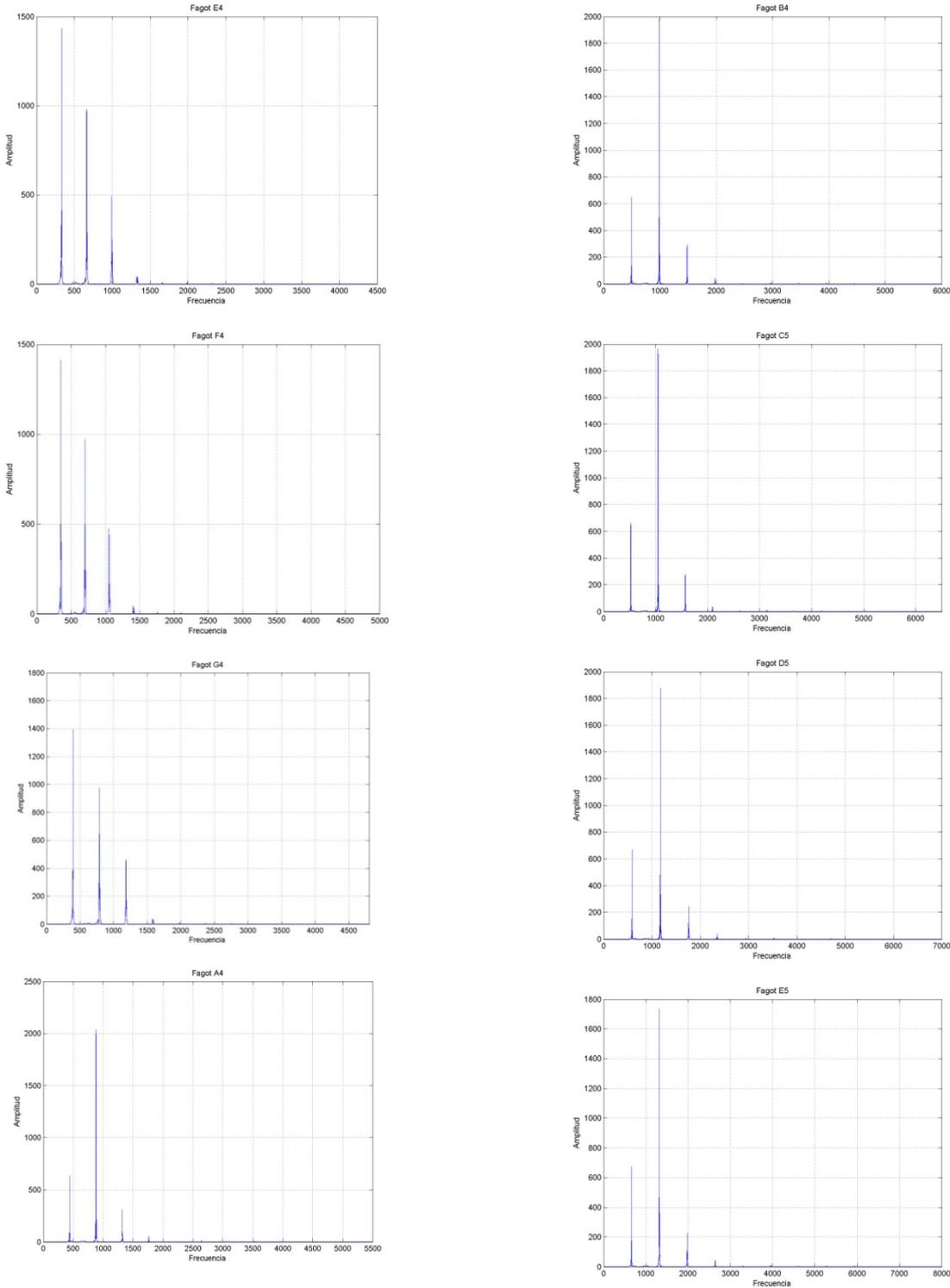
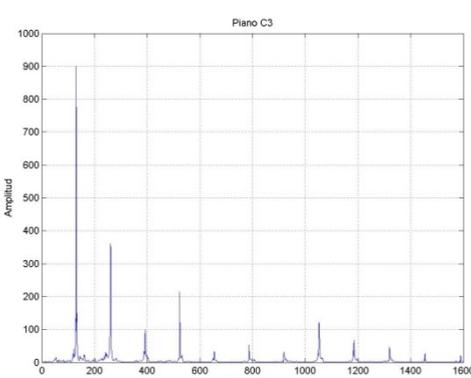
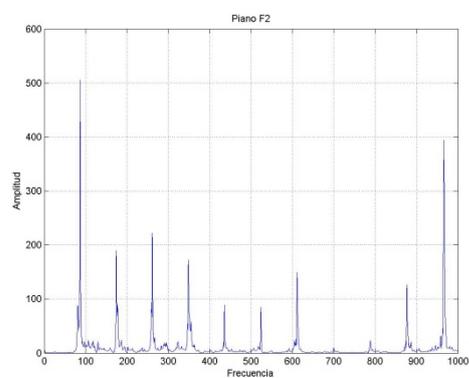
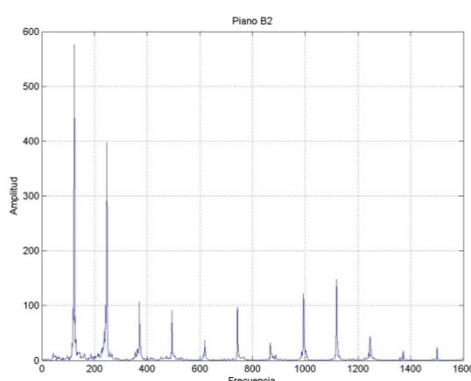
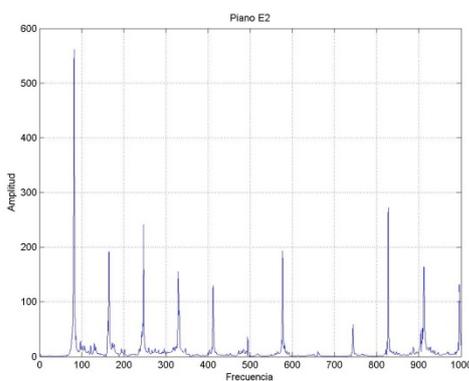
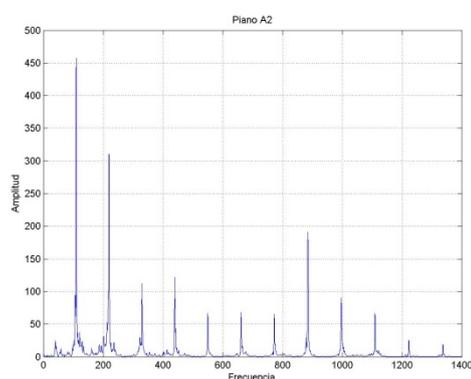
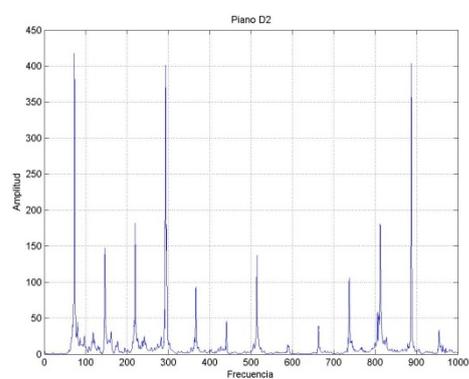
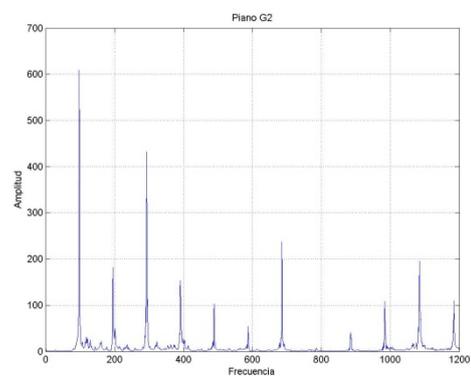
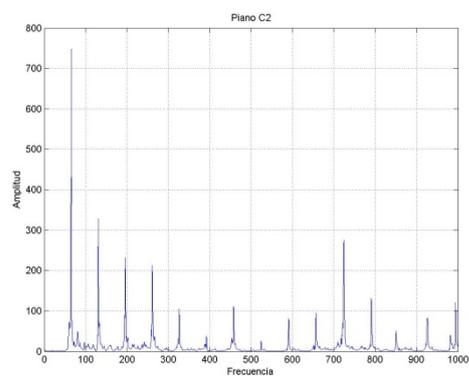
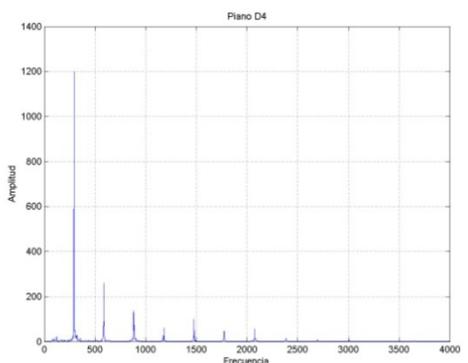
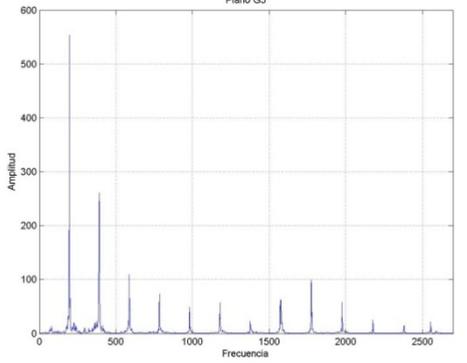
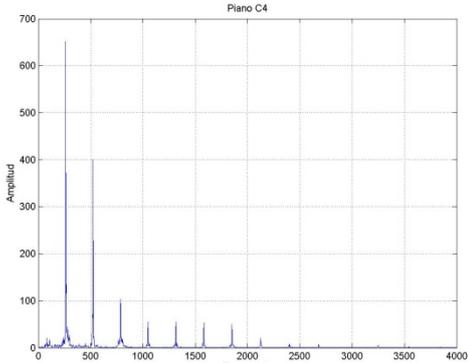
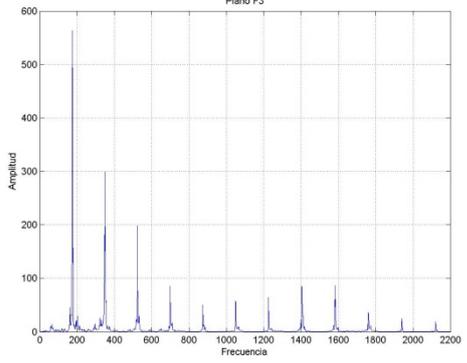
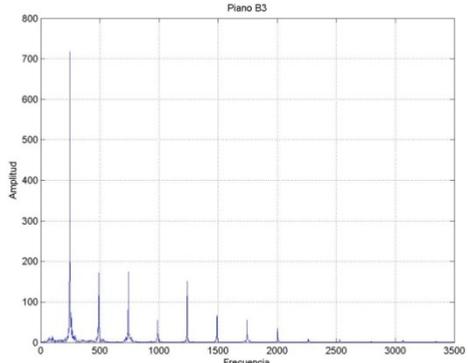
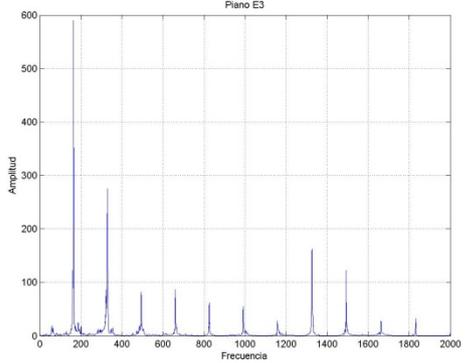
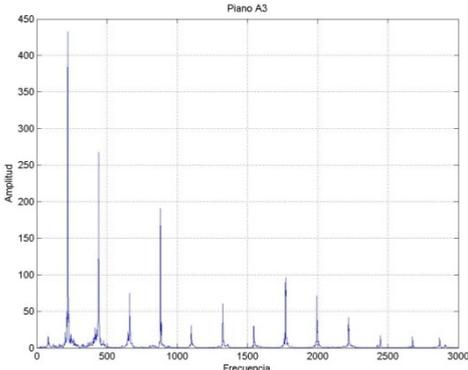
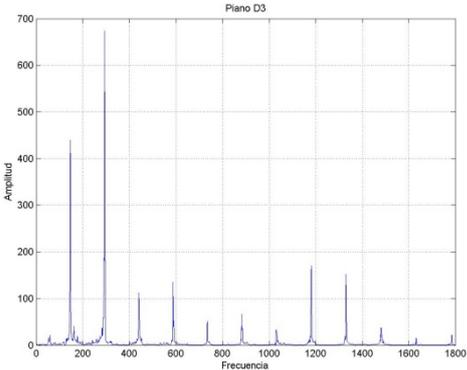


Figura E3. Espectrogramas de notas C2 a E5 para el fagot.

Espectrogramas de la serie de notas de C2 a E5 para el PIANO



COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO



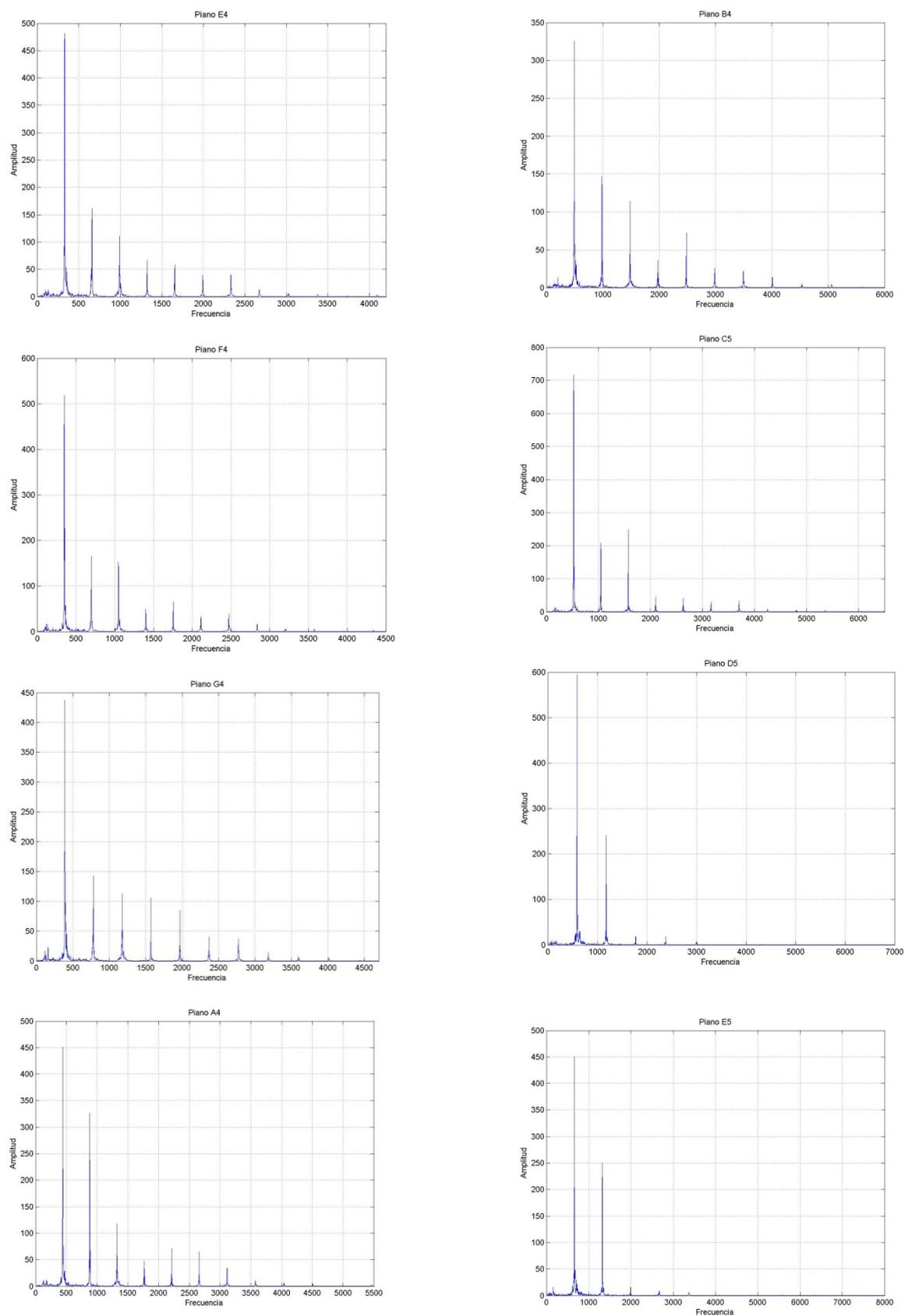


Figura E4. Espectrogramas de notas C2 a E5 para el piano.

Script de programa para obtención de gráficos de espectros.

```
function XIMO (file_name1,file_name2,file_name3,file_name4,fs)

%VIOLONCHELOA2345 ('A2 (VIOLONCHELO).wav','A3 (VIOLONCHELO).wav','A4 (VIOLONCHELO).wav',
', 'A5 (VIOLONCHELO).wav',44100)

[x1,y1]=wavread(file_name1);
[x2,y2]=wavread(file_name2);
[x3,y3]=wavread(file_name3);
[x4,y4]=wavread(file_name4);

N=length(x1)
fftdesenal1 = fft(x1);
fftdesenal2 = fft(x2);
fftdesenal3 = fft(x3);
fftdesenal4 = fft(x4);
fbins = fs/N * (0:(N/2 - 1));

figure(1)
plot(fbins, abs(fftdesenal1(1:N/2)))
title ('Violonchelo A2')
grid
xlabel('Frecuencia')
ylabel('Amplitud')

figure(2)
plot(fbins, abs(fftdesenal2(1:N/2)))
title ('Violonchelo A3')
grid
xlabel('Frecuencia')
ylabel('Amplitud')

figure(3)
plot(fbins, abs(fftdesenal3(1:N/2)))
title ('Violonchelo A4')
grid
xlabel('Frecuencia')
ylabel('Amplitud')

figure(4)
plot(fbins, abs(fftdesenal4(1:N/2)))
title ('Violonchelo A5')
grid
xlabel('Frecuencia')
ylabel('Amplitud')

figure(5)
plot(fbins, abs(fftdesenal1(1:N/2)),fbins, abs(fftdesenal2(1:N/2)),fbins, abs(fftdesena
l3(1:N/2)),fbins, abs(fftdesenal4(1:N/2)))
title ('Todos juntos')
legend('A2','A3','A4','A5')
grid
xlabel('Frecuencia')
ylabel('Amplitud')
```

ANEXO F

Valor de importancia de armónicos

Dentro de la escala temperada, la importancia de los armónicos generados por cualquier nota puede seguir el siguiente orden:

- 1º - Armónicos que generan la nota fundamental.
- 2º - Armónicos que componen el acorde.
- 3º - Armónicos disonantes en orden de menor a mayor desviación.

Ordenación de armónicos	Orden de importancia de armónicos	Desviación a nota (%)
Armónicos que generan la nota fundamental	1º	Sin desviación
	2º	
	4º	
	8º	
	16º	
Armónicos que componen el acorde	3º	0,11
	6º	
	12º	0,79
	5º	
Armónicos disonantes	10º	0,23
	9º	0,68
	15º	3,01
	11º	3,38
	13º	4,06
	7º	
	14º	

Tabla F1 . Ordenación de armónicos según su desviación a nota esperada.

El valor de importancia vi de cada armónico es asignado en función de la importancia y desviación. El valor de importancia estimado para cada armónico se expone en la tabla siguiente.

Ordenación de armónicos	Orden de importancia de armónicos	Valor de importancia de armónicos	Desviación a nota (%)
Armónicos que generan la nota fundamental	1º	5	Sin desviación
	2º	4	
	4º	3	
	8º	2	
	16º	1	
Armónicos que componen el acorde	3º	-1	0,11
	6º	-1	
	12º	-1	0,79
	5º	-2	
Armónicos disonantes	10º	-2	0,23
	9º	-3	0,68
	15º	-4	3,01
	11º	-5	3,38
	13º	-6	4,06
	7º	-7	
	14º	-7	

Tabla F2 . Valor de importancia de armónicos.

ANEXO G

Envolvente ideal armónica

Considerando que el sonido de la nota esperada de un instrumento es la fundamental, el sonido de un instrumento será más puro cuando sólo emita ese armónico.

Teniendo en cuenta que un sonido puro sinusoidal no puede ser producido por instrumentos tradicionales y que algunos de ellos carecen del 1er armónico (ver anexo C, espectrogramas del corno y del fagot), hay que considerar aquellos armónicos que llegan a componer la nota deseada. Por ello se considerarán también, aunque con valor decreciente, los armónicos 2º, 4º, 8º y 16º.

En base a estas premisas y a lo considerado en la técnica del valor de importancia de armónicos expuesta en anexo E, se puede obtener la *envolvente ideal armónica*: Curva asintota a la *envolvente de la sensación de sonoridad* cuya proporción de valor entre armónicos 1º, 2º, 4º, 8º y 16º se estiman en 5, 4, 3, 2 y 1 respectivamente.

	Armónicos	Valor de importancia de armónicos	Desviación a nota (%)
Armónicos que generan la nota fundamental	1º	5	Sin desviación
	2º	4	
	4º	3	
	8º	2	
	16º	1	

Tabla G1 . Valor de importancia de armónicos 1º, 2º, 4º, 8º y 16º.

Envolvente ideal armónica

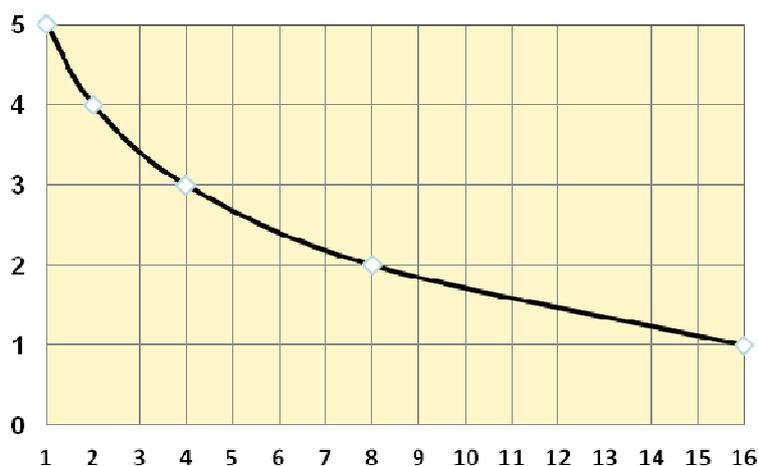


Figura G1 . Curva envolvente ideal armónica.

La *envolvente ideal armónica* representa la pureza de nota. Gráficamente se puede deducir que a mayor acercamiento de la *envolvente ideal armónica* a la *envolvente de la sensación de sonoridad* de los armónicos 1º, 2º, 4º, 8º y 16º, mayor grado de pureza de la nota musical.

El grado de pureza de un instrumento musical se puede obtener por la relación:

$$\text{Grado de pureza} = \text{Sonoridad valorada} / \text{Sonoridad valorada ideal} \quad (1)$$

Siendo la *sonoridad valorada*

$$\text{Sonoridad valorada} = \sum S_i \cdot v_i \quad (2)$$

Donde S_i es la sensación de sonoridad de cada armónico, y v_i es el valor de importancia del armónico considerado

Siendo la sonoridad valorada ideal (S')

$$\begin{aligned} S' &= 5/5 \cdot S'_1 \cdot v_{i_1} + 4/5 \cdot S'_1 \cdot v_{i_2} + 3/5 \cdot S'_1 \cdot v_{i_4} + 2/5 \cdot S'_1 \cdot v_{i_8} + 1/5 \cdot S'_1 \cdot v_{i_{16}} \\ S' &= 5/5 \cdot S'_1 \cdot 5 + 4/5 \cdot S'_1 \cdot 4 + 3/5 \cdot S'_1 \cdot 3 + 2/5 \cdot S'_1 \cdot 2 + 1/5 \cdot S'_1 \cdot 1 \\ S' &= 1/5 \cdot S'_1 \cdot (5^2 + 4^2 + 3^2 + 2^2 + 1^2) \\ S' &= 10,8 \cdot S'_1 \end{aligned} \quad (3)$$

S'_1 = Sonoridad de 1º armónico según envolvente ideal.

$$\begin{aligned} \text{Grado de pureza} &= \sum S_i \cdot v_i / S' \\ \text{Grado de pureza} &= (\sum S_i \cdot v_i) / (10,8 \cdot S'_1) \end{aligned} \quad (4)$$

ANEXO H

Datos generados para el análisis del orden de pureza del violonchelo, corno, fagot y piano para la nota E3

La nota generada en cada instrumento es E3 (Mi). La nota principal genera la siguiente serie de armónicos:

ARMÓNICO	f (Hz)	NOTA	Desv. (%)
1°	164,814	E3	0
2°	329,628	E4	0
3°	494,442	B4	0,11
4°	659,256	E5	0
5°	824,070	G5#	0,79
6°	988,884	B5	0,11
7°	1153,698	(C6#)	4,06
8°	1318,512	E6	0
9°	1483,326	F6#	0,23
10°	1648,140	G6#	0,79
11°	1812,954	(A6)	3,01
12°	1977,768	B6	0,11
13°	2142,582	(C7#)	3,38
14°	2307,396	(C7#)	4,06
15°	2472,210	(D7#)	0,68
16°	2637,024	E7	0
Acorde		E-G#-B (Mi)	
Escala		Mi Mayor	

Tabla H1. Armónicos de E3.

La escala de E (Mi) la componen las notas E, F#, G#, A, B, C# y D#.

Se han analizado los siguientes gráficos de espectros de armónicos para el violonchelo, corno, fagot y piano.

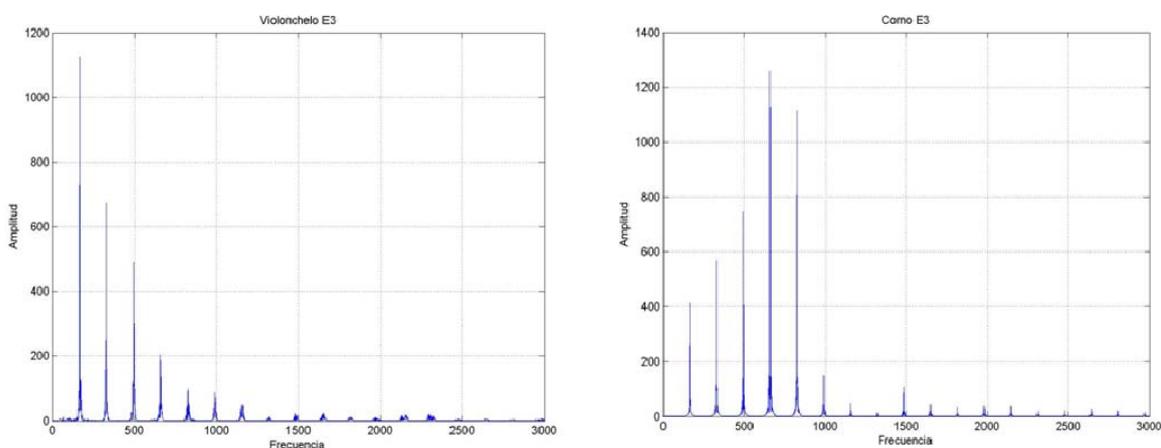


Figura H1. Espectros de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

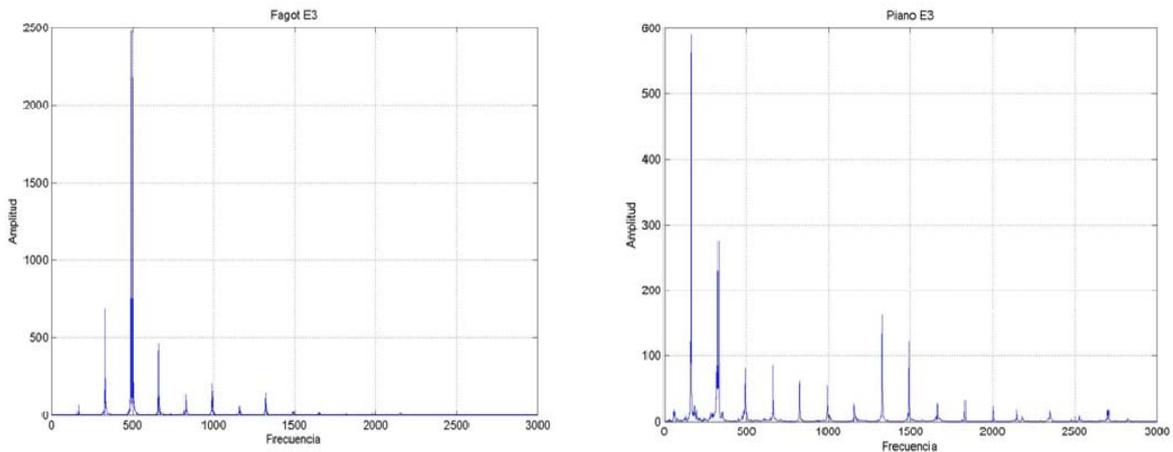


Figura H1 (continuación). Espectros de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Los valores absolutos y relativos de las amplitudes de señal de los armónicos de E3 se exponen en la tabla H2.

Amplitudes de señal									
ARMONICO	Violonchelo		Corno		Fagot		Piano		
1	1134	1,000	415	0,328	69	0,028	592	1,000	
2	679	0,599	569	0,450	694	0,279	277	0,468	
3	495	0,437	750	0,593	2486	1,000	84	0,142	
4	204	0,180	1265	1,000	467	0,188	86	0,145	
5	102	0,090	1123	0,888	137	0,055	63	0,106	
6	89	0,078	150	0,119	206	0,083	56	0,095	
7	53	0,047	50	0,040	55	0,022	28	0,047	
8	13	0,011	12	0,009	144	0,058	165	0,279	
9	23	0,020	108	0,085	27	0,011	125	0,211	
10	26	0,023	46	0,036	14	0,006	30	0,051	
11	13	0,011	35	0,028	3	0,001	33	0,056	
12	10	0,009	38	0,030	3	0,001	23	0,039	
13	17	0,015	38	0,030	5	0,002	20	0,034	
14	20	0,018	19	0,015	1	0,000	20	0,034	
15	3	0,003	19	0,015	0	0,000	8	0,014	
16	3	0,003	27	0,021	0	0,000	20	0,034	

Tabla H2. Amplitudes absolutas y relativas de señal de armónicos de E3.

Los valores de las **amplitudes relativas** de los armónicos se pueden observar gráficamente en la figura H2.

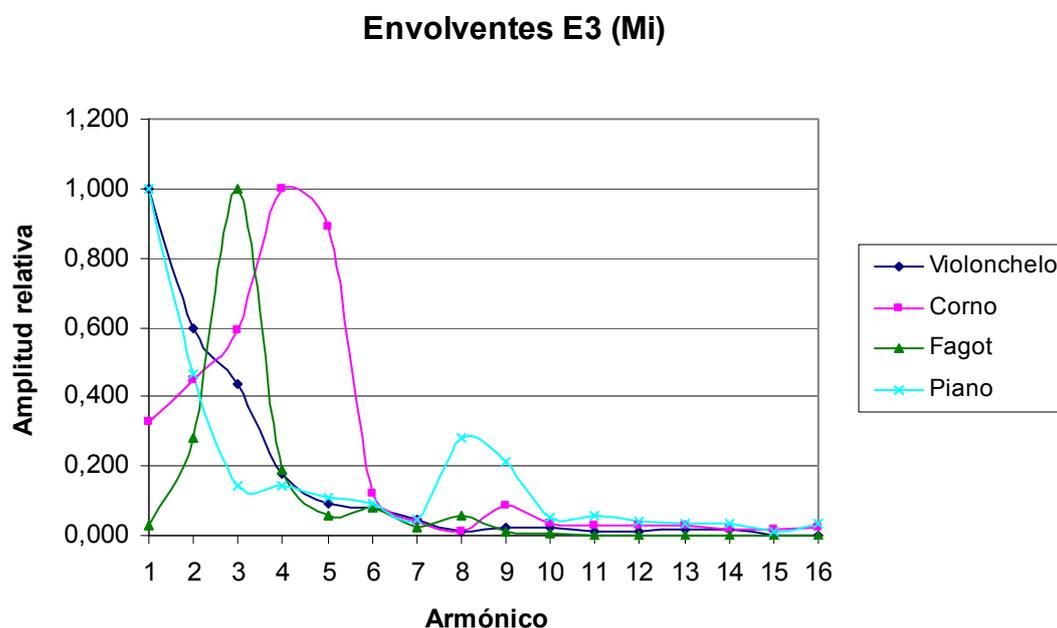


Figura H2. Envoltentes de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

De los valores de las **amplitudes relativas** de los armónicos se obtienen los niveles de presión sonora L_p de los armónicos [20]. Considerando el máximo nivel de presión sonora (L_p [dB]) de 80 dB se tiene:

$$L_p = 80 \text{ dB} \times \text{Amplitud relativa}$$

NIVEL DE PRESIÓN SONORA $L_p = [80 \text{ dB(A)} \times \text{Amplitud relativa}]$				
ARMÓNICO	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1º	80,000	26,245	2,220	80,000
2º	47,901	35,984	22,333	37,432
3º	34,921	47,431	80,000	11,351
4º	14,392	80,000	15,028	11,622
5º	7,196	71,020	4,409	8,514
6º	6,279	9,486	6,629	7,568
7º	3,739	3,162	1,770	3,784
8º	0,917	0,759	4,634	22,297
9º	1,623	6,830	0,869	16,892
10º	1,834	2,909	0,451	4,054
11º	0,917	2,213	0,097	4,459
12º	0,705	2,403	0,097	3,108
13º	1,199	2,403	0,161	2,703
14º	1,411	1,202	0,032	2,703
15º	0,212	1,202	0,000	1,081
16º	0,212	1,708	0,000	2,703

Tabla H3. Niveles de presión sonora de armónicos de E3.

Partiendo de los niveles de L_p de los armónicos, se obtienen los niveles de sonoridad NS corregidos según curvas isofónicas.

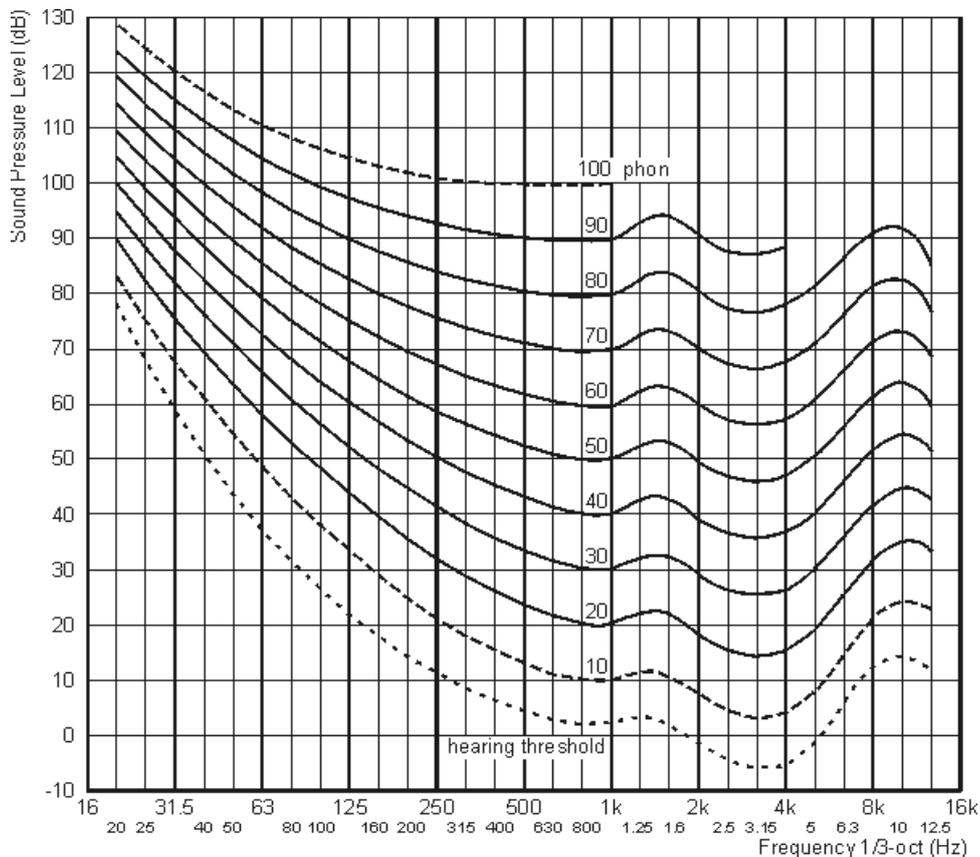


Figura H3. Curvas de igual sonoridad (ISO 226).

Nivel de Sonoridad NS (fon) (Según curvas isofónicas ISO 226)					
ARMONICO	f (Hz)	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	164,814	70,000	8,000	0,000	70,000
2°	329,628	42,000	26,000	14,000	28,000
3°	494,442	32,000	45,000	79,000	8,000
4°	659,256	12,000	79,500	14,000	11,000
5°	824,070	7,000	71,500	3,000	7,000
6°	988,884	6,000	9,500	6,500	7,500
7°	1153,698	0,000	1,000	0,000	1,500
8°	1318,512	0,000	0,000	2,000	20,000
9°	1483,326	0,000	6,000	0,000	15,000
10°	1648,140	0,000	1,000	0,000	2,000
11°	1812,954	2,000	2,500	0,000	6,000
12°	1977,768	3,000	5,000	1,000	6,000
13°	2142,582	5,000	6,000	1,500	6,000
14°	2307,396	6,000	6,000	4,000	7,000
15°	2472,210	6,000	6,500	0,000	6,000
16°	2637,024	6,500	7,000	0,000	8,000

Tabla H4. Niveles de sonoridad corregidos según curvas de igual sonoridad (ISO 226).

Los niveles de sonoridad obtenidos son aún una magnitud *psicofísica* y es necesario obtener la **sensación de sonoridad**, o simplemente *sonoridad*, S (loudness, L)

Para $NS > 40$ fon :

$$S = 2^{(NS-40)/10}$$

Para $NS < 40$ fon :

$$S = 6,901 \times 10^{-5} (NS-2)^{2,634}$$

Sensación de Sonoridad S (son)						
ARMONICO	f (Hz)	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano	
1°	164,814	8,000	0,008	0,000	8,000	
2°	329,628	1,149	0,298	0,048	0,368	
3°	494,442	0,537	1,414	14,929	0,008	
4°	659,256	0,030	15,455	0,048	0,023	
5°	824,070	0,005	8,877	0,000	0,005	
6°	988,884	0,003	0,014	0,004	0,006	
7°	1153,698	0,000	0,000	0,000	0,000	
8°	1318,512	0,000	0,000	0,000	0,140	
9°	1483,326	0,000	0,003	0,000	0,059	
10°	1648,140	0,000	0,000	0,000	0,000	
11°	1812,954	0,000	0,000	0,000	0,003	
12°	1977,768	0,000	0,001	0,000	0,003	
13°	2142,582	0,001	0,003	0,000	0,003	
14°	2307,396	0,003	0,003	0,000	0,005	
15°	2472,210	0,003	0,004	0,000	0,003	
16°	2637,024	0,004	0,005	0,000	0,008	

Tabla H5. Valores de Sensación de Sonoridad de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Con los valores de los niveles de **sensaciones de sonoridad** de los armónicos se obtienen las **envolventes de armónicos**.

Sensación de Sonoridad E3 (Mi)

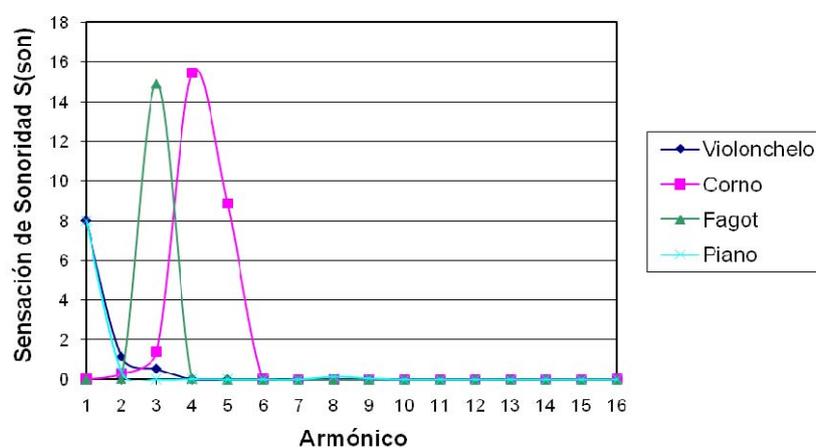


Figura H4. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de E3.

Evaluación matemática de la sonoridad

Teniendo en cuenta la *sensación de sonoridad* (S_i) de cada armónico y su valor de importancia (Anexo F) se obtiene la *sonoridad valorada* ($\sum S_i \cdot v_i$) para cada instrumento.

ARMONICO	Desviación (%)	Sonoridad valorada ($\sum S_i \cdot v_i$)				
		Valor import. v_i	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	0	5	40,000	0,039	0,000	40,000
2°	0	4	4,595	1,192	0,192	1,472
3°	0,11	-1	-0,537	-1,414	-14,929	-0,008
4°	0	3	0,089	46,365	0,144	0,068
5°	0,79	-2	-0,010	-17,753	0,000	-0,010
6°	0,11	-1	-0,003	-0,014	-0,004	-0,006
7°	4,06	-7	0,000	0,000	0,000	0,000
8°	0	2	0,000	0,000	0,000	0,279
9°	0,23	-3	0,000	-0,008	0,000	-0,178
10°	0,79	-2	0,000	0,000	0,000	0,000
11°	3,01	-5	0,000	0,000	0,000	-0,013
12°	0,11	-1	0,000	-0,001	0,000	-0,003
13°	3,38	-6	-0,007	-0,016	0,000	-0,016
14°	4,06	-7	-0,019	-0,019	-0,003	-0,034
15°	0,68	-4	-0,011	-0,015	0,000	-0,011
16°	0	1	0,004	0,005	0,000	0,008
		$\sum S \cdot v_i =$	44,102	28,361	-14,599	41,550

Tabla H6. Sonoridades valoradas de armónicos de E3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Orden de pureza
 1° Violonchelo
 2° Piano
 3° Corno
 4° Fagot

ANEXO I

Datos generados para el análisis del orden de pureza del violonchelo, corno, fagot y piano para la nota B3

La nota generada en cada instrumento es B3 (Si). La nota principal genera la siguiente serie de armónicos

ARMÓNICO	f (Hz)	NOTA	Desv. (%)
1°	246,942	B3	0
2°	493,884	B4	0
3°	740,826	F5#	0,11
4°	987,768	B5	0
5°	1234,710	D6#	0,79
6°	1481,652	F6#	0,11
7°	1728,594	(G6#)	4,06
8°	1975,536	B6	0
9°	2222,478	(C7#)	0,23
10°	2469,420	D7#	0,79
11°	2716,362	(E7)	3,01
12°	2963,304	F7#	0,11
13°	3210,246	(G7#)	3,38
14°	3457,188	(G7#)	4,06
15°	3704,130	(A7#)	0,68
16°	3951,072	B7	0
Acorde		B-D#-F# (Si)	
Escala		Si M	

Tabla I1. Armónicos de E3.

La escala de B (Si) la componen las notas B, C#, D#, E, F#, G# y A#

Se han analizado los siguientes gráficos de espectros de armónicos para el violonchelo, corno, fagot y piano.

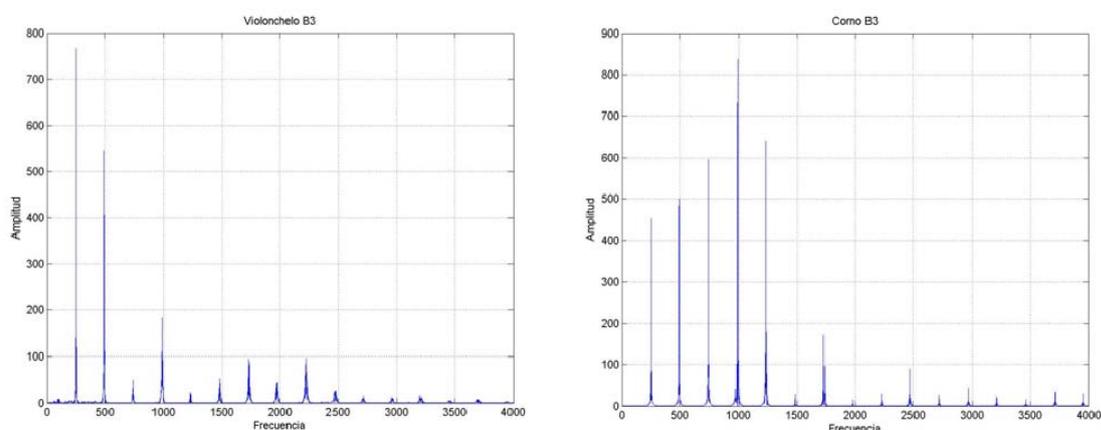


Figura I1. Espectros de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

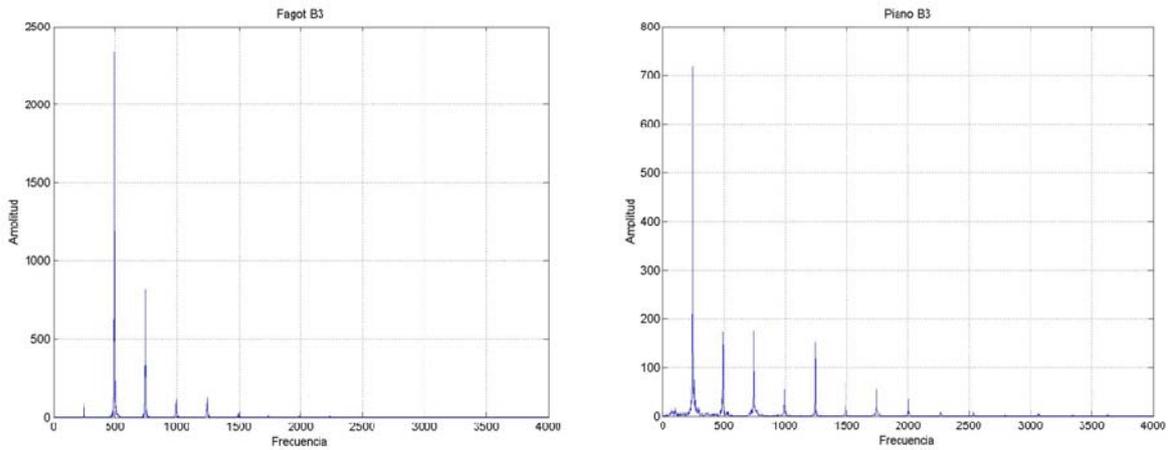


Figura I1 (Continuación). Espectros de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Los valores absolutos y relativos de las amplitudes de señal de los armónicos de E3 se exponen en la tabla I2.

ARMONICO	Violonchelo		Corno		Fagot		Piano	
	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa
1	767	1,000	406	0,483	84	0,034	717	1,000
2	544	0,709	501	0,596	2468	1,000	171	0,238
3	47	0,061	596	0,710	823	0,333	173	0,241
4	187	0,244	840	1,000	109	0,044	54	0,075
5	21	0,027	640	0,762	129	0,052	153	0,213
6	51	0,066	28	0,033	26	0,011	66	0,092
7	94	0,123	174	0,207	6	0,002	56	0,078
8	43	0,056	14	0,017	5	0,002	35	0,049
9	98	0,128	28	0,033	3	0,001	8	0,011
10	25	0,033	90	0,107	0	0,000	8	0,011
11	12	0,016	23	0,027	0	0,000	1	0,001
12	12	0,016	42	0,050	0	0,000	2	0,003
13	14	0,018	21	0,025	0	0,000	1	0,001
14	4	0,005	14	0,017	0	0,000	1	0,001
15	8	0,010	30	0,036	0	0,000	0	0,000
16	2	0,003	28	0,033	0	0,000	0	0,000
	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa

Tabla I2. Amplitudes absolutas y relativas de señal de armónicos de B3.

Los valores de las **amplitudes relativas** de los armónicos se pueden observar gráficamente en la figura I2.

Envoltentes B3 (Si)

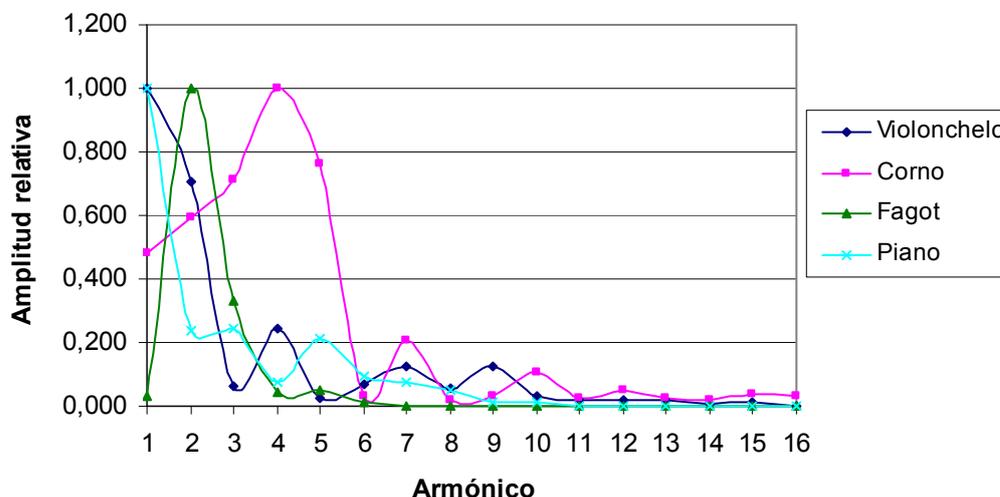


Figura I2. Envoltentes de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

De los valores de las **amplitudes relativas** de los armónicos se obtienen los niveles de presión sonora L_p de los armónicos [20]. Considerando el máximo nivel de presión sonora (L_p [dB]) de 80 dB se tiene:

$$L_p = 80 \text{ dB} \times \text{Amplitud relativa}$$

ARMÓNICO	SONORIDAD NIVEL DE PRESIÓN SONORA $L_p = [80 \text{ dB(A)} \times \text{Amplitud relativa}]$			
	Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1º	80,000	38,667	2,723	80,000
2º	56,741	47,714	80,000	19,079
3º	4,902	56,762	26,677	19,303
4º	19,505	80,000	3,533	6,025
5º	2,190	60,952	4,182	17,071
6º	5,319	2,667	0,843	7,364
7º	9,804	16,571	0,194	6,248
8º	4,485	1,333	0,162	3,905
9º	10,222	2,667	0,097	0,893
10º	2,608	8,571	0,000	0,893
11º	1,252	2,190	0,000	0,112
12º	1,252	4,000	0,000	0,223
13º	1,460	2,000	0,000	0,112
14º	0,417	1,333	0,000	0,112
15º	0,834	2,857	0,000	0,000
16º	0,209	2,667	0,000	0,000

Tabla I3. Niveles de presión sonora de armónicos de B3.

Partiendo de los niveles de L_p de los armónicos, se obtienen los niveles de sonoridad NS corregidos según curvas isofónicas.

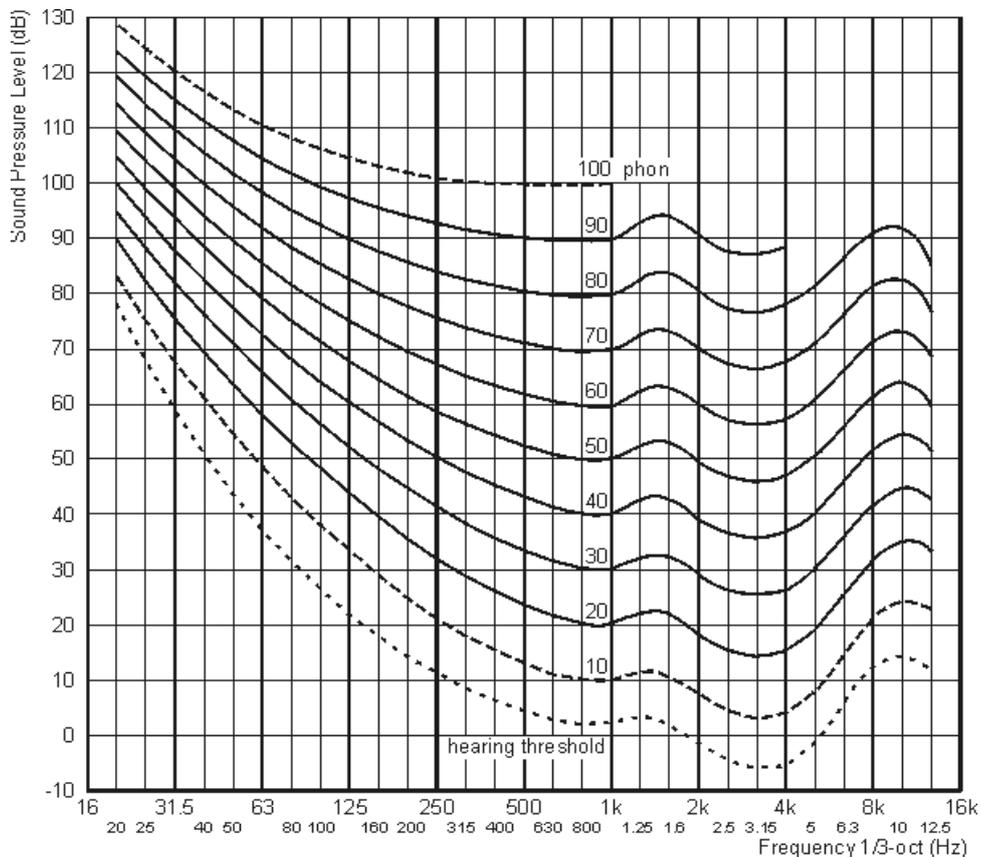


Figura I3. Curvas de igual sonoridad (ISO 226).

ARMONICO	f (Hz)	Nivel de Sonoridad NS (fon) (Según curvas isofónicas ISO 226)			
		Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	246,942	75,000	26,000	0,000	75,000
2°	493,884	55,000	45,000	79,000	17,000
3°	740,826	3,000	57,000	25,000	18,000
4°	987,768	19,000	80,000	3,000	5,000
5°	1234,710	0,000	58,000	1,000	15,000
6°	1481,652	2,000	0,000	0,000	5,000
7°	1728,594	10,000	16,000	0,000	4,000
8°	1975,536	6,000	3,000	2,000	5,500
9°	2222,478	14,000	6,000	3,000	5,000
10°	2469,420	7,000	12,000	0,000	5,000
11°	2716,362	7,000	10,000	0,000	5,000
12°	2963,304	8,000	12,000	0,000	6,000
13°	3210,246	8,000	9,000	0,000	6,000
14°	3457,188	6,000	7,000	0,000	6,000
15°	3704,130	7,000	10,000	0,000	0,000
16°	3951,072	7,000	8,000	0,000	0,000

Tabla I4. Niveles de sonoridad corregidos según curvas de igual sonoridad (ISO 226).

Los niveles de sonoridad obtenidos son aún una magnitud *psicofísica* y es necesario obtener la **sensación de sonoridad**, o simplemente *sonoridad*, S (loudness, L)

Para $NS > 40$ fon :

$$S = 2^{(NS-40)/10}$$

Para $NS < 40$ fon :

$$S = 6,901 \times 10^{-5} (NS-2)^{2,634}$$

ARMONICO	f (Hz)	Sensación de Sonoridad S (son)			
		Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	246,942	11,314	0,298	0,000	11,314
2°	493,884	2,828	1,414	14,929	0,086
3°	740,826	0,000	3,249	2,665	0,102
4°	987,768	0,120	16,000	0,000	0,001
5°	1234,710	0,000	3,482	0,000	0,059
6°	1481,652	0,000	0,000	0,000	0,001
7°	1728,594	0,017	0,072	0,000	0,000
8°	1975,536	0,003	0,000	0,000	0,002
9°	2222,478	0,048	0,003	0,000	0,001
10°	2469,420	0,005	0,030	0,000	0,001
11°	2716,362	0,005	0,017	0,000	0,001
12°	2963,304	0,008	0,030	0,000	0,003
13°	3210,246	0,008	0,012	0,000	0,003
14°	3457,188	0,003	0,005	0,000	0,003
15°	3704,130	0,005	0,017	0,000	0,000
16°	3951,072	0,005	0,008	0,000	0,000

Tabla I5. Valores de Sensación de Sonoridad de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Con los valores de los niveles de **sensaciones de sonoridad** de los armónicos se obtienen las **envolventes de armónicos**.

Sensación de Sonoridad B3 (Si)

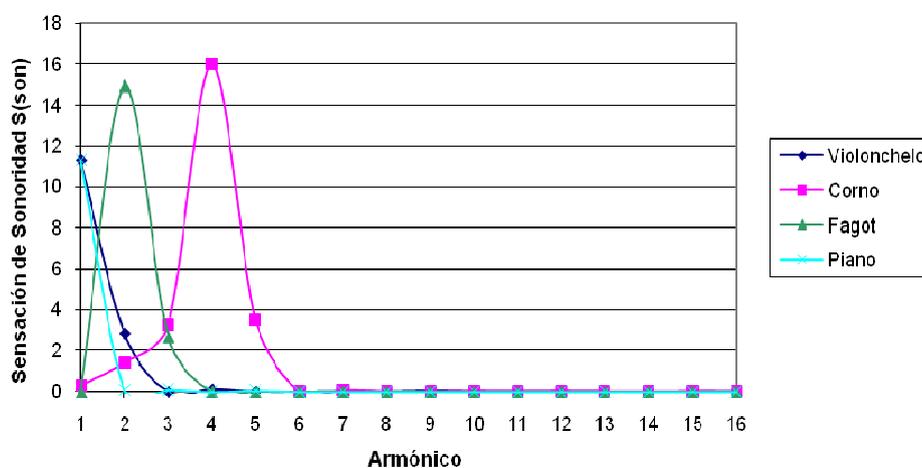


Figura I4. Envolventes de niveles de sensación de sonoridad de armónicos de B3.

Evaluación matemática de la sonoridad

Teniendo en cuenta la *sensación de sonoridad* (S_i) de cada armónico y su valor de importancia (Anexo F) se obtiene la *sonoridad valorada* ($\sum S_i \cdot v_i$) para cada instrumento.

ARMONICO	Desviación (%)	Valor import. v_i	S • v_i			
			Violonchelo	Corno	Fagot	Piano
1°	0	5	56,569	1,491	0,000	56,569
2°	0	4	11,314	5,657	59,714	0,346
3°	0,11	-1	0,000	-3,249	-2,665	-0,102
4°	0	3	0,361	48,000	0,000	0,004
5°	0,79	-2	0,000	-6,964	0,000	-0,119
6°	0,11	-1	0,000	0,000	0,000	-0,001
7°	4,06	-7	-0,116	-0,505	0,000	-0,003
8°	0	2	0,005	0,000	0,000	0,004
9°	0,23	-3	-0,144	-0,008	0,000	-0,004
10°	0,79	-2	-0,010	-0,059	0,000	-0,002
11°	3,01	-5	-0,024	-0,083	0,000	-0,006
12°	0,11	-1	-0,008	-0,030	0,000	-0,003
13°	3,38	-6	-0,046	-0,070	0,000	-0,016
14°	4,06	-7	-0,019	-0,034	0,000	-0,019
15°	0,68	-4	-0,019	-0,066	0,000	0,000
16°	0	1	0,005	0,008	0,000	0,000
		$\sum S \cdot v_i =$	67,868	44,089	57,049	56,647

Tabla I6. Sonoridades valoradas de armónicos de B3. Violonchelo, corno, fagot y piano.

Orden de pureza
 1° Violonchelo
 2° Fagot
 3° Piano
 4° Corno

ANEXO J

Conversión entre espacios de color

RGB → HSI

La transformación de valores RGB para el matiz **H** se realiza mediante la siguiente expresión:

$$H = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2} [(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right]$$

Cuando $B > G$, entonces $H = 360^\circ - H$.

El valor del matiz es un número entero entre 0 y 360°.

El cálculo de la variable de saturación **S** se lleva a cabo mediante la siguiente expresión:

$$S = 1 - 3 \frac{\min(R, G, B)}{R + G + B}$$

Al igual que para la saturación, la intensidad **I** es una magnitud fácilmente deducible de los valores RGB:

$$I = \frac{R + G + B}{3}$$

Para el cálculo de **H**, **S** o **I**, los valores RGB deben estar en rango [0,1] y no en rango [0,255].

RGB → HLS

La obtención del valor del matiz **H** para el modelo HLS es igual que para el HSI
La luminancia **L** se calcula por la expresión:

$$L = \frac{\max(R, G, B) + \min(R, G, B)}{2}$$

El cálculo de la saturación **S** para el modelo HLS se deduce a partir de las siguientes fórmulas:

$$\text{si } \max(R, G, B) = \min(R, G, B) \text{ entonces } S = 0$$

(Esto ocurre cuando R=G=B; entonces se tiene un valor cromático. Solo están los grises.)

Si uno de los valores (R,G ó B) es máximo [1] → S = 1

Si uno de los valores (R,G ó B) es mínimo [0] → S = 1

Si $L \leq 0,5$ entonces S se calcula según:

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B) + \min(R, G, B)}$$

Si $L > 0,5$ entonces S se calcula según:

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{2 - \max(R, G, B) - \min(R, G, B)}$$

Para el cálculo de **H**, **L**, o **S**, los valores RGB deben estar en rango [0,1] y no en rango [0,255].

ANEXO K

Colores Munsell utilizados en test de ordenación de tonos.

Los tonos utilizados en los test de ordenación de tonos para evaluar la visión del color cubren toda la región visible y representados en el diagrama cromático forman un círculo o una elipse (ordenación que haría un observador con visión del color normal).

Entre los test de ordenación de tonos más utilizados en la actualidad para clasificar a las personas con visión normal, con anomalías moderadas o con anomalías severas en la visión del color, se encuentra el D15 y el H16. El D15 está formado por muestras de color de valores Munsell correspondientes a un *value* de 5 y a un *chroma* de 4. El H16 es similar al D15, pero contiene colores Munsell con un *value* de 5 y un *chroma* de 6 u 8. [33]

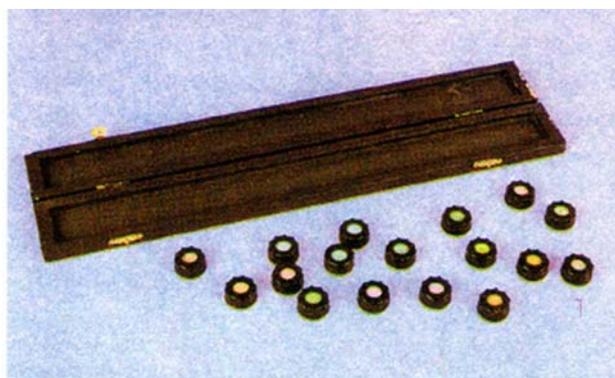


Figura K1. Test de ordenación de colores D-15. [33]

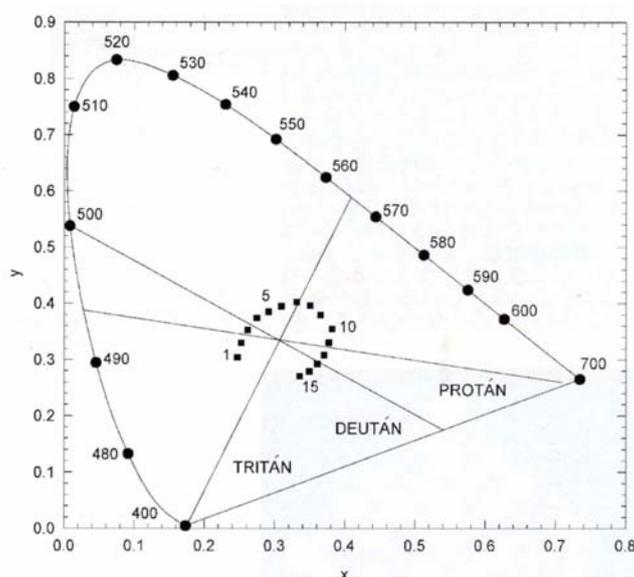


Figura K2. Coordenadas cromáticas de los colores Munsell utilizados en el test D-15. [33]

ANEXO L

Tabla de valores Notas-Color para Munsell V5-C6

Sonido	SONIDO		COLOR										
	Sonido f (Hz)	Sonido λ_m (m)	Color λ_c (nm)	Color R, G, B			(datos ajustados) Munsell			(datos corregidos) R,G,B			
				Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B	
A2	110,000	3,091	659	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	7.50R	5	6	170	104	96
C3	130,813	2,599	647	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	8.00R	5	6	170	105	93
C3#	138,591	2,453	643	255,16,0	8.00R	5,18	20,38						
D3	146,832	2,316	638	255,38,0	8.22R	5,28	19,79						
D3#	155,563	2,186	634	255,62,0	8.82R	5,49	18,63						
E3	164,814	2,063	630	255,79,0	9.53R	5,70	17,37	9.50R	5	6	170	105	88
F3	174,614	1,947	626	255,95,0	0.57YR	5,94	16,48						
F3#	184,997	1,838	622	255,111,0	1.99YR	6,23	15,65	2.00YR	5	6	168	107	81
G3	195,998	1,735	618	255,126,0	3.63YR	6,52	14,74	3.50YR	5	6	166	108	76
G3#	207,652	1,637	613	255,145,0	6.01YR	6,92	13,82	6.00YR	5	6	163	110	69
A3	220,000	1,545	609	255,159,0	8.00YR	7,24	13,35						
A3#	233,082	1,459	605	255,173,0	0.06Y	7,57	12,91						
B3	246,942	1,377	601	255,187,0	2.18Y	7,90	12,68	2.00Y	5	6	150	117	53
C4	261,626	1,300	597	255,200,0	3.84Y	8,23	12,50	4.00Y	5	6	145	119	49
C4#	277,183	1,227	593	255,213,0	5.52Y	8,55	12,44						
D4	293,665	1,158	588	255,230,0	8.47Y	8,98	12,62	8.50Y	5	6	132	123	46
D4#	311,127	1,093	584	255,242,0	0.36GY	9,29	12,88						
E4	329,628	1,031	580	255,255,0	1.75GY	9,61	13,26						
F4	349,228	0,974	576	243,255,0	3.02GY	9,53	13,34						
F4#	369,994	0,919	572	231,255,0	4.26GY	9,44	13,60	4.50GY	5	6	112	129	58
G4	391,995	0,867	568	219,255,0	5.20GY	9,36	13,90						
G4#	415,305	0,819	563	204,255,0	5.89GY	9,26	14,42						
A4	440,000	0,773	559	192,255,0	6.39GY	9,19	14,78	6.50GY	5	6	102	131	66
A4#	466,164	0,729	555	182,255,0	6.79GY	9,14	15,05						
B4	493,883	0,688	551	166,255,0	7.40GY	9,05	15,39						
C5	523,251	0,650	547	153,255,0	7.86GY	8,99	15,90	7.50GY	5	6	96	132	71
C5#	554,365	0,613	543	140,255,0	8.25GY	8,93	16,52	8.00GY	5	6	94	132	73
D5	587,330	0,579	538	123,255,0	8.69GY	8,86	17,23						
D5#	622,254	0,546	534	108,255,0	9.01GY	8,81	17,76						
E5	659,255	0,516	530	94,255,0	9.25GY	8,77	18,21	9.00GY	5	6	89	133	78
F5	698,456	0,487	526	78,255,0	9.47GY	8,73	18,64						
F5#	739,989	0,459	522	62,255,0	9.65GY	8,70	18,96	9.50GY	5	6	87	133	80
G5	783,991	0,434	518	45,255,0	9.78GY	8,68	19,21						
G5#	830,609	0,409	513	21,255,0	9.89GY	8,66	19,40	10.00GY	5	6	85	134	82
A5	880,000	0,386	509	0,255,23	9.96GY	8,66	19,28						
A5#	932,328	0,365	505	0,255,84	0.74G	8,69	17,60						
B5	987,767	0,344	501	0,255,135	2.18G	8,74	15,19	2.00G	5	6	74	135	93
C6	1046,502	0,325	497	0,255,181	4.57G	8,82	12,78	4.50G	5	6	63	135	102
C6#	1108,731	0,307	493	0,255,224	0.98BG	8,92	10,92						
D6	1174,659	0,289	488	0,247,255	7.55BG	8,77	9,68	7.50BG	5	6	33	135	135

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

D6#	1244,508	0,273	484	0,230,255	0.64B	8,28	9,36	0.50B	5	6	32	134	144
E6	1318,510	0,258	480	0,213,255	3.45B	7,78	9,31						
F6	1396,913	0,243	476	0,196,255	6.44B	7,28	9,69						
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6,76	10,80	10.00B	5	6	73	128	159
G6	1567,982	0,217	468	0,160,255	2.46PB	6,24	12,29						
G6#	1661,219	0,205	463	0,137,255	5.35PB	5,58	14,63						
A6	1760,000	0,193	459	0,118,255	6.26PB	5,06	17,07						
A6#	1864,655	0,182	455	0,97,255	6.80PB	4,52	19,57	6.50PB	5	6	105	121	162
B6	1975,533	0,172	451	0,76,255	7.01PB	4,03	22,31						
C7	2093,005	0,162	447	0,53,255	7.05PB	3,58	25,28	7.00PB	5	6	108	120	162
C7#	2217,461	0,153	443	0,27,255	8.82R	3,25	19,82	7.50PB	5	6	111	119	162
D7	2349,318	0,145	438	17,0,255	6.81RP	3,16	23,37						
D7#	2489,016	0,137	434	40,0,255	5.08R	3,22	21,14						
E7	2637,020	0,129	430	61,0,255	7.50PB	3,33	27,58	8.50PB	5	6	113	119	161
F7	2793,826	0,122	426	80,0,255	8.08PB	3,48	27,26						
F7#	2959,955	0,115	422	97,0,255	8.78PB	3,63	27,06	9.00PB	5	6	118	118	161
G7	3135,963	0,108	418	111,0,248	9.58PB	3,71	26,13						
G7#	3322,438	0,102	413	121,0,230	0.60P	3,66	24,16						
A7	3520,000	0,097	409	127,0,215	1.55P	3,60	22,66						
A7#	3729,310	0,091	405	130,0,200	2.48P	3,51	21,09						
B7	3951,066	0,086	401	131,0,185	3.60P	3,40	19,51						
C8	4186,009	0,081	397	129,0,169	4.71P	3,24	17,84	5.00P	5	6	136	112	154

ANEXO M

Tabla de valores Notas-Color para Munsell V6-C7

Sonido	SONIDO		COLOR										
	Sonido	Sonido	Color Color			(datos ajustados)			(datos corregidos)				
	f (Hz)	λ_m (m)	λ_c (nm)	R, G, B	Munsell			Munsell			R,G,B		
					Hue	Value	Chroma	Hue	Value	Chroma	R	G	B
A2	110,000	3,091	659	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	7.50R	6	7	204	127	117
C3	130,813	2,599	647	255,0,0	7.96R	5,16	20,47	8.00R	6	7	204	127	113
C3#	138,591	2,453	643	255,16,0	8.00R	5,18	20,38						
D3	146,832	2,316	638	255,38,0	8.22R	5,28	19,79						
D3#	155,563	2,186	634	255,62,0	8.82R	5,49	18,63						
E3	164,814	2,063	630	255,79,0	9.53R	5,70	17,37	9.50R	6	7	204	128	107
F3	174,614	1,947	626	255,95,0	0.57YR	5,94	16,48						
F3#	184,997	1,838	622	255,111,0	1.99YR	6,23	15,65	2.00YR	6	7	202	130	98
G3	195,998	1,735	618	255,126,0	3.63YR	6,52	14,74	3.50YR	6	7	200	131	92
G3#	207,652	1,637	613	255,145,0	6.01YR	6,92	13,82	6.00YR	6	7	196	134	83
A3	220,000	1,545	609	255,159,0	8.00YR	7,24	13,35						
A3#	233,082	1,459	605	255,173,0	0.06Y	7,57	12,91						
B3	246,942	1,377	601	255,187,0	2.18Y	7,90	12,68	2.00Y	6	7	181	142	65
C4	261,626	1,300	597	255,200,0	3.84Y	8,23	12,50	4.00Y	6	7	174	144	60
C4#	277,183	1,227	593	255,213,0	5.52Y	8,55	12,44						
D4	293,665	1,158	588	255,230,0	8.47Y	8,98	12,62	8.50Y	6	7	160	149	55
D4#	311,127	1,093	584	255,242,0	0.36GY	9,29	12,88						
E4	329,628	1,031	580	255,255,0	1.75GY	9,61	13,26						
F4	349,228	0,974	576	243,255,0	3.02GY	9,53	13,34						
F4#	369,994	0,919	572	231,255,0	4.26GY	9,44	13,60	4.50GY	6	7	136	156	67
G4	391,995	0,867	568	219,255,0	5.20GY	9,36	13,90						
G4#	415,305	0,819	563	204,255,0	5.89GY	9,26	14,42						
A4	440,000	0,773	559	192,255,0	6.39GY	9,19	14,78	6.50GY	6	7	124	159	77
A4#	466,164	0,729	555	182,255,0	6.79GY	9,14	15,05						
B4	493,883	0,688	551	166,255,0	7.40GY	9,05	15,39						
C5	523,251	0,650	547	153,255,0	7.86GY	8,99	15,90	7.50GY	6	7	116	160	83
C5#	554,365	0,613	543	140,255,0	8.25GY	8,93	16,52	8.00GY	6	7	114	160	85
D5	587,330	0,579	538	123,255,0	8.69GY	8,86	17,23						
D5#	622,254	0,546	534	108,255,0	9.01GY	8,81	17,76						
E5	659,255	0,516	530	94,255,0	9.25GY	8,77	18,21	9.00GY	6	7	108	161	91
F5	698,456	0,487	526	78,255,0	9.47GY	8,73	18,64						
F5#	739,989	0,459	522	62,255,0	9.65GY	8,70	18,96	9.50GY	6	7	104	162	94
G5	783,991	0,434	518	45,255,0	9.78GY	8,68	19,21						
G5#	830,609	0,409	513	21,255,0	9.89GY	8,66	19,40	10.00GY	6	7	101	162	96
A5	880,000	0,386	509	0,255,23	9.96GY	8,66	19,28						
A5#	932,328	0,365	505	0,255,84	0.74G	8,69	17,60						
B5	987,767	0,344	501	0,255,135	2.18G	8,74	15,19	2.00G	6	7	87	163	110
C6	1046,502	0,325	497	0,255,181	4.57G	8,82	12,78	4.50G	6	7	74	164	122
C6#	1108,731	0,307	493	0,255,224	0.98BG	8,92	10,92						
D6	1174,659	0,289	488	0,247,255	7.55BG	8,77	9,68	7.50BG	6	7	30	164	163
D6#	1244,508	0,273	484	0,230,255	0.64B	8,28	9,36	0.50B	6	7	30	163	173

COLOR Y MÚSICA: RELACIONES FÍSICAS Y PSICOLÓGICAS ENTRE EL COLOR Y EL SONIDO

E6	1318,510	0,258	480	0,213,255	3.45B	7,78	9,31						
F6	1396,913	0,243	476	0,196,255	6.44B	7,28	9,69						
F6#	1479,978	0,230	472	0,178,255	9.86B	6,76	10,80	10.00B	6	7	87	155	192
G6	1567,982	0,217	468	0,160,255	2.46PB	6,24	12,29						
G6#	1661,219	0,205	463	0,137,255	5.35PB	5,58	14,63						
A6	1760,000	0,193	459	0,118,255	6.26PB	5,06	17,07						
A6#	1864,655	0,182	455	0,97,255	6.80PB	4,52	19,57	6.50PB	6	7	127	147	195
B6	1975,533	0,172	451	0,76,255	7.01PB	4,03	22,31						
C7	2093,005	0,162	447	0,53,255	7.05PB	3,58	25,28	7.00PB	6	7	130	146	195
C7#	2217,461	0,153	443	0,27,255	8.82R	3,25	19,82	7.50PB	6	7	134	145	194
D7	2349,318	0,145	438	17,0,255	6.81RP	3,16	23,37						
D7#	2489,016	0,137	434	40,0,255	5.08R	3,22	21,14						
E7	2637,020	0,129	430	61,0,255	7.50PB	3,33	27,58	8.50PB	6	7	136	144	194
F7	2793,826	0,122	426	80,0,255	8.08PB	3,48	27,26						
F7#	2959,955	0,115	422	97,0,255	8.78PB	3,63	27,06	9.00PB	6	7	141	143	193
G7	3135,963	0,108	418	111,0,248	9.58PB	3,71	26,13						
G7#	3322,438	0,102	413	121,0,230	0.60P	3,66	24,16						
A7	3520,000	0,097	409	127,0,215	1.55P	3,60	22,66						
A7#	3729,310	0,091	405	130,0,200	2.48P	3,51	21,09						
B7	3951,066	0,086	401	131,0,185	3.60P	3,40	19,51						
C8	4186,009	0,081	397	129,0,169	4.71P	3,24	17,84	5.00P	6	7	165	136	184

ANEXO N

Partitura tema musical "Llagosta"....

LLAGOSTA

Remarks

Ximo Pérez

The first system of musical notation consists of two staves. The upper staff is in treble clef with a key signature of one flat (B-flat) and a 3/4 time signature. It contains five measures of music: a whole rest, followed by quarter notes G4, A4, Bb4, and C5, then quarter notes Bb4, A4, G4, and F4, then quarter notes E4, D4, C4, and B3, then quarter notes A3, G3, F3, and E3, and finally a whole rest. The lower staff, labeled 'Voz', is in treble clef and contains five measures: a whole rest, quarter notes G4, A4, Bb4, and C5, a whole rest, quarter notes Bb4, A4, G4, and F4, quarter notes E4, D4, C4, and B3, quarter notes A3, G3, F3, and E3, and a whole rest.

The second system of musical notation consists of two staves. The upper staff continues from the first system with four measures: quarter notes D4, C4, B3, and A3, quarter notes G3, F3, E3, and D3, quarter notes C3, B2, A2, and G2, and quarter notes F2, E2, D2, and C2. The lower staff, labeled 'Voz', continues with four measures: quarter notes G4, A4, Bb4, and C5, a whole rest, quarter notes Bb4, A4, G4, and F4, quarter notes E4, D4, C4, and B3, and a whole rest.

The third system of musical notation consists of two staves. The upper staff contains five measures: quarter notes B2, A2, G2, and F2, quarter notes E2, D2, C2, and B1, quarter notes A1, G1, F1, and E1, quarter notes D1, C1, B0, and A0, and a whole rest. The lower staff, labeled 'Voz', contains five measures: quarter notes G4, A4, Bb4, and C5, quarter notes Bb4, A4, G4, and F4, quarter notes E4, D4, C4, and B3, quarter notes A3, G3, F3, and E3, and a whole rest.

ANEXO O

Partitura 9ª Sinfonía en SibM. Composición para 5 tonalidades RGB

9ª Sinfonía en SibM

Composición para 5 tonalidades RGB

Beethoven

9ª Sinfonía en SibM

First system of musical notation, measures 25-28. The system consists of two staves (treble and bass clef) with a brace on the left. The music features a series of chords in the right hand and single notes in the left hand. Measure numbers 25, 26, 27, and 28 are indicated in small boxes at the beginning of each measure.

Second system of musical notation, measures 29-32. Similar to the first system, it shows two staves with chords and notes. Measure numbers 29, 30, 31, and 32 are indicated in small boxes at the beginning of each measure.

Third system of musical notation, measures 33-36. The right-hand staff contains a series of chords, while the left-hand staff contains single notes. Measure numbers 33, 34, 35, and 36 are indicated in small boxes at the beginning of each measure.

Fourth system of musical notation, measures 37-40. The right-hand staff contains a series of chords, while the left-hand staff contains single notes. Measure numbers 37, 38, 39, and 40 are indicated in small boxes at the beginning of each measure.

ANEXO P

Datos obtenidos sobre cuestión 1ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c01a	c01b	c01c
1	Europa	hombre	45	oyente	observador	CH	3	49
2	Europa	mujer	51	interprete	observador	CH	3	49
3	Europa	hombre	40	oyente	observador	CH	3	49
4	Europa	hombre	35	interprete	observador	GH	3	49
5	Europa	hombre	65	oyente	observador	CH	3	49
6	Europa	hombre	50	oyente	observador	ch	3	49
7	Europa	hombre	48	compositor	creador	CH	3	49
8	Europa	hombre	41	compositor	creador	CH	3	49
9	Europa	hombre	45	oyente	creador	CH	3	49
10	Europa	hombre	40	oyente	creador	ch	3	49
11	Europa	hombre	34	compositor	observador	CH	3	49
12	Europa	mujer	34	interprete	observador	CH	3	49
13	Europa	hombre	74	oyente	observador	OH	8	
14	Europa	mujer	50	oyente	observador	CH	3	49
15	Europa	hombre	60	oyente	observador	31	8	49
16	Europa	hombre	23	oyente	observador	CH	3	49
17	Europa	hombre	42	oyente	observador	CH	3	49
18	Europa	hombre	54	oyente	observador	CH		49
19	Europa	hombre	46	oyente	observador	CH	3	49
20	Europa	hombre	33	interprete	observador	ch	3	49
21	Europa	hombre	67	oyente	observador	ch	3	49
22	Europa	hombre	63	oyente	observador	CH	3	49
23	Europa	hombre	58	oyente	observador	ch	3	49
24	Europa	hombre	50	oyente	observador	CH	3	49
25	Europa	hombre	50	oyente	observador	CH	3	49
26	Europa	hombre	50	oyente	observador	ch	3	49
27	Europa	hombre	53	oyente	observador	CH	3	49
28	Europa	mujer	52	oyente	observador	CH	3	49
29	Europa	¿?	0			ch	3	49
30	Europa	hombre	36	oyente	observador	CH	3	49
31	Europa	hombre	58	oyente	observador	CH	3	69
32	Europa	hombre	42	oyente	observador	CH	3	49
33	Europa	hombre	40	oyente	observador	CH	3	49
34	Europa	hombre	43	interprete	observador	CH	3	49
35	Europa	hombre	47	oyente	observador	CH	3	49
36	Europa	hombre	57	oyente	observador	ch	b	48
37	Europa	hombre	65	oyente	observador	ch	3	49
38	Europa	mujer	31	oyente	copista	CH	3	49
39	Europa	mujer	52			C H	3	49
40	Europa	hombre	62	compositor	observador	CH	3	49
41	Europa	hombre	58	oyente	observador	Ch	3	49
42	Europa	hombre	68	oyente	observador	CH	3	49
43	Europa	hombre	54	oyente	observador	CH	3	49
44	Europa	hombre	58	oyente	observador	CH	3	69
45	Europa	hombre	57	oyente	observador	CH	3	49

Datos obtenidos sobre cuestión 1ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos (CONTINUACIÓN)

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c01a	c01b	c01c
46	Europa	hombre	57	oyente	observador	CH	3	49
47	Europa	hombre	61	oyente	observador	CH	3	49
48	Europa	hombre	65	oyente	observador	CH	3	49
49	Europa	hombre	44	oyente	observador	CH	3	49
50	Europa	hombre	31	oyente	creador	CH	3	49
51	Europa	hombre	49	interprete	observador	CH	3	49
52	Europa	hombre	37	oyente	copista	CH	3	49
53	Europa	hombre	50	oyente	observador	3H	3	49
54	Europa	hombre	64	oyente	observador	CH	3	49
55	Europa	mujer	39	oyente	observador	CH	3	49
56	Europa	hombre	50	oyente	observador	CH	3	49
57	Europa	hombre	38	oyente	observador	ch	3	49
58	Europa	hombre	37	oyente	observador	34	3	49
59	Europa	hombre	59	oyente	observador	CH	3	49
60	Europa	hombre	60	oyente	observador	CH	3	49
61	Europa	hombre	42	oyente	creador	CH	3	69
62	Europa	hombre	58	oyente	observador	ch	3	49
63	Europa	hombre	45	oyente	observador	CH	3	49
64	Europa	hombre	58	oyente	observador	ch	3	49
65	Europa	hombre	64	oyente	observador	CH	3	49
66	Europa	hombre	52	oyente	observador	ch	3	49
67	Europa	hombre	49	oyente	observador	CH	3	49
68	Europa	hombre	51	oyente	observador	CH	3	49
69	Europa	mujer	59	oyente	observador	CH	3	2
70	Europa	hombre	42	oyente	observador	CH	3	49
71	Europa	hombre	30	oyente	observador	CH	3	49
72	Europa	hombre	64	oyente	observador	CH	3	49
73	Europa	mujer	58	oyente	observador	CH	3	49
74	Europa	mujer	27	oyente	observador	ch	3	40
75	Europa	hombre	32	interprete	creador	CH	3	49
76	Europa	hombre	58	oyente	observador	CH	3	9
77	Europa	hombre	38	oyente	observador	C H	3	h 9
78	Europa	hombre	13	interprete	observador	CH	3	49
79	Europa	hombre	53	compositor	observador	CH	3	49
80	Europa	hombre	31	oyente	observador	ch	8	49
81	Europa	hombre	43	oyente	observador	ch	3	49
82	Europa	hombre	60	oyente	observador	CH	3	49
83	Europa	hombre	34	interprete	observador	ch	3	49
84	Europa	hombre	35	interprete	observador	ch	3	49
85	Europa	hombre	41	oyente	observador	ch	3	49
86	Sudamerica	hombre	31	compositor	observador	CH	3	49
87	Europa	hombre	62	oyente	observador	ch	3	49
88	Europa	hombre	27	oyente	observador	CH	3	49
89	Europa	hombre	22	oyente	observador	CH	8	49
90	Europa	hombre	25	interprete	observador	CH	B	69
91	Europa	hombre	59	oyente	observador	ch	3	49
92	Europa	hombre	38	interprete	observador	CH	3	49
93	Europa	hombre	53	interprete	observador	CH	3	49

ANEXO Q

Datos obtenidos sobre cuestiones 2ª y 3ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c02	c03
1	Europa	hombre	45	oyente	observador	0	0
2	Europa	mujer	51	interprete	observador	1	1
3	Europa	hombre	40	oyente	observador	0	0
4	Europa	hombre	35	interprete	observador	0	1
5	Europa	hombre	65	oyente	observador	1	0
6	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1
7	Europa	hombre	48	compositor	creador	0	1
8	Europa	hombre	41	compositor	creador	1	1
9	Europa	hombre	45	oyente	creador	1	1
10	Europa	hombre	40	oyente	creador	1	1
11	Europa	hombre	34	compositor	observador	0	0
12	Europa	mujer	34	interprete	observador	1	1
13	Europa	hombre	74	oyente	observador	1	1
14	Europa	mujer	50	oyente	observador	1	1
15	Europa	hombre	60	oyente	observador	1	1
16	Europa	hombre	23	oyente	observador	1	1
17	Europa	hombre	42	oyente	observador	1	1
18	Europa	hombre	54	oyente	observador	1	1
19	Europa	hombre	46	oyente	observador	1	1
20	Europa	hombre	33	interprete	observador	1	1
21	Europa	hombre	67	oyente	observador	1	1
22	Europa	hombre	63	oyente	observador	1	1
23	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0
24	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1
25	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	0
26	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1
27	Europa	hombre	53	oyente	observador	1	0
28	Europa	mujer	52	oyente	observador	1	1
29	Europa	¿?	0			0	0
30	Europa	hombre	36	oyente	observador	1	1
31	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	0
32	Europa	hombre	42	oyente	observador	0	0
33	Europa	hombre	40	oyente	observador	1	1
34	Europa	hombre	43	interprete	observador	1	1
35	Europa	hombre	47	oyente	observador	1	1
36	Europa	hombre	57	oyente	observador	1	0
37	Europa	hombre	65	oyente	observador	0	0
38	Europa	mujer	31	oyente	copista	0	0
39	Europa	mujer	52			1	0
40	Europa	hombre	62	compositor	observador	0	1
41	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	1
42	Europa	hombre	68	oyente	observador	1	1
43	Europa	hombre	54	oyente	observador	1	0
44	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	1
45	Europa	hombre	57	oyente	observador	0	1

Datos obtenidos sobre cuestiones 2ª y 3ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos (CONTINUACIÓN)

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c02	c03
46	Europa	hombre	57	oyente	observador	0	1
47	Europa	hombre	61	oyente	observador	1	0
48	Europa	hombre	65	oyente	observador	1	1
49	Europa	hombre	44	oyente	observador	1	1
50	Europa	hombre	31	oyente	creador	1	1
51	Europa	hombre	49	interprete	observador	0	1
52	Europa	hombre	37	oyente	copista	0	1
53	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1
54	Europa	hombre	64	oyente	observador	1	0
55	Europa	mujer	39	oyente	observador	0	0
56	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1
57	Europa	hombre	38	oyente	observador	0	0
58	Europa	hombre	37	oyente	observador	1	1
59	Europa	hombre	59	oyente	observador	1	1
60	Europa	hombre	60	oyente	observador	1	1
61	Europa	hombre	42	oyente	creador	1	1
62	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0
63	Europa	hombre	45	oyente	observador	0	1
64	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	0
65	Europa	hombre	64	oyente	observador	0	1
66	Europa	hombre	52	oyente	observador	0	0
67	Europa	hombre	49	oyente	observador	1	1
68	Europa	hombre	51	oyente	observador	1	1
69	Europa	mujer	59	oyente	observador	1	0
70	Europa	hombre	42	oyente	observador	0	0
71	Europa	hombre	30	oyente	observador	1	1
72	Europa	hombre	64	oyente	observador	0	1
73	Europa	mujer	58	oyente	observador	1	0
74	Europa	mujer	27	oyente	observador	1	1
75	Europa	hombre	32	interprete	creador	1	1
76	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	0
77	Europa	hombre	38	oyente	observador	0	1
78	Europa	hombre	13	interprete	observador	1	0
79	Europa	hombre	53	compositor	observador	1	1
80	Europa	hombre	31	oyente	observador	1	1
81	Europa	hombre	43	oyente	observador	0	1
82	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	1
83	Europa	hombre	34	interprete	observador	1	0
84	Europa	hombre	35	interprete	observador	0	0
85	Europa	hombre	41	oyente	observador	1	1
86	Sudamerica	hombre	31	compositor	observador	0	0
87	Europa	hombre	62	oyente	observador	0	1
88	Europa	hombre	27	oyente	observador	1	1
89	Europa	hombre	22	oyente	observador	0	1
90	Europa	hombre	25	interprete	observador	1	1
91	Europa	hombre	59	oyente	observador	0	1
92	Europa	hombre	38	interprete	observador	1	1
93	Europa	hombre	53	interprete	observador	1	1
						62	63

ANEXO R

Datos obtenidos sobre cuestiones 4^a a 11^a de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c04	c05	c06	c07	c08	c09	c10	c11
1	Europa	hombre	45	oyente	observador	0	0	1	1	0	0	0	0
2	Europa	mujer	51	interprete	observador	0	1	1	1	1	1	1	1
3	Europa	hombre	40	oyente	observador	1	1	0	1	0	1	0	0
4	Europa	hombre	35	interprete	observador	1	0	1	1	1	1	0	0
5	Europa	hombre	65	oyente	observador	1	1	0	0	1	0	1	1
6	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Europa	hombre	48	compositor	creador	1	1	0	0	1	0	0	0
8	Europa	hombre	41	compositor	creador	0	0	0	0	1	0	0	0
9	Europa	hombre	45	oyente	creador	1	0	1	1	1	1	1	1
10	Europa	hombre	40	oyente	creador	1	1	1	0	1	1	1	1
11	Europa	hombre	34	compositor	observador	0	1	0	0	0	1	1	1
12	Europa	mujer	34	interprete	observador	1	1	1	1	1	1	1	1
13	Europa	hombre	74	oyente	observador	1	0	1	1	1	1	1	1
14	Europa	mujer	50	oyente	observador	1	1	1	0	0	1	0	0
15	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	0	0	0	1	0	0	0
16	Europa	hombre	23	oyente	observador	1	1	0	1	1	1	0	1
17	Europa	hombre	42	oyente	observador	1	0	0	0	0	1	1	1
18	Europa	hombre	54	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1	0
19	Europa	hombre	46	oyente	observador	0	1	1	1	1	1	1	1
20	Europa	hombre	33	interprete	observador	0	0	0	0	1	1	1	0
21	Europa	hombre	67	oyente	observador	1	1	0	0	1	1	1	1
22	Europa	hombre	63	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1	1
23	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	0	1	1	0	0	0
24	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	0	0	0	0	0	0	0
25	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	1	1	1	1	1	0	0
26	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	1	0	0	0	0	0
27	Europa	hombre	53	oyente	observador	0	1	1	1	0	0	0	0
28	Europa	mujer	52	oyente	observador	1	0	1	0	0	1	0	0
29	Europa	¿?	0			1	1	1	1	1	1	0	0
30	Europa	hombre	36	oyente	observador	1	0	1	1	1	1	1	1
31	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	1	1	1	1	0	1
32	Europa	hombre	42	oyente	observador	1	0	1	0	0	0	0	0
33	Europa	hombre	40	oyente	observador	1	1	1	0	1	0	0	1
34	Europa	hombre	43	interprete	observador	0	1	0	1	0	1	0	0
35	Europa	hombre	47	oyente	observador	1	0	0	0	0	0	0	0
36	Europa	hombre	57	oyente	observador	1	1	1	1	0	0	0	1
37	Europa	hombre	65	oyente	observador	0	1	1	0	1	0	0	0
38	Europa	mujer	31	oyente	copista	0	0	1	1	1	0	0	0
39	Europa	mujer	52			1	0	0	1	0	1	1	1
40	Europa	hombre	62	compositor	observador	1	0	0	0	1	0	0	1
41	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	0	0	1	0	0	1
42	Europa	hombre	68	oyente	observador	1	1	1	1	0	1	0	0
43	Europa	hombre	54	oyente	observador	1	1	0	1	1	1	0	1
44	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	0	1
45	Europa	hombre	57	oyente	observador	0	1	1	1	1	1	0	0

Datos obtenidos sobre cuestiones 4ª a 11ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos (CONTINUACIÓN)

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c04	c05	c06	c07	c08	c09	c10	c11
46	Europa	hombre	57	oyente	observador	0	0	0	1	0	0	0	0
47	Europa	hombre	61	oyente	observador	1	0	0	1	0	0	1	1
48	Europa	hombre	65	oyente	observador	0	0	1	1	1	1	1	1
49	Europa	hombre	44	oyente	observador	1	1	0	1	1	1	1	1
50	Europa	hombre	31	oyente	creador	0	1	0	1	0	1	1	1
51	Europa	hombre	49	interprete	observador	1	0	0	0	0	1	0	0
52	Europa	hombre	37	oyente	copista	1	0	0	0	1	1	0	0
53	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	0	0	0	1	1	1	1
54	Europa	hombre	64	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1	1
55	Europa	mujer	39	oyente	observador	0	1	0	1	0	1	0	0
56	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	1	0	0	0	1	0	0
57	Europa	hombre	38	oyente	observador	1	1	0	0	0	0	0	0
58	Europa	hombre	37	oyente	observador	1	0	0	0	0	1	1	0
59	Europa	hombre	59	oyente	observador	1	0	0	1	1	1	1	1
60	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	0	0	0	1	1	0	0
61	Europa	hombre	42	oyente	creador	1	1	1	0	1	0	0	1
62	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	1	0	0	1	0	0	0
63	Europa	hombre	45	oyente	observador	0	0	1	1	0	0	1	0
64	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	0	1	0	1	0	1
65	Europa	hombre	64	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1	1
66	Europa	hombre	52	oyente	observador	0	1	1	0	0	1	1	1
67	Europa	hombre	49	oyente	observador	1	0	0	1	1	1	1	1
68	Europa	hombre	51	oyente	observador	1	1	0	1	1	1	1	1
69	Europa	mujer	59	oyente	observador	1	0	1	0	1	1	1	1
70	Europa	hombre	42	oyente	observador	1	0	0	1	1	0	0	0
71	Europa	hombre	30	oyente	observador	1	0	1	0	1	1	1	1
72	Europa	hombre	64	oyente	observador	0	0	1	1	0	0	1	0
73	Europa	mujer	58	oyente	observador	0	1	1	0	0	1	1	1
74	Europa	mujer	27	oyente	observador	1	1	1	0	0	1	0	1
75	Europa	hombre	32	interprete	creador	1	1	0	0	1	1	1	1
76	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	1	0	0	0	1	1
77	Europa	hombre	38	oyente	observador	1	1	0	0	1	0	0	0
78	Europa	hombre	13	interprete	observador	1	0	1	1	1	0	0	0
79	Europa	hombre	53	compositor	observador	0	1	1	1	1	1	1	1
80	Europa	hombre	31	oyente	observador	1	1	0	0	0	0	1	1
81	Europa	hombre	43	oyente	observador	1	1	0	1	1	0	0	0
82	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	0	1	0	0	0	0	0
83	Europa	hombre	34	interprete	observador	0	0	1	1	1	1	1	1
84	Europa	hombre	35	interprete	observador	1	0	0	0	0	0	0	0
85	Europa	hombre	41	oyente	observador	1	0	1	0	0	0	0	0
86	Sudamerica	hombre	31	compositor	observador	1	0	0	0	0	0	0	1
87	Europa	hombre	62	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1	1
88	Europa	hombre	27	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1	1
89	Europa	hombre	22	oyente	observador	1	0	1	1	1	0	0	1
90	Europa	hombre	25	interprete	observador	1	0	1	0	1	1	1	1
91	Europa	hombre	59	oyente	observador	0	1	1	1	0	1	1	0
92	Europa	hombre	38	interprete	observador	1	0	0	0	1	1	1	1
93	Europa	hombre	53	interprete	observador	1	1	0	0	1	1	1	1
						59	47	49	49	57	58	44	51

ANEXO S

Datos obtenidos sobre cuestiones 12^a a 15^a de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c12	c13	c14	c15
1	Europa	hombre	45	oyente	observador	0	0	0	0
2	Europa	mujer	51	interprete	observador	1	0	0	1
3	Europa	hombre	40	oyente	observador	0	1	0	1
4	Europa	hombre	35	interprete	observador	0	0	0	0
5	Europa	hombre	65	oyente	observador	0	1	0	1
6	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	0	0
7	Europa	hombre	48	compositor	creador	0	0	0	0
8	Europa	hombre	41	compositor	creador	0	0	0	0
9	Europa	hombre	45	oyente	creador	1	0	1	1
10	Europa	hombre	40	oyente	creador	0	1	1	1
11	Europa	hombre	34	compositor	observador	0	1	0	1
12	Europa	mujer	34	interprete	observador	0	0	0	0
13	Europa	hombre	74	oyente	observador	0	0	0	0
14	Europa	mujer	50	oyente	observador	0	1	0	0
15	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	0	0	1
16	Europa	hombre	23	oyente	observador	0	0	0	0
17	Europa	hombre	42	oyente	observador	0	0	0	0
18	Europa	hombre	54	oyente	observador	0	0	0	1
19	Europa	hombre	46	oyente	observador	0	0	0	0
20	Europa	hombre	33	interprete	observador	0	1	1	0
21	Europa	hombre	67	oyente	observador	0	0	0	0
22	Europa	hombre	63	oyente	observador	0	0	0	0
23	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	0	0
24	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1	0	0
25	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	1	0	1
26	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	0	1
27	Europa	hombre	53	oyente	observador	0	0	0	0
28	Europa	mujer	52	oyente	observador	0	0	0	1
29	Europa	¿?	0			0	0	0	0
30	Europa	hombre	36	oyente	observador	0	0	0	0
31	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	0	1
32	Europa	hombre	42	oyente	observador	0	1	1	1
33	Europa	hombre	40	oyente	observador	0	0	0	0
34	Europa	hombre	43	interprete	observador	0	0	0	0
35	Europa	hombre	47	oyente	observador	0	1	1	1
36	Europa	hombre	57	oyente	observador	0	0	0	0
37	Europa	hombre	65	oyente	observador	0	0	0	0
38	Europa	mujer	31	oyente	copista	0	0	1	1
39	Europa	mujer	52			0	1	0	0
40	Europa	hombre	62	compositor	observador	0	0	0	0
41	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	0	0
42	Europa	hombre	68	oyente	observador	0	1	0	0
43	Europa	hombre	54	oyente	observador	0	0	0	0
44	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	0	0
45	Europa	hombre	57	oyente	observador	1	1	1	1

Datos obtenidos sobre cuestiones 12ª a 15ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos (CONTINUACIÓN)

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c12	c13	c14	c15
46	Europa	hombre	57	oyente	observador	0	0	0	0
47	Europa	hombre	61	oyente	observador	0	0	0	0
48	Europa	hombre	65	oyente	observador	0	1	0	1
49	Europa	hombre	44	oyente	observador	0	1	0	1
50	Europa	hombre	31	oyente	creador	0	0	0	0
51	Europa	hombre	49	interprete	observador	1	1	1	1
52	Europa	hombre	37	oyente	copista	0	0	0	0
53	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	0	0
54	Europa	hombre	64	oyente	observador	0	0	0	0
55	Europa	mujer	39	oyente	observador	0	0	0	1
56	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	0	0
57	Europa	hombre	38	oyente	observador	1	1	0	1
58	Europa	hombre	37	oyente	observador	1	1	1	1
59	Europa	hombre	59	oyente	observador	0	0	0	0
60	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	0	0	0
61	Europa	hombre	42	oyente	creador	0	0	0	0
62	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	1	0	1
63	Europa	hombre	45	oyente	observador	1	1	0	0
64	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	1	1	1
65	Europa	hombre	64	oyente	observador	1	1	1	1
66	Europa	hombre	52	oyente	observador	1	1	1	1
67	Europa	hombre	49	oyente	observador	1	1	1	1
68	Europa	hombre	51	oyente	observador	1	1	1	1
69	Europa	mujer	59	oyente	observador	1	0	0	0
70	Europa	hombre	42	oyente	observador	0	1	1	1
71	Europa	hombre	30	oyente	observador	0	0	0	0
72	Europa	hombre	64	oyente	observador	0	0	0	1
73	Europa	mujer	58	oyente	observador	0	0	0	0
74	Europa	mujer	27	oyente	observador	1	1	0	1
75	Europa	hombre	32	interprete	creador	1	0	1	0
76	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	0	0
77	Europa	hombre	38	oyente	observador	0	0	0	0
78	Europa	hombre	13	interprete	observador	0	0	0	0
79	Europa	hombre	53	compositor	observador	0	0	0	0
80	Europa	hombre	31	oyente	observador	0	0	0	0
81	Europa	hombre	43	oyente	observador	0	0	0	1
82	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	0	0	0
83	Europa	hombre	34	interprete	observador	0	0	0	0
84	Europa	hombre	35	interprete	observador	0	0	0	0
85	Europa	hombre	41	oyente	observador	0	0	0	1
86	Sudamerica	hombre	31	compositor	observador	1	1	1	1
87	Europa	hombre	62	oyente	observador	1	1	1	1
88	Europa	hombre	27	oyente	observador	0	0	0	1
89	Europa	hombre	22	oyente	observador	1	1	1	1
90	Europa	hombre	25	interprete	observador	0	0	0	0
91	Europa	hombre	59	oyente	observador	0	0	0	0
92	Europa	hombre	38	interprete	observador	0	0	0	0
93	Europa	hombre	53	interprete	observador	1	1	1	0
						20	31	20	37

ANEXO T

Datos obtenidos sobre cuestiones 16ª a 20ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c16	c17	c18	c19	c20a	c20b	c20c
1	Europa	hombre	45	oyente	observador	0	1	0	0	0	0	0
2	Europa	mujer	51	interprete	observador	0	1	1	0	1	1	1
3	Europa	hombre	40	oyente	observador	1	1	0	0	0	0	1
4	Europa	hombre	35	interprete	observador	0	0	1	1	0	0	0
5	Europa	hombre	65	oyente	observador	0	0	0	0	0	0	0
6	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1	0	0	0	1	0
7	Europa	hombre	48	compositor	creador	1	0	0	0	0	0	1
8	Europa	hombre	41	compositor	creador	0	0	1	1	1	0	0
9	Europa	hombre	45	oyente	creador	1	1	1	1	1	0	0
10	Europa	hombre	40	oyente	creador	1	1	1	1	0	1	0
11	Europa	hombre	34	compositor	observador	1	1	0	1	1	0	0
12	Europa	mujer	34	interprete	observador	0	0	1	1	1	0	0
13	Europa	hombre	74	oyente	observador	0	1	1	1	0	0	0
14	Europa	mujer	50	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1
15	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	0	1	0	0	0	0
16	Europa	hombre	23	oyente	observador	1	1	0	1	1	0	0
17	Europa	hombre	42	oyente	observador	1	0	1	0	0	0	0
18	Europa	hombre	54	oyente	observador	1	0	0	1	0	0	0
19	Europa	hombre	46	oyente	observador	0	0	1	1	0	0	0
20	Europa	hombre	33	interprete	observador	0	0	0	0	0	1	0
21	Europa	hombre	67	oyente	observador	1	1	1	1	0	0	0
22	Europa	hombre	63	oyente	observador	1	1	0	1	0	1	0
23	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	1	1	0	0	1
24	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	1	1	0	0	1
25	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	1	0	0	0	1
26	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	0	0	0	0	1
27	Europa	hombre	53	oyente	observador	1	1	0	0	1	1	1
28	Europa	mujer	52	oyente	observador	1	1	1	1	0	0	0
29	Europa	¿?	0			1	1	1	1	1	0	0
30	Europa	hombre	36	oyente	observador	0	0	0	1	0	0	1
31	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	1	0	0	0	1	1
32	Europa	hombre	42	oyente	observador	1	0	1	1	1	0	0
33	Europa	hombre	40	oyente	observador	1	0	1	1	0	1	0
34	Europa	hombre	43	interprete	observador	1	0	1	1	0	0	1
35	Europa	hombre	47	oyente	observador	0	0	0	0	0	1	0
36	Europa	hombre	57	oyente	observador	1	0	0	0	0	0	1
37	Europa	hombre	65	oyente	observador	1	1	0	1	0	0	1
38	Europa	mujer	31	oyente	copista	1	0	0	1	0	0	0
39	Europa	mujer	52			1	1	0	1	0	0	1
40	Europa	hombre	62	compositor	observador	0	0	0	1	0	0	1
41	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	0	1	1	0	0	1
42	Europa	hombre	68	oyente	observador	1	1	1	0	1	0	1
43	Europa	hombre	54	oyente	observador	0	0	1	0	0	0	0
44	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	1	0	1	0	0	1
45	Europa	hombre	57	oyente	observador	1	1	0	1	0	0	1

Datos obtenidos sobre cuestiones 16ª a 20ª de test de evaluación perceptiva entre estímulos visuales y auditivos (CONTINUACIÓN)

Orden	Nación	Sexo	Edad	cmusical	cartes	c16	c17	c18	c19	c20a	c20b	c20c
46	Europa	hombre	57	oyente	observador	0	0	0	1	0	0	1
47	Europa	hombre	61	oyente	observador	1	1	1	0	0	1	0
48	Europa	hombre	65	oyente	observador	1	1	0	1	1	1	1
49	Europa	hombre	44	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1
50	Europa	hombre	31	oyente	creador	1	1	0	1	0	0	0
51	Europa	hombre	49	interprete	observador	1	1	1	0	0	0	1
52	Europa	hombre	37	oyente	copista	1	0	0	1	0	0	0
53	Europa	hombre	50	oyente	observador	1	1	1	1	0	1	0
54	Europa	hombre	64	oyente	observador	0	0	0	0	0	0	1
55	Europa	mujer	39	oyente	observador	0	0	0	1	0	0	0
56	Europa	hombre	50	oyente	observador	0	0	0	1	0	0	1
57	Europa	hombre	38	oyente	observador	1	1	1	1	0	0	1
58	Europa	hombre	37	oyente	observador	1	1	1	1	0	0	0
59	Europa	hombre	59	oyente	observador	1	0	1	1	1	0	0
60	Europa	hombre	60	oyente	observador	0	0	0	1	0	0	1
61	Europa	hombre	42	oyente	creador	0	0	0	0	0	0	0
62	Europa	hombre	58	oyente	observador	0	0	1	1	0	0	1
63	Europa	hombre	45	oyente	observador	1	0	0	0	0	0	0
64	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	1	1	1	0	0	0
65	Europa	hombre	64	oyente	observador	1	0	1	1	1	1	1
66	Europa	hombre	52	oyente	observador	1	1	0	1	0	0	1
67	Europa	hombre	49	oyente	observador	1	0	1	1	0	1	0
68	Europa	hombre	51	oyente	observador	1	0	0	1	0	0	0
69	Europa	mujer	59	oyente	observador	0	1	1	1	0	0	0
70	Europa	hombre	42	oyente	observador	1	1	1	0	1	1	1
71	Europa	hombre	30	oyente	observador	0	1	1	0	0	0	0
72	Europa	hombre	64	oyente	observador	1	1	0	1	0	1	1
73	Europa	mujer	58	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1
74	Europa	mujer	27	oyente	observador	1	1	0	1	0	0	0
75	Europa	hombre	32	interprete	creador	0	1	1	1	1	1	1
76	Europa	hombre	58	oyente	observador	1	1	1	1	0	0	1
77	Europa	hombre	38	oyente	observador	0	1	0	1	0	0	1
78	Europa	hombre	13	interprete	observador	1	1	1	1	0	0	1
79	Europa	hombre	53	compositor	observador	1	1	1	0	1	1	1
80	Europa	hombre	31	oyente	observador	0	1	1	1	1	1	1
81	Europa	hombre	43	oyente	observador	1	0	1	1	0	0	1
82	Europa	hombre	60	oyente	observador	1	1	0	1	0	0	1
83	Europa	hombre	34	interprete	observador	0	1	1	1	1	1	1
84	Europa	hombre	35	interprete	observador	0	0	1	1	0	1	0
85	Europa	hombre	41	oyente	observador	1	1	1	1	0	0	1
86	Sudamerica	hombre	31	compositor	observador	0	0	1	1	0	1	0
87	Europa	hombre	62	oyente	observador	1	1	0	0	0	0	0
88	Europa	hombre	27	oyente	observador	1	1	0	1	1	1	1
89	Europa	hombre	22	oyente	observador	0	1	1	0	0	0	1
90	Europa	hombre	25	interprete	observador	0	0	0	1	0	0	0
91	Europa	hombre	59	oyente	observador	1	1	1	1	1	1	1
92	Europa	hombre	38	interprete	observador	1	1	1	1	0	0	1
93	Europa	hombre	53	interprete	observador	1	0	1	1	0	0	0
						57	51	52	66	23	27	48

ANEXO U

Sinestesia de Scriabin

Alexander Scriabin (1872 - 1915). Compositor y pianista ruso.



Scriabin poseía el **trastorno sensorceptivo** denominado **sinestesia** (trastorno de la percepción en el que el estímulo de uno de los sentidos provoca simultáneamente el estímulo de otro sentido); en el caso, la sinestesia sufrida aunaba percepciones visuales y auditivas, de modo que los sonidos, las palabras o la música evocan simultáneamente la visión de colores. Así que su obra musical se vio fuertemente influida por la habilidad sinestésica.

Su principal virtud fue asociar cada tonalidad con un color determinado, creando un modelo, un sistema de de ordenación según el ciclo de quintas, basado en el que describe *Newton* en *Opticks*.

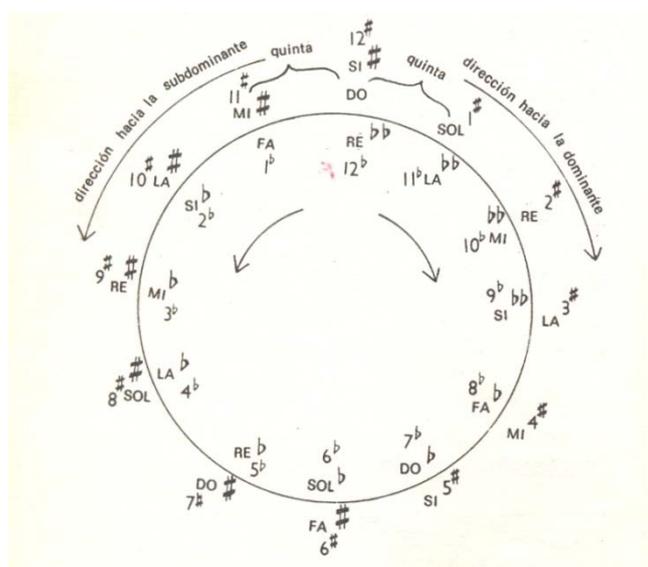


Figura U1. Ciclo de quintas (tonalidad de DoM).

Scriabin escribió muy pocas obras orquestales. Entre las más conocidas e interpretadas se incluyen tres sinfonías, un concierto para piano (1896), el "Poema del Éxtasis" (1908) y "Prometheus: el Poema del Fuego". Este último incluye una parte para "clavier à lumières", un órgano de color diseñado específicamente para la sinfonía. Se tocaba como un piano proyectando luces de colores sobre la pantalla del teatro donde se presentaba la obra.

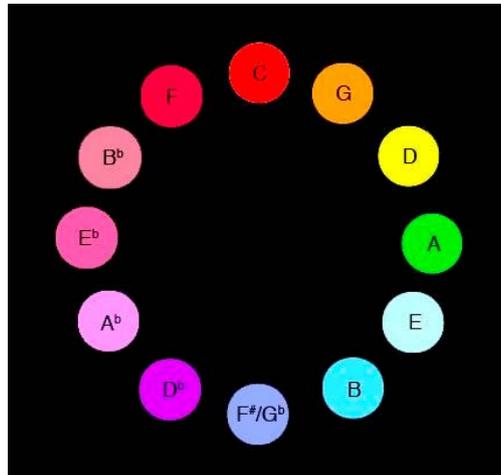


Figura U2. Relación sinestésica entre colores y notas musicales (Scriabin).

Notas musicales en sucesión de quintas	Colores relacionados ROYGBIV
C (Do)	Rojo
G (Sol)	Naranja
D (Re)	Amarillo
A (La)	Verde
E (Mi)	Cian
B (Si)	Indigo
F# (Fa#)	Violeta

Tabla U1. Correspondencia entre colores y notas musicales. Scriabin

NOTAS.-

NOTAS.-

NOTAS.-

NOTAS.-