

Un nuevo método de clasificación de piezas musicales clásicas utilizando indicadores objetivos de bajo nivel

A new approach to classical music genre classification using low level indicators

Por: Antonio Tudurí Vila, Bartomeu Serra Cifre, y Joan Company Florit
Docentes Universitat Illes Balears

Recibido 2/18/11, aprobado 7/12/11

*"La música es la aritmética de los sonidos,
como la óptica es la geometría de la luz."*

Claude Debussy (1862-1918)

Resumen

Los métodos diseñados hasta la fecha para identificar patrones que permitan clasificar piezas musicales tonales en base al género (clásico, funk, jazz) lo hacen extrayendo unas pocas características heterogéneas de cada pieza (intervalo mayor, uso de cada una de las notas, patrones rítmicos, uso de triadas, etc.) con resultados muy interesantes. El presente artículo da un paso más igualando los resultados de otros sistemas por medio de un nuevo método más simple en su definición para clasificar piezas musicales clásicas según su periodo (Barroco, Clásico, Romántico) a partir del recuento del uso de datos elementales en una composición musical como son los intervalos melódicos utilizados y el porcentaje de uso de cada nota en base a su tonalidad. Dicho método permite clasificar piezas independientemente del compositor, la duración, la tonalidad y la orquestación de dicha pieza

Palabras clave: Extracción de información musical asistida por ordenador, análisis musical, clasificación estadística de género musical.

Abstract

The methods developed to date to identify patterns that allow classifying tonal musical pieces based on genre (classical, funk, jazz, ...) do so by extracting a few heterogeneous characteristics of each piece (wider interval, number of each note used, rhythmic patterns, use of triads, etc.) with very interesting results. This paper goes a step further equating the results of other methods proposing a new method in its simplest definition to classify classical music pieces according to their period (Baroque, Classical, Romantic) counting basic musical data as melodic intervals used and the percentage of use of each note normalized to their tonality. This method allows classify musical pieces regardless the composer, the duration, tonality and orchestration of the musical pieces.

Key words: Computer assisted music information retrieval, Musical analysis, statistic genre classification.

Introducción

En este apartado se explica el problema y se resumirán algunos trabajos desarrollados en este campo publicados hasta la fecha.

Identificación del problema

La definición de las características de un estilo o época musical no son claras y hasta la fecha se ha hecho por medio de adjetivos subjetivos e interpretables tales como (relacionadas con el Clasicismo musical): alegre, brillante, con equilibrio formal etc.¹ Estas características no pueden ser entendidas de manera objetiva y sin unos conocimientos mínimos de musicología.

Sin embargo, cualquier persona con una suficiente cultura musical puede mediante la simple audición de una pieza musical, identificar el periodo histórico en el cual dicha pieza está compuesta. En general, bastarán unos pocos segundos de audición para identificar su estilo. En base a este hecho, el presente artículo demuestra que también hay indicadores que definen el estilo de una pieza musical en los elementos básicos de su composición: sus intervalos melódicos.

Y con un conocimiento más profundo de cultura musical hasta se puede aventurar con una considerable probabilidad de éxito la autoría de la obra.

En la teoría musical un intervalo melódico identifica la distancia (medida en tonos y semitonos) que hay entre dos notas² por ejemplo, cualquier par de notas que disten en distancia tonal 2 tonos (4 semitonos) será considerado una 3ª Mayor independiente de cuales sean las notas siempre que estas disten en los nombres de las notas 2 peldaños (Do, Re, Mi, Fa, Sol, La Si). En el método propuesto, las notas que intervienen en el intervalo sí que son consideradas. De este modo, las 12 notas existentes generarán 144 intervalos melódicos posibles (calculando 12^2).

La Tabla 1 establece la relación entre los nombres de las notas en el sistema tonal y los identificadores utilizados en el método propuesto.

Nombre Nota	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
Nombre establecido	1	1+	2	2+	3	4	4+	5	5+	6	6+	7

Tabla 1: Nombres de notas utilizados en el estudio.

Un intervalo melódico es un par de notas interpretadas consecutivamente en una línea melódica. La Figura 1 muestra los intervalos melódicos del motivo musical de la 5ª Sinfonía de L.w.Beethoven.

1 Prisa Digital S.L., n.d., "La música del Clasicismo", http://www.kalipedia.com/arte/tema/caracteristicas-clasicismo-musical.html?x=20070822klpartmsc_109.Kes&ap=0

2 Consultar [http://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Intervalo_(música)) para información detallada.

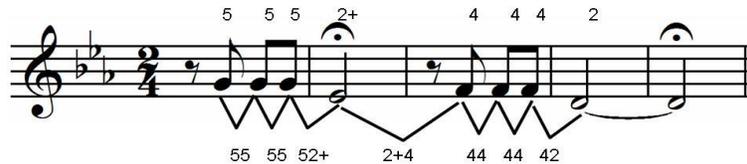


Figura 1: Intervalos melódicos detectados en los primeros compases de la 5ª Sinfonía de Beethoven.

En la tonalidad del primer movimiento de la 5ª Sinfonía de Beethoven, (Do menor), la nota C corresponde al identificador "1", C# al "1+", D al "2" ... B al "7". De este modo, en este motivo aparecen dos ocurrencias del intervalo 55, dos del 44 y una ocurrencia de cada intervalo 52+, 2+4 y 42.

El estándar MIDI no permite notas enarmónicas. Por lo tanto un Do# será almacenado del mismo modo que un Re bemol³.

El desarrollo de métodos matemáticos para clasificar piezas musicales en base a diferentes criterios ha sido un campo el cual las soluciones desarrolladas han llegado hasta la fecha a clasificar piezas musicales en base a su estilo. Sin embargo dichas soluciones han clasificado piezas en base a su género musical de manera muy generalista (clásica, funk, rock, etc.). Otras han clasificado piezas entre diferentes compositores concretos distantes en estilo y época analizando el uso de acordes, aunque se reconoce que dicho algoritmo de identificación de acordes no funciona si no se identifican 3 notas simultáneamente.

Tomando como punto de partida las investigaciones realizadas hasta la fecha, este artículo propone un nuevo método basado en el análisis del porcentaje de uso de cada nota y cada intervalo utilizado con respecto al total de notas e intervalos identificados en cada pieza musical en todas sus voces, para clasificar piezas musicales clásicas (en términos generales) en formato MIDI en base a su época musical (Barroco, Clásico y Romanticismo) independientemente del compositor, la orquestación, la forma musical y la tonalidad de la misma. De este modo se pueden extraer indicadores objetivos asociados a cada estilo.

Es necesario decir que los límites entre los estilos compositivos analizados no son claros y que hay compositores cuya producción musical se puede decir que está entre dos estilos musicales (por ejemplo, Beethoven es considerado un compositor de transición entre el Clasicismo y el Romanticismo)⁴. [Vernon 1930]

El método propuesto en este artículo podrá ser utilizado también para cuantificar numéricamente en qué medida un compositor incorpora en sus obras influencias de otros compositores clasificando sus obras en base a una muestra de obras

3 Anonymous, n.d., "Standard MIDI File (SMF) Format" , <http://www.blitter.com/~russtopia/MIDI/~jglatt/tech/midifile.htm> ,descargado en 33 de Septiembre, 2009

4 Vernon P.E., THE PERSONALITY OF THE COMPOSER , Music and Letters, 1930, doi:10.1093/ml/XI.1.34

musicales de los compositores que aportan su influencia en el primero.

Investigaciones relacionadas hasta la fecha

Los trabajos realizados en este campo están focalizados en dos áreas de estudio: Extracción de características a partir de un análisis de señales sonoras y extracción de patrones a partir de análisis de representaciones musicales simbólicas tales como ficheros MIDI. Nuestro trabajo se enmarcaría dentro de esta segunda área.

Los trabajos de investigación similares en esta área, pretenden a partir de ficheros en formato MIDI extraer parámetros de diferentes aspectos más generales y conceptualmente dispares con el objetivo de identificar patrones que permitan identificar automáticamente estilos musicales. McKay y Fujinaga^{5,6}, a partir de parámetros relacionados con la instrumentación, textura, ritmo, variaciones dinámicas etc. extraídos de los ficheros MIDI, y con la aplicación de un sistema experto ACE (*Automatic Classification Engine*) clasifican piezas musicales por género (Clásico, Jazz, tango, salsa, Funk etc.). Su trabajo se basa en el desarrollo de la aplicación *jSymbolic* desarrollada en Java que extrae las características que les interesan de cada archivo MIDI.

Un año más tarde tratan el mismo problema de identificación del género musical pero añadiendo como variables de estudio acordes y un estudio de los patrones rítmicos⁷.

En 1979, Fred. T. Hofstetter⁸ realizó un investigación para identificar rasgos diferenciales en melodías de cuartetos de cuerda de las escuelas checa (Dvorak y Smetana), francesa (D'Indy y Saint-Saëns) rusa (Borodin y Tchaikovsky) y alemana (Mendelssohn y Schumann) del siglo XIX a partir del análisis por medio de la comparación de las funciones de distribución de las frecuencias de intervalos melódicos utilizados comparado con la función de distribución de la función ji-cuadrado (distribución de Pearson⁹).

Dicho enfoque se diferencia del presentado en este artículo en que Hofstetter sólo analiza los intervalos aparecidos en las melodías mientras que el presente estudio lo hace a partir de la totalidad de la obra. Otra diferencia importante es que Hofstetter clasifica los intervalos melódicos sin tener en cuenta la tonalidad de la

5 McKay C., Fujinaga, "Automatic music classification and the importance of instrument identification", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2005

6 McKay C., Fujinaga I., "jSymbolic: A feature extractor for MIDI files", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2006.

7 McKay, C., and I. Fujinaga, "Style-independent computer-assisted exploratory analysis of large music collections", Journal of Interdisciplinary Music Studies 1 (1), 2007.

8 Hofstetter Fred T., "The Nationalist Fingerprint in Nineteenth Century Romantic Chamber Music". in Computers and the Humanities 13, 1979, North-Holland Publishing Company.

9 Consultar http://es.wikipedia.org/wiki/Distribución_X2 para un mayor detalle.

obra (2ª Mayor, 3ª menor, 3ª Mayor, y todos los más distantes a a una 6ª disminuída los agrupa en un sólo tipo) y también estudia intervalos de segundo orden (entendidos como una pareja de intervalos de 1er orden) así como la dirección (ascendente o descendente de los mismos).

El presente estudio se diferencia además del de Hofstetter en que no considera la dirección de los intervalos, y que considera todos los intervalos melódicos posibles en un sentido absoluto respecto a la tonalidad (ver Figura 1) y que la herramienta matemática utilizada para realizar la clasificación es el análisis multivariante con función lineal

Otra aportación añadida del método presentado en este artículo es que es aplicable a piezas musicales completas, de cualquier forma musical y orquestación.

Tzanetakis, Ermolinskyi y Cook en su estudio de 2004¹⁰ clasifican piezas por estilo musical (clásico, jazz, pop etc.) a partir de las frecuencias relativas de aparición de cada nota (12 en el sistema tonal) a partir de material musical en formato MIDI.

Heng-Tze Cheng, Yi-Hsuan Yang y Yu-Ching Lin¹¹ proponen en su método utilizar histogramas de uso de acordes en piezas musicales para clasificarlas en base a a una clasificación de emociones (ira, felicidad, tristeza).

Ferkova E., Ždimal M., Šidlik P.¹² proponen el estudio de estilos compositivos de Mozart, Schubert y Brahms a partir del estudio de las frecuencias de uso de los diferentes acordes de 3 y 4 notas desde una perspectiva armónica. Este artículo también propone un algoritmo para identificar la tonalidad de cada pieza musical. Esta investigación tiene similitudes con el método propuesto en este artículo porque intenta identificar diferencias entre compositores clásicos (Brhams, Schubert y Mozart) más allá de los resultados de una clasificación de género musical propuesta anteriormente.

R. Typke¹³ en su tesis doctoral investiga las posibilidades de extracción de información a partir de la similitud de las melodías utilizadas en diferentes estilos musicales.

También P. Ponce y J.M. Iñesta¹⁴ analizan mediante herramientas estadísticas la

10 Tzanetakis G. Ermolinskyi A, Cook P., "Pitch histograms in audio and symbolic music information retrieval", Journal of New Music Research, June 2004.

11 Heng-Tze Cheng, Yi-Hsuan Yang, Yu-Ching Lin, I-Bin Liao*, and Homer H. Chen, "Automatic chord recognition for music classification and retrieval", IEEE International Conference on Multimedia & Expo 2008.

12 Ferkova Eva, Ždimal Milan, and Šidlik Peter, 2008 "Tonal Theory for the Digital Age", ISBN-13: 978-0-936943-17-6.

13 Typke R., Wiering F. Veltkamp R., "A survey of music on formation retrieval systems.", ISMIR Proceedings, 2005.

14 Ponce de Leon, P. J., y J. M. Iñesta, "Statistical description models for melody analysis and characterization.", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2004.

posibilidad de identificar patrones que permitan clasificar piezas musicales en base a su género musical.

Cruz-Alcázar, P. P., E. Vidal, y J. C. Pérez-Cortes también plantean un trabajo para identificar estilos musicales pero ellos plantean la utilización de técnicas de inferencia gramatical para resolver el problema¹⁵.

El presente trabajo se diferencia de los anteriores en que se focaliza y amplía el nivel de detalle en el estudio de la tesitura, las frecuencias de notas aparecidas y las frecuencias de intervalos melódicos utilizados en una época y estilo más concreto, y no se tienen en cuenta factores de interpretación y dinámica por ser considerarlos que estos están muy ligados a los criterios y gustos de interpretación de cada época.

Objetivo de la investigación

El objetivo del trabajo presentado en este artículo es diseñar un método que permita clasificar piezas musicales clásicas (entendidas como clásicas las compuestas entre el siglo XVII y XIX) a partir de elementos elementales tales como el número de intervalos utilizados de cada uno de los 144 existentes y el número de notas utilizadas de cada una de las 12 posibles.

Dichos valores serán considerados en su cantidad porcentual respecto al total de intervalos y notas identificadas en cada pieza musical. De este modo se puede considerar en las muestras de piezas analizadas piezas de diferente duración, orquestación y magnitud.

En la muestra sólo han sido considerados movimientos de piezas cuyo modo de su tonalidad es en modo mayor. De este modo garantizamos la comparabilidad de los intervalos generados a partir de las notas 3 y 4 por una parte y las notas 8 y 9 por otra, ya que las escalas mayores y menores difieren en esas notas¹⁶.

Se han incluido también en las variables analizadas (notas e intervalos) variables que definen la distribución de las notas de las piezas musicales analizadas en las diferentes 11 octavas que permite el estándar MIDI.

Una vez se haya demostrado el nivel de fiabilidad del método, podrá ser utilizado también para analizar y cuantificar la influencia que sobre un compositor han ejercido otros compositores que lo han precedido en la historia.

Una vez más, se enfatiza en que este método será una primera aproximación a la viabilidad de diseñar un método matemático que permita identificar de manera objetiva los rasgos diferenciales entre el estilo compositivo de dos compositores coetáneos y muy similares en estilo.

15 Cruz-Alcázar, P. P., E. Vidal, and J. C. Pérez-Cortes, "Musical style identification using grammatical inference", CIARP 2003,2003.

16 Consultar http://es.wikipedia.org/wiki/Modo_mayor para un mayor detalle.

Metodología

Se define en este apartado las herramientas utilizadas para llevar a cabo el estudio así como los conjuntos de piezas analizadas.

Procedimientos

La principal aportación tecnológica para este estudio ha sido la implementación de la aplicación informática AN_MID v4.1; programa informático que extrae de cada pieza analizada (en formato MIDI) las frecuencias de aparición de cada nota y de cada intervalo melódico posible.

Aspectos relevantes del formato MIDI y su tratamiento en la aplicación AN_MID v4.1.^{17 18 19}

La aparición del sintetizador digital a finales de la década de 1970 trajo consigo el problema de la incompatibilidad de los sistemas que usaba cada compañía fabricante. De este modo se hacía necesario crear un lenguaje común por encima de los parámetros que cada marca iba generando a lo largo del desarrollo de los distintos instrumentos electrónicos puestos a disposición de los profesionales del sector.

El estándar MIDI fue inicialmente propuesto en un documento dirigido a la *Audio Engineering Society* por *Dave Smith*, presidente de la compañía *Sequential Circuits* en 1981. La primera especificación MIDI se publicó en agosto de 1983.

Cabe aclarar que MIDI no transmite señales de audio, sino datos de eventos y mensajes controladores que se pueden interpretar de manera arbitraria, de acuerdo con la programación del dispositivo que los recibe. Es decir, MIDI es una especie de "partitura" que contiene las instrucciones en valores numéricos (0-127) sobre cuándo generar cada nota de sonido y las características que debe tener; el aparato al que se envíe dicha partitura la transformará en música completamente audible.

El estándar MIDI utiliza hasta 16 canales diferentes simultáneamente (también llamados voces, o instrumentos); Cada canal tendrá identificado previamente un timbre (flauta, violín, piano, clavecín, etc.), y todo el material sonoro enviado a él será reproducido con dicho timbre. Generalmente secuenciando obras clásicas, cada instrumento se asigna a un canal diferente.

En el caso de procesar partituras para piano, el material musical estará

17 Anonymous, February 2006, "(.mid) Standard MIDI File Format", <http://faydoc.tripod.com/formats/mid.htm>, downloaded on September 22, 2009.

18 Anonymous, n.d., "Standard MIDI File (SMF) Format", <http://www.blitter.com/~russtopia/MIDI/~jglatt/tech/midifile.htm>, descargado en Septiembre 22, 2009.

19 Wikipedia, n.d., "MIDI Standard Definition", <http://es.wikipedia.org/wiki/MIDI>.

almacenado en un único canal MIDI o como máximo en 2 canales (material de la mano izquierda y derecha respectivamente). El programa está diseñado para identificar con un alto grado de fiabilidad las líneas melódicas e identificar correctamente los intervalos melódicos detectados.

Funcionamiento de la aplicación AN_MID v4.1

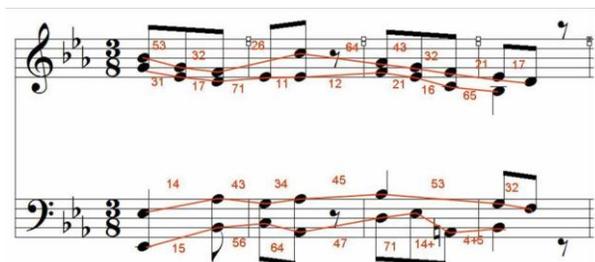
La aplicación AN_MID v4.1 está desarrollada en C++ para garantizar la portabilidad entre plataformas (Linux, Unix, Windows etc.). Toma como entrada un conjunto de piezas musicales en formato MIDI y extrae de cada una de ellas la frecuencia de utilización de cada nota, el porcentaje de distribución de las notas de la pieza musical en cada una de las 11 octavas que permite el formato MIDI y la frecuencia de utilización de cada uno de los 144 intervalos melódicos posibles (12 notas x 12 notas).

El algoritmo de detección de intervalos melódicos se basa en el criterio de proximidad para decidir qué nota (de las identificadas anteriormente que todavía no haya sido asociada a ningún intervalo), forma intervalo con la que se procesa en cada instante.

La Figura 2 muestra gráficamente por medio de líneas y de los identificadores de intervalos (por ejemplo el identificador "14" corresponderá a la detección del intervalo tónica(1)-subdominante(4)) detectados en los 4 primeros compases del segundo movimiento de la sonata nº 12 de Mozart (compuesto en la tonalidad de Mi b Mayor)

La aplicación permite procesar archivos MIDI tanto de tipo 0 como de tipo 1. Los archivos MIDI están divididos en pistas. Los archivos de tipo 0 almacenan todo el material musical en una única pista mientras que los de tipo 1 asignan generalmente una pista para cada canal MIDI. El resultado sonoro en relación con la reproducción del fichero es el mismo en ambos casos.

Figura 1: Intervalos melódicos detectados en los 4 primeros compases del segundo movimiento de la sonata nº 12 de Mozart (compuesto en la tonalidad de Mi b Mayor)



Resultados de la aplicación AN_MID v4.1

Para cada una de las n piezas procesadas por el programa, se obtiene el siguiente resultado: $MP_i = \left(\bigvee_{i,1} \dots NP_{i,12}, OP_{i,1} \dots OP_{i,11}, IP_{i,1,1} \dots IP_{i,12,12} \right) \quad 1 \leq i \leq n$

Siendo:

- ⤴ **NP_{i,j}** : (*Note Percentage*) El porcentaje de aparición en la pieza musical de la nota j respecto el total de notas identificadas en la pieza musical. Las notas son C, C#, D, D# E, F, F#, G, G#, A, A#, B, teniendo en cuenta que las notas han sido transportadas a C Major, es decir, NP_{i,1} contiene el número de veces que aparece la nota tónica en la pieza "j". Dicha tonalidad se extrae del fichero MIDI en su correspondiente evento MIDI.
- ⤴ **OP_{i,j}** : (*Octave Percentage*) El porcentaje de notas en la partitura detectadas en la octava "j" en la pieza "i". Se ha de tener en cuenta que el estándar MIDI permite hasta 11 octavas, de las cuales un piano no las utiliza todas.
- ⤴ **IP_{i,j,k}** : (*Interval Percentage*) El porcentaje de veces que se ha detectado que la nota "j" es seguida por la nota "k" (siendo j,k ∈ {1, 1+, 2, 2+, 3, 4, 4+, 5, 5+, 6, 6+, 7}) en la pieza "i", respecto el total de intervalos detectados.

Estas variables extraídas del fichero MIDI o partitura permiten comparar piezas musicales de diferente duración, orquestación y construcción formal.

Dichas variables cumplirán las propiedades de la Figura 3.

$$NP_{i,j} = \sum_{k=1}^{12} IP_{i,j,k} = \sum_{k=1}^{12} IP_{i,k,j} \quad \forall i, j / 1 \leq j \leq 12, \quad 1 \leq i \leq n$$

$$\sum_{k=1}^{12} NP_{i,k} = 1 \quad \sum_{k=1}^{11} OP_{i,k} = 1 \quad \sum_{k=1}^{12} \sum_{m=1}^{12} IP_{i,k,m} \approx 1$$

Figure 3: *Propiedades que cumplen las variables calculadas.*

Ya que excepto la primera y la última nota almacenada en cada canal que no serán nota final ni nota inicial respectivamente de ningún intervalo melódico, todas las notas son nota final y nota inicial del intervalo que forman con la nota anterior y posterior respectivamente.

Compositores y grupos de piezas musicales analizadas

Para probar la hipótesis, se han seleccionado los colectivos de la Tabla 2. Estos archivos MIDI han sido descargados de Classical Archives²⁰.

Periodo compositivo/ Compositor/ número de intervalos analizados	Forma musical	Nº. de movimientos analizados.
Periodo Barroco (483.522 intervalos analizados)		212 piezas
Antonio Vivaldi (1678-1741)	Diversos conciertos	47
J.S.Bach (1685-1750)	Diversas piezas (suites, conciertos, piezas para clave etc.).	131
G.F.Händel (1685-1759)	Diversas piezas (suites, conciertos,	34

²⁰ Classical Archives LLC, n.d., "The Ultimate Classical Music Destination", <http://www.classicalarchives.com> , descargado entre Mayo 2007 y Mayo 2010.

	piezas para clave etc.).	
Periodo Clásico (1.934.714 intervalos analizados)		700 piezas
F.J. Haydn (1732-1809)	Todas las sonatas para clave (Hob XVI).	139
	Sinfonías (Hob I/60 - 104) ²¹	153
	Cuartetos (Hob III Op.1, 2, 3, 20, 33, 42, 50, 52, 54, 64, 74, 76 y 77)	192
W.A.Mozart (1756-1791)	Todas las sonatas para piano(forte)	48
	Sinfonías (k.128/ nº16 - k.551/nº41) ²²	93
	Todos los cuartetos (23)	75
Periodo Romántico (629.891 intervalos analizados)		99 piezas
Johannes Brhams(1833-1897)	Diversas piezas	24
Robert Schumann (1810-1856)	Diversas piezas	28
Antonín Dvořák (1841-1904)	Diversas piezas	47

Tabla 2: Lista de conjuntos de piezas analizados y número total de intervalos detectados en cada uno.

La columna "Nº. de movimientos analizados" de la tabla 2 contiene el número total de movimientos analizados (una sinfonía clásica tiene entre 3 y 5 movimientos. Todas las piezas analizadas están compuestas en modo Mayor²³.

El conjunto de piezas seleccionadas de cada compositor romántico incluye principalmente sinfonías, sonatas para piano, sonatas para violín viola y violonchelo, cuartetos y quintetos de cuerda y piezas para piano de diferente forma (serenatas, baladas, etc.).

- Cada una de las 1011 piezas analizadas ha sido editada individualmente con un editor musical *Finale* para garantizar que el material musical estaba almacenado correctamente; realizando en el caso de que fuera necesario las siguientes operaciones:
- Eliminación del material musical asociado a la repetición de la exposición. El formato MIDI no permite especificar repeticiones musicales, por tanto, en caso de haberlas, los compases de material musical que se repite, aparece 2 veces en el fichero MIDI. Por tanto se ha eliminado las repeticiones de material musical donde apareciera²⁴.
- En caso de detección de errores en el material musical en formato MIDI, compararlo y corregirlo con la partitura original de la pieza²⁵.
- Eliminación del material musical relacionado con instrumentos de percusión (timbales principalmente) porque los redobles de timbal tienen en formato MIDI muchas notas pero no aportan valor compositivo.

21 No se incluye en la muestra las sinfonías nº 74,75,77-81 porque no ha sido localizada ninguna fuente MIDI.

22 No ha sido considerada la sinfonía 37 porque en la actualidad es atribuida a Michael Haydn.

23 Consultar http://es.wikipedia.org/wiki/Modo_mayor para un mayor detalle.

24 Consultar <http://es.wikipedia.org/wiki/Sonata> para un mayor detalle

25 Información obtenida en Guo E., 2008, "Proyecto Biblioteca Internacional de Partituras Musicales (IMSLP) ", <http://imslp.org> .

Análisis discriminante

La herramienta estadística utilizada para clasificar las piezas ha sido el análisis discriminante con función lineal.

El análisis discriminante se utiliza para clasificar las observaciones en dos o más grupos a partir de una muestra en la cual se conocen los grupos a los que pertenece cada elemento de la muestra. El análisis discriminante también puede utilizarse también para investigar cómo contribuyen las variables a la separación de los grupos.

Como función lineal se utiliza la distancia de Mahalanobis²⁶ la cual mejora la distancia euclidiana²⁷ en que tiene en cuenta la correlación entre las variables aleatorias.

La principal condición que deben cumplir las variables aleatorias (frecuencias de uso de cada nota y frecuencias de uso de cada intervalo melódico) extraídas de los individuos (en este caso piezas musicales) es que deben poderse aproximar a una distribución normal. Ello ha sido comprobado por medio del test de Anderson-Darling²⁸.

El análisis discriminante está implementado en la mayoría de paquetes estadísticos como el SPSS, Minitab, R, etc. Los cálculos resumidos en este artículo han sido realizados con la aplicación "Minitab 15.1.20".

Resultados

Se han dividido aleatoriamente las piezas de cada compositor en dos grupos. El primer grupo forma la muestra de la cual se conoce su grupo de clasificación y el segundo incluye las piezas de las cuales se quiere predecir su pertenencia a cada uno de los tres grupos (Barroco, Clasicismo Romantismo).

De este modo la muestra de piezas se compone de 505 piezas (105 piezas barrocas, 350 clásicas y 50 piezas románticas) y la población que se desea clasificar consta de otras 505 piezas las cuales el análisis discriminante realizará una predicción de su pertenencia a un grupo en base a la muestra.

El experimento se ha repetido 5 veces y la Tabla 3 muestra los promedios de clasificación de cada uno de los grupos a clasificar en cada uno de los grupos de la muestra.

En todos los experimentos la variable eliminada por no aportar valor discriminante es el porcentaje de uso de la nota sensible (nota etiquetada como "B") y el porcentaje de notas incluidas en las octavas 1, 8, 9, 10 y 11 (variables O1, O2, O8, O9, O10 y O11) por ser de tesituras muy bajas o muy altas (con

26 Consulta http://es.wikipedia.org/wiki/Distancia_de_Mahalanobis para un mayor detalle.

27 Consultar http://es.wikipedia.org/wiki/Distancia_euclidiana para un mayor detalle.

28 NIST/SEMATECH, 2006, "e-Handbook of Statistical Methods"

<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35e.htm> .

tesituras no utilizadas en los instrumentos orquestales clásicos).

		Grupo predicho		
		Baroque	Classic	Romantic
Grupo real	Baroque	79%	20%	1%
	Classic	7%	89%	3%
	Romanticism	9%	20%	71%

Tabla 3: Porcentaje de éxito en cada grupo analizado.

La aplicación de análisis estadístico ha emitido 47 *warnings* o avisos informando de las variables cuya correlación es alta con respecto a otras variables. Las variables con correlación alta están enumeradas en la Tabla 4.

Tipo de variable	Variables	Comentarios
Frecuencia de notas	C, Cs, D, E, F, Fs, G, Gs, A, As	Todas las variables del tipo
Frecuencia de intervalos	11,12,15,17,1+1,1+1+,1+2,21,22,22+,23,25,2+2,2+2+,2+3,2+4,32,33,34,35,42,42+,43,44,45,4+3,4+4+,4+5,51,53,54,54+,55, 56	"11" es la etiqueta de la variable que almacena el porcentaje de veces que la nota "1" es seguida por una nota "1"
Frecuencia de octavas	O4, O5, O6	

Tabla 4: Variables altamente correlacionadas con otros predictores.

La Tabla 5 muestra las distancias cuadráticas promedio de todos los experimentos entre los centroides de los grupos de la muestra (la mitad de las piezas utilizadas para clasificar la otra mitad de piezas).

Barroco	0,00		
Clasicismo	18,06	0,00	
Romanticismo	61,72	48,12	0,00
	Barroco	Clasicismo	Romanticismo

Tabla 5: Distancia entre los centroides de los grupos analizados.

La distancia cuadrática entre un grupo y si mismo es lógicamente 0,00 y se puede observar que el estilo barroco y el romántico son los que tienen una mayor distancia cuadrática entre ellos y a la vez, que la distancia entre estilo barroco y clásico es mayor que la distancia entre el estilo clásico y romántico.

Las 10 variables que según el análisis discriminante más peso tienen en la función discriminante lineal en todos los experimentos realizados están identificadas en la Tabla 6 y las 10 variables que tienen un menor peso están enumeradas en la Tabla 7.

Variable	2+6+	26+	56+	66+	36+	16+	76+	52+	46+	5+6+
Explicación respecto a la tonalidad de Do Mayor	D#-A#	D-A#	G-A#	A-A#	E-A#	C-A#	B-A#	G+D#	F-A#	G#-A#

Tabla 6: 10 variables con más relevancia en la función discriminante lineal.

Variable	1+7	5+7	4+7	2+7	6+7	D	As	Ds	G	37
Explicación respecto a la tonalidad de Do Mayor	C#-B	G#-B	F#-B	D#-B	A#-B	D	A#	D#	G	E-

Tabla 7: 10 variables con menos relevancia en la función discriminante lineal.

Análisis de falsos negativos

El análisis de los “falsos negativos” realiza una valoración de los posibles motivos que ha provocado que una pieza de un estilo concreto (por ejemplo clásico) sea considerada por el método como no perteneciente a este estilo (considerándola de estilo barroco o romántico).

Los datos calculados para realizar el análisis de falsos negativos se han centrado en analizar por separado las formas musicales, los compositores i la magnitud de las obras.

La Tabla 8 resume el porcentaje de piezas de las muestras de cada estilo musical clasificadas incorrectamente cuyo número de notas es inferior a 1000. Se ha seleccionado el valor de 1000 notas porque todas las piezas de una magnitud pequeña (piezas de juventud) tienen un número de notas inferior a dicho valor. Los valores mostrados son el promedio de todos los experimentos realizados.

Estilo musical	Porcentaje promedio de piezas con menos de 1000 notas.	Variación
Barroco	33,50%	1,942
Clasicismo	20,00%	0,246
Romanticismo	15,80%	1,298

Tabla 8: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente con menos de 1000 notas respecto el total de piezas clasificadas incorrectamente en las muestras de cada estilo musical.

La Tabla 9 resume los porcentajes de piezas clasificadas incorrectamente de cada compositor respecto el total de piezas en la muestra de predicción de cada compositor. Los valores mostrados son el promedio de los valores obtenidos en todos los experimentos realizados. También se muestra la varianza de los valores obtenidos en todos los experimentos.

Clasicismo			Barroco			Romanticismo		
	%	Var.		%	Var.		%	Var.
Haydn	6,5%	0,12	Bach	5,7%	0,01	Schumann	22,1%	0,38
Mozart	6,7%	0,04	Händel	12,9%	0,18	Brahms	11,5%	0,29
			Vivaldi	18,0%	0,04	Dvořák	13,0%	0,98

Tabla 9: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente respecto el total de piezas clasificadas incorrectamente de cada compositor.

La Tabla 10 resume los porcentajes de piezas clasificadas incorrectamente por cada forma musical de las analizadas en el periodo Clásico respecto el total de piezas de dicha forma en la muestra de predicción del periodo Clásico. Para cada forma musical (sonata, cuarteto y sinfonía) se analizan por separado sus movimientos.

Forma musical	Movimiento	% clasificado incorrectamente	Variación
Cuartetos de cuerda	1º	4,76%	0,457
	2º	9,81%	0,338
	3º	10,55%	0,573
	4º	6,57%	0,211
Sonatas para piano	1º	5,34%	0,014
	2º	5,23%	0,133
	3º	2,90%	0,015
Sinfonías	1º	1,40%	0,020
	2º	4,76%	0,070
	3º	13,12%	0,381
	4º	7,26%	0,108

Tabla 10: Porcentaje promedio de piezas clasificadas incorrectamente de cada movimiento de cada forma musical respecto el número total de piezas de dicha forma musical.

En la Tabla 11 se resumen en base a la instrumentación, los porcentajes de falsos negativos respecto el total de piezas de dicha instrumentación en los subconjuntos de piezas barrocas y románticas. Los valores mostrados son los valores promedio de todos los experimentos realizados. También se muestra la varianza de los promedios en los diferentes experimentos.

Instrumentación	Barroco		Romanticismo	
	Porcentaje promedio de falsos negativos	Variación	Porcentaje promedio de falsos negativos	Variación

Piezas para piano solo	8,5%	0,11	15,6%	0,001
Piezas para otros instrumentos solos	12,8%	0,45	-	-
Piezas orquestales	13,9%	0,17	16,2%	0,03
Piezas de cámara	-	-	8,9%	0,65

Tabla 11: Porcentajes promedio de piezas clasificadas incorrectamente respecto el total de piezas procesadas de cada instrumentación.

Discusión

Queda demostrado que en el experimento, que las frecuencias de uso de notas no son variables suficientemente discriminantes para realizar una clasificación por género aceptable.

Se puede comprobar que los porcentajes de éxito son mayores cuanto mayor es la muestra de datos de cada estilo.

A pesar de haber considerado el porcentaje de uso de cada nota, los resultados demuestran que dichas variables no son consideradas como discriminantes del estilo musical (la mayoría de ellas están dentro de las 10 variables con menos peso en la función lineal).

En cualquier caso, los compositores elegidos en la muestra de compositores románticos es muy heterogénea (debido al periodo temporal compositivo que abarcan sus los compositores analizados) por lo que era lógico esperar en ella los resultados peores de porcentaje de éxito.

De todos los periodos objeto de estudio, el periodo romántico es el más difícil de acotar por tener un mayor alcance temporal y contar dentro del periodo con diferentes subestilos.

También era lógico esperar en este grupo una menor tasa de éxito ya que los caminos y normas de composición empezaron a ser más libres y las limitaciones en el arte de la composición se redujeron en el periodo Romántico.

En el cálculo del número de veces que aparece un intervalo 1+7 (C#-B normalizando la tonalidad a Do Mayor), se ha considerado como eje de coordenadas la tonalidad de la pieza, no la tonalidad en la que se encuentra el intervalo en ese momento (ya que probablemente habrá modulado a otra tonalidad). De este modo y de manera implícita, quedan consideradas las tonalidades a las que la pieza modula²⁹.

Cabe destacar en cualquier caso, que queda demostrada la evolución compositiva ya que el porcentaje de piezas clasificadas como barrocas siendo románticas tienen los valores más pequeños.

La heterogeneidad de las muestras en cuanto a la forma musical y a la orquestación de sus elementos avanza un paso más para identificar factores

29 Consultar [http://es.wikipedia.org/wiki/Modulación_\(música\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Modulación_(música)) para mayor detalle.

objetivos ver (tabla 6) y cuantificables que expliquen de una manera más concreta cuales son los factores identificativos de los estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

El número de variables excesivamente correlacionadas es consecuencia deducible de las propiedades resumidas en la Figure 3.

Investigaciones futuras

Los resultados de este estudio permitirán continuar investigando para aplicar este método a casos de autoría dudosa de una pieza entre dos posibles autores, estableciendo indicadores numéricos que permitan avalar o refutar la autoría de uno u otro compositor.

Otro trabajo futuro, sería incorporar otras formas musicales (sinfonías, óperas, oratorios etc.) y otros compositores y estilos musicales (Romanticismo, Barroco etc.) al estudio.

Otro trabajo futuro sería desarrollar el estudio utilizando piezas compuestas en modo menor.

Una aplicación futura del método sería adaptarla y definir las condiciones de aplicación del método propuesto en este artículo para cuantificar numéricamente en qué medida un compositor incorpora en sus obras influencias de otros compositores clasificando sus obras en base a una muestra de obras musicales de los compositores A y B que aportan su influencia en el compositor estudiado. El mayor porcentaje de obras que sean más próximas al compositor A frente al compositor B indicará una mayor influencia del compositor A sobre el compositor estudiado.

Conclusiones

El método presentado en este artículo permite clasificar piezas musicales clásicas en base a los porcentajes de uso de cada uno de los intervalos melódicos posibles, considerando los intervalos melódicos en su forma absoluta (nota inicial y nota final en términos absolutos en base a la tonalidad de la pieza).

La heterogeneidad de las muestras en cuanto a la forma de los elementos da un primer paso para identificar factores objetivos y cuantificables (ver Tabla 6) para explicar de una manera más concreta cuales son los factores identificativos de los estilos musicales Barroco, Clásico y Romántico.

El método presentado en este artículo es capaz de pronosticar con unos índices promedio de éxito del 80% la pertenencia de una pieza musical a su estilo (Barroco, Clásico o Romántico) utilizando como valores indicadores el porcentaje de uso cada uno de los 144 intervalos melódicos posibles (intervalos melódicos entendidos en términos absolutos).

El método presentado en este artículo cuantifica la distancia entre los grupos dando como resultado la distancia mayor entre los grupos de Barroco y romántico

como es lógico por estar más distantes en el tiempo, sin embargo aporta una valoración numérica que demuestra que el estilo romántico es más distante al clasicismo que este segundo al estilo barroco.

El presente método permite que la selección de las piezas musicales de la muestra de referencia sea independiente de la tonalidad de la pieza, su compositor, su duración, su forma y estructura musical así como su orquestación, pero dependiente del modo de su tonalidad (Mayor o menor).

Las probabilidades de éxito del método son mayores discriminando estilos con una mayor rigidez formal y compositiva como son el periodo Barroco y el periodo clásico.

Otra conclusión del estudio y en consonancia con los principios de la estadística es que cuanto mayor sea el número de piezas incluidas en la muestra de piezas discriminante mayor será la tasa de éxito del método.

El método presentado en este artículo iguala los resultados obtenidos con otros métodos pero lo hace de una manera más homogénea ya que utiliza todos los porcentajes de uso de todos los intervalos melódicos posibles y basa el resultado en un único concepto, el recuento total de sus intervalos melódicos.

Bibliografía

- Anonymous, February 2006, "(.mid) Standard MIDI File Format", <http://faydoc.tripod.com/formats/mid.htm>, downloaded on September 22, 2009
- Anonymous, n.d., "Standard MIDI File (SMF) Format", <http://www.blitter.com/~russtopia/MIDI/~jglatt/tech/midifile.htm>, descargado en Septiembre 22, 2009
- Classical Archives LLC, n.d., "The Ultimate Classical Music Destination", <http://www.classicalarchives.com>, descargado entre Mayo 2007 y Mayo 2010
- Cruz-Alcázar, P. P., E. Vidal, and J. C. Pérez-Cortes, "Musical style identification using grammatical inference", CIARP 2003, 2003
- Ferkova Eva, Ždimal Milan, and Šidlik Peter, 2008 "Tonal Theory for the Digital Age", ISBN-13: 978-0-936943-17-6
- Guo E., 2008, "Proyecto Biblioteca Internacional de Partituras Musicales (IMSLP)", <http://imslp.org>
- Heng-Tze Cheng, Yi-Hsuan Yang, Yu-Ching Lin, I-Bin Liao*, and Homer H. Chen, "Automatic chord recognition for music classification and retrieval", IEEE International Conference on Multimedia & Expo 2008
- Hofstetter Fred T., "The Nationalist Fingerprint in Nineteenth Century Romantic Chamber Music". in Computers and the Humanities 13, 1979, North-Holland Publishing Company
- McKay C., Fujinaga, "Automatic music classification and the importance of instrument identification", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2005
- McKay C., Fujinaga I., "jSymbolic: A feature extractor for MIDI files", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2006
- McKay, C., and I. Fujinaga, "Style-independent computer-assisted exploratory analysis of large music collections", Journal of Interdisciplinary Music Studies 1 (1), 2007
- NIST/SEMATECH, 2006, "e-Handbook of Statistical Methods",

<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35e.htm>

- Ponce de Leon, P. J., y J. M. Iñesta, "Statistical description models for melody analysis and characterization.", Proceedings of the International Computer Music Conference, 2004
- Prisa Digital S.L., n.d., "La música del Clasicismo" , http://www.kalipedia.com/arte/tema/caracteristicas-clasicismo-musical.html?x=20070822klpartmsc_109.Kes&ap=0
- Typke R., Wiering F. Veltkamp R., "A survey of music onformation retrieval systems.", ISMIR Proceedings, 2005
- Tzanetakis G. Ermolinskyi A, Cook P., "Pitch histograms in audio and symbolic music information retrieval", Journal of New Music Research, June 2004
- Vernon P.E., THE PERSONALITY OF THE COMPOSER , Music and Letters, 1930, doi:10.1093/ml/XI.1.34
- Wikipedia , n.d., "MIDI Standard Definition" , <http://es.wikipedia.org/wiki/MIDI>

Antonio Tudurí Vila toni.tuduri@uib.es

Ingeniero en Informática por la UIB (1988-1995), Máster en T.I.C. UIB (2009-10), Título profesional de violín por el *Conservatori Professional de les Illes Balears* (1978-88). Es director del Departamento TIC de la *Escola d'Hoteleria de les Illes Balears* desde 1995. (www.ehib.es) y profesor asociado al Departamento de Matemáticas e Informática la *Universitat de les Illes Balears* desde el año 2000. Ha sido profesor asociado al *Conservatori Superior de Música de les Illes Balears* (cursos 2000-2002) Profesor de violín en diferentes escuelas de música en Palma de Mallorca y es violinista profesional de la OCIM desde su fundación en 1998 (www.menorcaweb.net/jmdemao/ocim/) la cual le ha estrenado diferentes arreglos de oberturas de óperas de Händel.

Bartomeu Serra Cifre tomeu.serra@uib.es

Es licenciado en Ciencias Físicas en la especialidad de electrónica por la Universidad de Navarra el año 1976. Es doctor por la Universidad de las Islas Baleares (UIB) desde 1984 i es catedrático de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial en la UIB. Desde el año 1979 es profesor de la *Universitat de las Islas Baleares*. Nombrado en 1985 director del *Servei de Càlcul i Informatització* de la UIB. Ha sido miembro de la Junta rectora del *Institut Municipal d'Informàtica* del Ayuntamiento de Palma, miembro del comité científico del CITTIB, miembro del comité administrativo EMISA, asesor en materia tecnológica de la UPNA, Asesor de SPRITEL y presidente de INLEA.

Joan Company Florit joan.company@uib.es

Licenciado en Filosofía y Letras (Sección Geografía e Historia) Universidad de Barcelona 1978. Tesis de Licenciatura "La *Capella Clàssica* y Joan Maria Thomàs" UIB. Director i fundador de la Coral de Sant Joan (Mallorca) 1975 - 1980. Director i fundador de la *Coral Universitat de les Illes Balears* desde el curso 1976. Director titular del "Coro de la Orquesta Sinfónica de Galicia" desde la temporada 1998-99. Ha dirigido, entre otros coros y orquestas: Orquesta de Cámara Reina Sofía, Orquesta Simfònica de Balears Ciutat de Palma, *The Portland State University Orchestra* (EUA), *Camerata Anxanum* (Itàlia), Orquesta Sinfónica de Galicia, Coro Nacional de España, Coro de la Radio Televisión Española, Coro de la Comunidad de Madrid, Orfeón Donostiarra, *Coro da Camera Italiano* (Roma). Es Director de la *Partituroteca i Centre de Documentació Musical de la UIB* desde 1997. y de la colección de partituras de compositores de las Islas Baleares *La Nostra música* (con 29 títulos publicados).