



Universidad de los Andes
Centro de Física Fundamental
Área de Caos y Sistemas Complejos

**Un Nuevo Método de Sonificación
para la Minería de Datos de
Series Temporales**

www.bdigital.ula.ve

Trabajo de grado presentado ante la ilustre
Universidad de Los Andes
como requisito parcial para optar al Título de:
Licenciado en Física

Presentado por:
Br. Antonio N. Arcano A.

Tutor:
Dr. Kay Tucci

Mérida, Marzo del 2017

Dedicado a:

Los que vendrán.

www.bdigital.ula.ve

Reconocimiento-No comercial-Compartir igual

Agradecimientos

Durante el periodo de mi carrera universitaria muchos fueron los factores y personajes que ayudaron a mi formación como profesional. Tantos que no sabría por donde empezar. Y sin embargo, existen algunos que no puedo dejar de nombrar, pues sin ellos en especial, para mí, muchas cosas no serían iguales.

Un agradecimiento al Grupo de Caos y Sistemas Complejos de la Facultad, cuyo ambiente y enseñanzas facilitaron mi aprendizaje e interés por desarrollar aún más mi perspectiva del cosmos. A los profesores Mario Cosenza y Maryelin Uzategui.

Un especial agradecimiento a mi tutor Kay Tucci, por ser un ejemplo admirable tanto en el ámbito profesional como personal. Las enseñanzas y perspectivas lógicas inculcadas en mí, sobre todo en el área de programación, son algo que nunca olvidaré.

Finalmente, agradezco a mi madre. Cuyo soporte y cariño hizo posible mí desarrollo. A ella en especial: *gracias*.

www.bdigital.ula.ve

Resumen

Se presenta un nuevo método de sonificación determinista al que llamamos “melodización de series temporales”. El método se basa en la traducción univoca de datos de una serie temporal en una secuencia de sonidos, ajustándolos posteriormente a un cierto compás y ritmo, obteniendo así una melodía más agradable al oído, haciendo analogía entre la distribución de eventos en la serie temporal y su correspondiente composición musical, ya que ambas siguen una ley de potencias o ley de Zipf generalizada. Este método se aplicó a cuatro series temporales, cada una correspondiente al precio de cierre en la bolsa de valores de Nueva York, entre el periodo 2000-2010, del Dow Jones Industrial Average, Microsoft Corporation, el Oro y el Petróleo, obteniendo cuatro melodías únicas, con las cuales se procedió a evaluar auditiva y gráficamente, mediante dos pruebas y un periodo de entrenamiento, en el que participaron varios sujetos de prueba. Realizando un primer test al comienzo y otro después del entrenamiento de dos semanas, para así determinar la efectividad de este nuevo método. Las pruebas se enfocan en la parte auditiva a la hora de reconocer, reproducir y predecir los diferentes patrones notas de las series temporales utilizadas. Se obtuvo como resultados, luego de haber escuchado y visto una única vez las series, una probabilidad de 0.29 de que el primer test haya sido llenado de forma aleatoria, mientras que esta probabilidad cayó al 0.05 luego del entrenamiento en el segundo test, observando una mejora significativa en los aciertos para el test luego del entrenamiento. Concluyendo entonces que nuestro método de melodización de series temporales produjo un aprendizaje en los individuos que se entrenaron.

Palabras clave: *Sonificación, Series Temporales, Ley de Zipf, Música, Melodización.*

Índice general

Resumen	I
Introducción	1
1. Melodización de Series Temporales	4
1.1. Sonificación	4
1.1.1. Tipos de Sonificación	5
1.2. Ley de Zipf	9
1.2.1. La Ley de Zipf Generalizada	10
1.2.2. Ley de Zipf en Obras Musicales	11
2. Un Nuevo Método de Sonificación	13
2.1. Definiendo Patrones Básicos de una Serie Temporal	13
2.2. Análisis de los Patrones Básicos	16
2.2.1. Cálculo del Exponente de Zipf	17
2.3. Escuchando las Series Temporales	18
2.3.1. Compás y Ritmo	20
3. Montaje Experimental, Aplicación del Método y Resultados	21
3.1. El Montaje Experimental	21
3.1.1. El Test	22
3.1.2. El Entrenamiento	24
3.2. Análisis de Resultados	25
Conclusiones y Recomendaciones	29
Bibliografía	31
Apéndices	33

“Begin at the beginning,” the King said, very gravely, “and go on till you come to the end: then stop.”

Lewis Carroll, Alice in Wonderland.

Introducción

Los humanos siempre han buscado la forma de percibir el cosmos en cada uno de sus aspectos, siendo prácticamente imposible entenderlo sin la herramienta adecuada. Sin esa analogía o metáfora que simplifique a nuestros términos aquello que observamos. La capacidad de extraer información de lo que percibimos es lo que define la realidad a nuestro alrededor. Poder analizar dicha información de cierta forma y darle un sentido concebible es el primer paso en la adquisición de una perspectiva, incluso si es de forma indirecta, mediante herramientas que nos permitan vislumbrar aquello que sospechamos que existe, pero cuya interacción y efectos no son del todo evidentes. Por esta razón es importante facilitar la información a los sentidos, buscando siempre nuevas formas de simplificar la interacción, con tal de entenderla.

Desde la invención del contador Geiger en 1908, el cual posee un tubo con gas a baja presión, donde cada partícula detectada produce un pulso de corriente que ioniza el gas, produciendo así un clic de audio, permitiéndonos detectar rápidamente si hay o no radiación y en qué intensidad. Muchos han sido los trabajos realizados con este enfoque auditivo, como por ejemplo: detectores de actividad volcánica [1], detectores climáticos [2], espaciales [3], de células cancerosas [4], así como la detección de ondas gravitacionales [5], entre otros.

Así como la vista es la herramienta ideal para reconocer patrones espaciales, el oído lo es para las cosas que avanzan en el tiempo. Esta ventaja evolutiva puede probar ser de gran utilidad a la hora de entender datos de series temporales, que hasta ahora se acostumbra a estudiar de forma visual. Para ello se aplican técnicas que nos permiten transformar los datos en sonidos, y a su vez, la información que subyace en ellos. A estas técnicas se les conoce como sonificación, las cuales presentan una nueva perspectiva a la hora de analizar los datos, siendo privilegiada la forma auditiva en vez de la visual.

En 1992 fue fundada la International Community for Auditory Display (ICAD) por Gregory Kramer. La ICAD es un foro para la investigación, experimentación y exhibición auditiva que incluye la sonificación de datos. Desde entonces, la ICAD se ha convertido en un sitio de encuentro para los investigadores de diversas disciplinas que desarrollan nuevas técnicas para entender mejor lo que nos rodea.

Nuestro trabajo se enmarca en esta área y, se enfoca en la suposición de que existe cierta estructura presente en los patrones de las series temporales, tal como sucede en las composiciones musicales. Si se establece una equivalencia estadística basada en la distribución de probabilidad intrínseca a los patrones de series y composiciones, se podrían parear a las distribuciones que se les conoce la ley de potencias o ley de Zipf [6], la cual es ampliamente estudiada en un contexto literario, mostrando ese aspecto y estructura única referente a cada cuerpo literario individual [7], pero que en este caso utilizaremos en un contexto musical.

Una vez caracterizadas las series temporales a estudiar, utilizaremos el exponente de Zipf para parear cada serie con una de las 217 composiciones caracterizadas previamente [6]. Teniendo como restricción que el número de notas sea mayor o igual al número de patrones detectados en la serie. Este proceso da como resultado un audio en el cual se puede escuchar, dicho de forma simple, la serie temporal escogida, pero con las notas del compositor que mejor se ajuste a ella.

Lo que nos lleva a formular la hipótesis de:

Si el oído es capaz de ser entrenado, para adquirir la información contenida en series temporales, haciendo uso del nuevo método de sonificación desarrollado en este trabajo. Para ello transformamos dichas series en audios, ajustándolas posteriormente a ciertos estándares musicales, como el compás y el ritmo.

Siendo entonces nuestro objetivo principal el corroborar, o refutar, todos los aspectos referentes a la hipótesis planteada. Por lo que realizamos el diseño experimental que aplicamos a un grupo de personas con un conjunto de series. Este documento está organizado de la siguiente forma: en el capítulo 1 se presenta un marco teórico, con los conceptos fundamentales que servirán de pilares a la hora del desarrollo y entendimiento de nuestro nuevo método de sonificación. Explicando de manera resumida en que consiste la sonificación y los tipos que existen, así como la ley de Zipf y como es que ésta puede ser generalizada [8], para luego implementarse en un contexto musical [9]. También hablaremos de algunas propiedades interesantes, como lo son los fenómenos libres de escala [10], que engloban a los comportamientos caracterizados por la ley de Zipf.

En el capítulo 2 se presenta de forma detallada el nuevo método de sonificación desarrollado, caracterizando los elementos básicos en una serie temporal, explicando el uso y desarrollo de varios programas creados en diferentes lenguajes de programación. Basándonos en los conceptos antes expuestos, correlacionamos la sonificación musical con la distribución de patrones mediante la ley de Zipf, usando la analogía que existe entre patrones de datos de las series temporales y ciertos compositores. Luego refinamos esta transformación a ciertos estándares musicales para su posterior aplicación experimental.

En el capítulo 3 se presenta el montaje experimental utilizado, su aplicación y resultados. Mostrando el esquema utilizado a la hora de probar el método, de la forma más simple y eficiente: mediante un test corto y un periodo de entrenamiento. Haciendo énfasis en el análisis de dichos resultados. Discutiendo finalmente las conclusiones, implicaciones y recomendaciones consecuentes a este trabajo.

www.bdigital.ula.ve

“It’s a dangerous business, Frodo, going out your door. You step onto the road, and if you don’t keep your feet, there’s no knowing where you might be swept off to.”

J.R.R. Tolkien

Capítulo 1

Melodización de Series Temporales

Este capítulo se centra en los aspectos teóricos fundamentales para entender el nuevo método de sonificación propuesto, haciendo uso de la sonificación musical, así como las propiedades que describe la ley de Zipf, correlacionando ambas definiciones mediante bases estadísticas. También mencionaremos un poco a los fenómenos críticos auto-organizados (SOC), plasmando así en general el contexto empleado a lo largo de este documento.

1.1. Sonificación

La sonificación describe el uso del sonido no pronunciado que transmite información. Es un proceso mediante el cual se transforman datos a sonidos con la finalidad de facilitar su interpretación, ofreciendo así una alternativa o complemento auditivo a las técnicas que se enfocan en la parte visual. Por ejemplo, la velocidad de clic de un contador Geiger transmite el nivel de radiación en la vecindad inmediata del dispositivo [11]. Aunque muchos experimentos con sonificación de datos han sido explorados en foros tales como la International Community for Auditory Display (ICAD), la sonificación aún enfrenta muchos desafíos a un uso generalizado para presentar y analizar datos [12].

1.1.1. Tipos de Sonificación

La sonificación puede clasificarse en tres tipos: icónica, directa y musical [13]. La primera consiste en asignar datos a sonidos que están asociados con ciertos fenómenos. Por ejemplo, si reunimos datos meteorológicos, como área que cubren las nubes, la temperatura y la humedad, para calcular la probabilidad de lluvia mañana, y luego usáramos el sonido de la lluvia para indicar cuándo hay una alta probabilidad de lluvia, entonces estaríamos haciendo uso de la sonificación icónica.

Por su parte, en la sonificación directa se transforman datos a sonido para escuchar los patrones presentes en los datos. Por ejemplo, datos de ondas electromagnéticas transformados en ondas acústicas. Esta conversión por sonificación directa puede ser tan simple como reescalar las frecuencias para llevarlas al rango acústico. Otros tipos similares de datos, como los de las ondas espaciales han sido sonificados desde la década de 1890 [14].

Finalmente, el tercer tipo de sonificación es la musical, que transforman datos a sonidos pero de una forma musical. Por ejemplo, con ayuda de un software de computadora la NASA convirtió los datos de partículas muy rápidas, las cuales son capturadas por instrumentos alojados en 2 satélites en órbita terrestre, llamados Helios 1 y Helios 2, los cuales hacen sonidos de campana cada vez que hay un pico de detección, teniendo como resultado una reconstrucción 3D, ver figura 1.1. De hecho, muchos músicos han utilizado la sonificación musical basados en los datos provenientes del espacio, generando piezas musicales completas [15].

La sonificación musical es la que se presenta más natural y agradable al oído, facilitando su comprensión y análisis, por esta razón nos enfocaremos en ella durante lo largo del presente trabajo. Recalcando que los audios escuchados no se tratan de los datos directamente sonificados (sonificación directa), sino que presentan un proceso de transformación usando elementos musicales.

Siguiendo con el ejemplo de los satélites Helios 1 y 2, la NASA, usando el sonido de las campanas de la iglesia de la Universidad de California Berkeley como el elemento básico de esta sonificación, ha sonificado la densidad del viento solar desde el 7 de julio de 2007. La densidad del viento solar es el número de iones de hidrógeno, o protones por unidad de volumen. La figura 1.2 muestra 24 horas de datos que fueron comprimidos en 2 minutos de video (*ver apéndice 5*). El eje x corresponde al tiempo y el eje y a la densidad del viento solar.

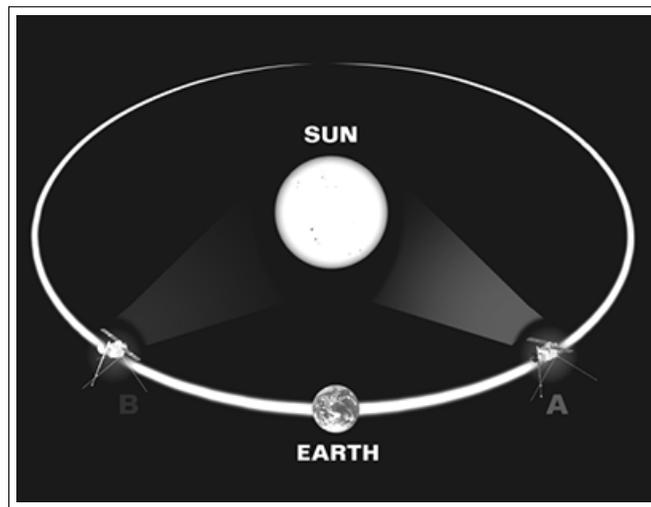


Figura 1.1: Esquema del proyecto STEREO para el estudio del viento solar, usando el método de sonificación.

Esta data está sonificada de tal forma que mientras mayor sea la densidad del viento solar, la disonancia también aumenta. Para escuchar el viento solar de baja y alta densidad, recomendamos escuchar y ver las películas de los *apéndices 6 y 7*.

La primera película muestra la sonificación al primer valor de densidad del viento solar ($0,5\text{cm}^3$), jugando ese valor como una densidad constante del viento solar hasta que se mueve al valor de densidad superior ($6,5\text{cm}^3$). Con este contraste, se hace más claro cómo hay más sonidos de campana en los vientos solares de mayor densidad. La segunda película muestra la segunda sonificación de estos datos. Nuevamente se utilizan las campanas, pero ahora se utiliza disonancia en las campanas, a diferencia de la primera sonificación. La alta disonancia se utiliza a menudo en la música en películas occidentales para indicar el terror, la violencia, entre otros. Por eso la NASA utilizó esta sonificación, ya que las tormentas solares con aumentos en la densidad del viento solar pueden causar apagones eléctricos en las ciudades, dañar satélites y naves espaciales, así como dañar a astronautas desprotegidos.

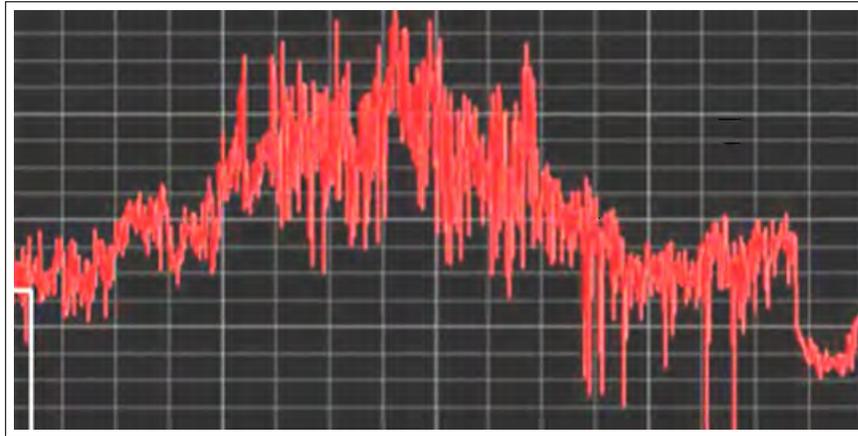


Figura 1.2: La imagen muestra la serie de 24h de observación comprimidas en un video de 2min de duración [14].

Otro ejemplo de sonificación musical clásico es el desarrollado por Dušan Kovář quien asignó notas musicales a las series de tiempo generadas al iterar un mapa logístico [16]. Los valores que puede tomar el mapa logístico $x_{t+1} = r(1 - x_t)$, están en el intervalo $[0, 1]$. Al dividir el intervalo en 12 subintervalos iguales podemos asignar uno de los 12 tonos de la octava central del piano, como se muestra en el cuadro 1.1.

Intervalo	Nota	Intervalo	Nota
0.00000 - 0.08333	Do	0.50000 - 0.58333	Fa#
0.08333 - 0.16667	Do#	0.58333 - 0.66667	Sol
0.16667 - 0.25000	Re	0.66667 - 0.75000	Sol#
0.25000 - 0.33333	Re#	0.75000 - 0.83333	La
0.33333 - 0.41667	Mi	0.83333 - 0.91667	La#
0.41667 - 0.50000	Fa	0.91667 - 1.00000	Si

Cuadro 1.1: Asignación de la nota correspondiente a cada uno de los subintervalo del rango $[0, 1]$ del mapa logístico, usada en la sonificación musical propuesta por Dušan Kovář [16].

Al variar el parámetro r del mapa la trayectoria de la serie de tiempo cambia su comportamiento. A pesar de que este comportamiento puede ser caracterizado al observar el patrón visual del diagrama de bifurcación, en este ejemplo sencillo se muestra como también a través del oído se podrían caracterizar los distintos comportamientos gracias a los distintos patrones de sonido que se producen, como se puede apreciar al escuchar el audio del *apéndice 8*.

También cabe mencionar el estudio de sismogramas usando la sonificación musical de Domenico Vicinanza de la Universidad de Salerno Italia, quien utilizó este método para escuchar los sismogramas del volcán Etna. El propósito de su trabajo fue intentar reconocer patrones musicales que indiquen que se acerca una erupción [1]. Como se aprecia en la figura 1.3, la técnica consiste en tomar el sismograma y superponerlo en un pentagrama con clave de sol y fa, obteniendo una melodía al asignar a cada dato una corchea en duración y un tono proporcional a la amplitud.

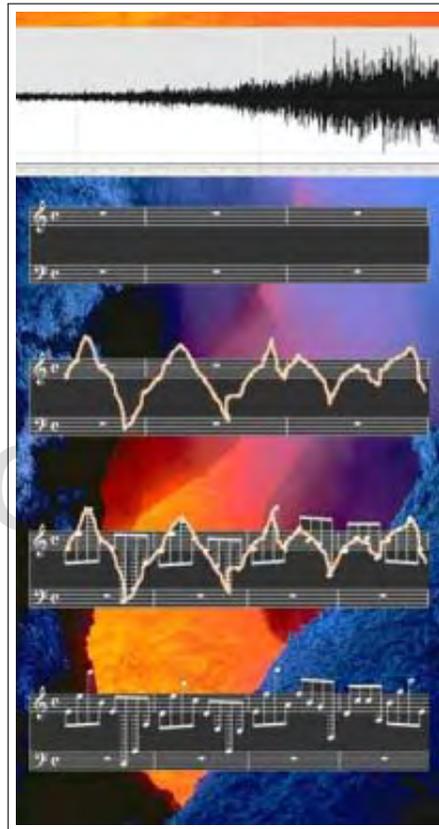


Figura 1.3: Sonificación musical de un sismograma usando la técnica de Domenico Vicinanza para apreciar de forma auditiva la actividad volcánica [1].

Se puede intuir, en especial aquellos que escucharon los archivos adjuntos que, la sonificación ofrece resultados interesante a la hora de analizar patrones temporales.

1.2. Ley de Zipf

La ley de Zipf es una ley empírica, formulada por el lingüista George Zipf en 1940 usando matemáticas estadísticas, que se refiere al hecho de que muchos tipos de datos estudiados en las ciencias físicas y sociales pueden ser aproximados con una distribución de Zipf. La ley de Zipf surge por la motivación que establece que “dado un cierto corpus de enunciados de lenguaje natural, la frecuencia de cualquier palabra es inversamente proporcional a su rango en la tabla de frecuencia”, que tiene la forma

$$f_k = \frac{f_1}{k^z} \quad ; \quad (1.1)$$

donde f_k es la frecuencia del elemento k ésimo, f_1 la frecuencia mayor elemento y z es el exponente de Zipf. Claramente la ley de Zipf es una ley de potencias, entonces la palabra más frecuente ocurrirá aproximadamente el doble de veces que la segunda palabra más frecuente, tres veces más que la tercera, etc. Por ejemplo, en la figura 1.4 se muestra la distribución de frecuencias en forma decreciente para el Brown Corpus

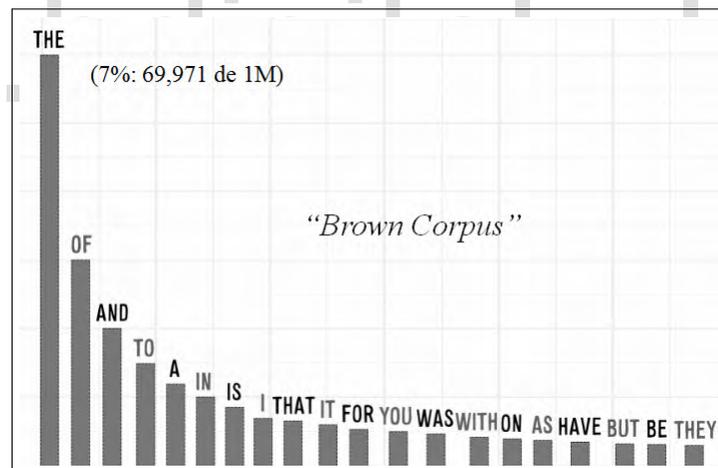


Figura 1.4: En el Brown Corpus Americano, en lenguaje inglés, la palabra “the” es la más frecuente, con un 7% de todas las ocurrencias, 69.971 de poco más de 1 millón, seguido de la palabra “of” con 3.5% de las ocurrencias [17].

Así, la palabra más frecuente ocurrirá aproximadamente el doble de veces que la segunda palabra más frecuente, tres veces más que la tercera palabra más frecuente, etc. Esta ley se presenta de forma emergente en todos los lenguajes, incluso en los no naturales como el esperanto. Su estudio ha sido ampliado en los últimos años, no solamente en la parte lingüística, sino que también en la referente a textos y literatura. Es importante destacar que el exponente de Zipf para cada cuerpo de datos es único y característico.

1.2.1. La Ley de Zipf Generalizada

La ley de Zipf puede ser generalizada para describir el comportamiento estadístico de muestras con T eventos y V tipos distintos de eventos. Basado en el modelo de generación de texto de Simon (1955), Zanette en el 2004 [8] demuestra que la ley de Zipf puede ser generalizada a la expresión

$$f_k = \frac{1}{(a + bk)^z} \quad ; \quad (1.2)$$

donde el índice de jerarquía k va desde 1 a V , $a = \frac{1}{f_1^z}$ y $b = \frac{1-a}{V}$, siendo f_1 la ocurrencia del evento más frecuente. La razón T/V cumple la relación

$$\frac{T}{V} = \frac{\nu(f_1^{\nu-1} - 1)}{(1 - \nu)(1 - \frac{1}{f_1^\nu})} \quad ; \quad (1.3)$$

donde $\nu = \frac{1}{z}$.

Para el caso de una obra literaria V es el número de palabras distintas y se denomina tamaño del léxico, mientras que T es el número total de palabras en la obra o longitud del texto. A medida que se procesa (lee) un texto tanto la longitud T como el tamaño del léxico V crecen y la relación entre ellos es $V \approx T^\nu$ con $0 < \nu < 1$.

Zanette concluye que un valor de cercano a 1 del exponente de ν corresponde a un léxico no uniforme que crece en la misma tasa que la longitud del texto. En este caso se tendría un texto sin estructura. Por lo tanto exponentes pequeños son indicativos de un léxico compacto que determina un contexto robusto, que permanece relativamente estable y bien definido conforme el texto evoluciona [8].

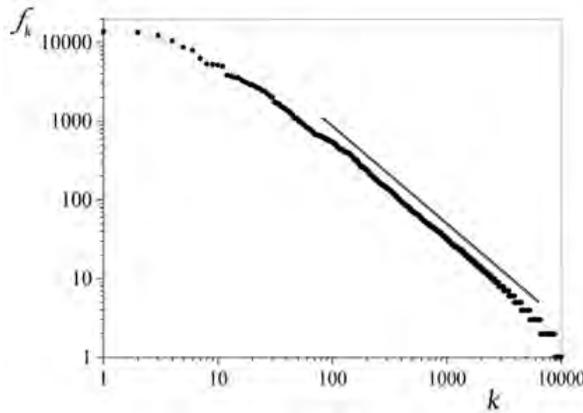


Figura 1.5: Análisis de Zipf para la obra David Copperfield de Dickens. Con exponente de Zipf de $z = 1.10$ [6].

La figura 1.5 muestra el número de ocurrencias versus el rango k para la obra David Copperfield de Dickens. En esta obra, el número de palabras diferentes es $V = 13.884$ y la longitud del texto es $T = 362.892$ palabras. La línea recta muestra la ley de potencias que se ajusta para valores grandes de k . La curva gruesa punteada es el ajuste a los datos de la ley generalizada de Zipf de la ecuación (1.3).

1.2.2. Ley de Zipf en Obras Musicales

Si pensamos que las notas son para una composición lo que las palabras son para una obra literaria entonces podemos jerarquizar las notas según su abundancia y obtener la distribución f_k correspondiente. Definiendo una nota como: **nota** = [Duración,Tono], en su trabajo de generalizar la ley de Zipf, Zanette clasificó las notas de composiciones almacenadas en formato MIDI para determinar la distribución f_k de un conjunto de composiciones clásicas para piano. Analizando las distribuciones de las obras literarias y las composiciones musicales él estableció una analogía entre el tipo de estructura de las obras literarias y los tipos de composición tonal y atonal [9].

En la figura 1.6 se ven las distribuciones de f_k para cuatro composiciones para piano. Se aprecia que en todos los casos, las distribuciones no puede ser ajustada a una recta como en el caso de las palabras en la figura 1.5. Esto se debe en parte a que el número de notas T y número de notas diferentes V en las composiciones es pequeño en comparación a la muestra de palabras en un texto. Ajustando la ecuación 1.2 a las distribuciones f_k , Zanette clasificó las composiciones entre tonales y atonales, utilizando el exponente ν como discriminador, notando que las composiciones tonales exhiben un ν pequeño mientras que las composiciones atonales tienden a tener un ν mayor.

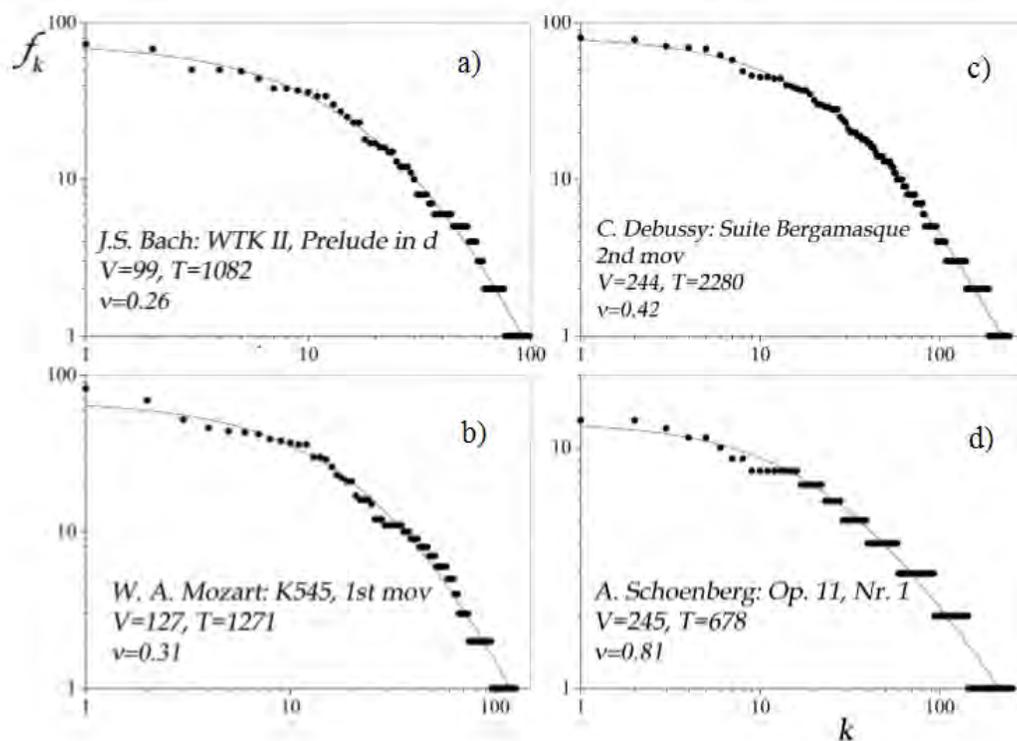


Figura 1.6: Cuatro composiciones de piano donde el exponente ν caracteriza que tan tonal o atonal es cada una.

En este punto es importante recordar que en obras literarias cuando es pequeño el contexto de la obra es robusto, mientras que cuando es grande el contexto de la obra tiene a perder sentido. Lo cual tiene analogía con la concepción de una composición tonal o atonal. Para obtener los valores V , T y f_1 de una composición contenida en un archivos MIDI de audio, se elaboró un programa en Java que utiliza un paquete de librerías conocido como: JMusic (<http://explodingart.com/jmusic/>). Este procedimiento se ampliará en el capítulo 2 de este documento.

Este comportamiento de los corpus literarios y composiciones forma parte de los fenómenos críticos auto organizados (SOC), que siguen una ley de potencias, son fenómenos libres de escala y pueden ser ajustado a una distribución de Zipf. Entre ellos los más conocidos son las avalanchas en una pila de arena [10], el principio de Pareto (ley del 80/20) [18], las ocurrencias sísmicas [19], apagones eléctricos [20], etc.

“It is change, continuing change, inevitable change, that is the dominant factor in society today. No sensible decision can be made any longer without taking into account not only the world as it is, but the world as it will be.”

Isaac Asimov

Capítulo 2

Un Nuevo Método de Sonificación

Este capítulo se centra en la explicación detallada del nuevo método de sonificación desarrollado, cómo es que modificando la sonificación musical, que ahora llamaremos "Melodización" [6], haciendo ciertos ajustes musicales, llegamos a tener un nuevo y más refinado medio para el análisis auditivo de series temporales. En este trabajo, las series temporales escogidas poseen naturaleza financiera, obtenidas de los valores de cierre diario de la bolsa de Nueva York durante el periodo de diez años 2000-2010 de Dow Jones Industrial Average, Microsoft, Petróleo y Oro.

2.1. Definiendo Patrones Básicos de una Serie Temporal

Primero, para analizar tanto las obras literarias como las musicales, realizaremos un estudio estadístico a partir de los elementos básicos que constituyen cada obra; **palabras** en el primer caso (despreciando los espacios, signos de puntuación y exclamación) y **notas** en el segundo (despreciando el timbre, el volumen y los silencios). La definición del elemento básico es arbitraria. Por ejemplo, en el caso de obras literarias podrían ser las letras, pares de palabras contiguas u oraciones.

En el caso de las series de tiempo los elementos básicos pueden ser los valores que toma la serie, las diferencias entre valores consecutivos, el signo del cambio o cualquier definición de patrones de dimensión fija o variable. Sin embargo, existen ciertas restricciones generales para seleccionar el elemento básico en las series de tiempo cuando se pretende establecer un paralelismo con obras musicales. En particular, el número de elementos básicos V deben ser aproximadamente iguales, lo cual descarta de entrada los valores en la serie ($V \approx T$), las diferencias consecutivas ($V \approx T$) y sus cambios de signo ($V = 2$).

Para estudiar las 4 series temporales escogidas en este trabajo, que se muestran en la figura 2.2, utilizaremos los **picos** de dichas series como elementos fundamentales, los cuales son característicos a todas ellas, definiéndolos de la siguiente forma:

1. Como se muestra en la figura 2.1, un pico de la serie financiera es el dato de la serie cuyo i vecinos inmediatos anteriores son crecientes e inferiores a él, mientras los j vecinos inmediatos posteriores son decrecientes.
2. A cada uno de estos picos se le asigna la etiqueta $P_{i,j}$ caracterizada por el par de índices $[i, j]$, donde i es la cantidad de datos que lo separan del pico anterior y j la cantidad de datos que lo separan del siguiente.
3. Se establece el conjunto $P = \{P_{i,j}\}$ de patrones diferentes que aparecen en la serie cuya cardinalidad es V . Contando el número de repeticiones de cada etiqueta $P_{i,j}$ en la serie se reordena el conjunto P en orden decreciente de frecuencia de aparición F_{ij} .

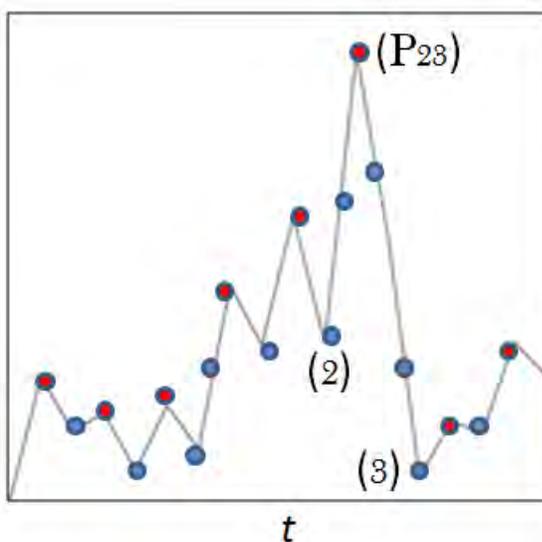


Figura 2.1: Esquema de la definición picos que son los elementos básicos para la técnica de melodización de series temporales propuesta en este trabajo.

Una vez establecido el conjunto de etiquetas P_{ij} , se reescribe la serie como una cadena de patrones (P^1, P^2, \dots, P^T) , donde el subíndice indica la posición de la etiqueta en el conjunto P ordenado según la frecuencia F_{ij} . Un ejemplo de cadena podría ser $(P_5, P_{12}, P_{V-2}, P_{54}, P_{1\dots})$. Nótese que al reescribir la serie como una cadena de patrones hay una pérdida de información que reduce el léxico V y la longitud T . El número de ocurrencias F_k de cada patrón P_k , puede ser normalizada como $\widetilde{F}_k = \frac{F_k}{F_1}$ con $k = 1, 2, \dots, V$.

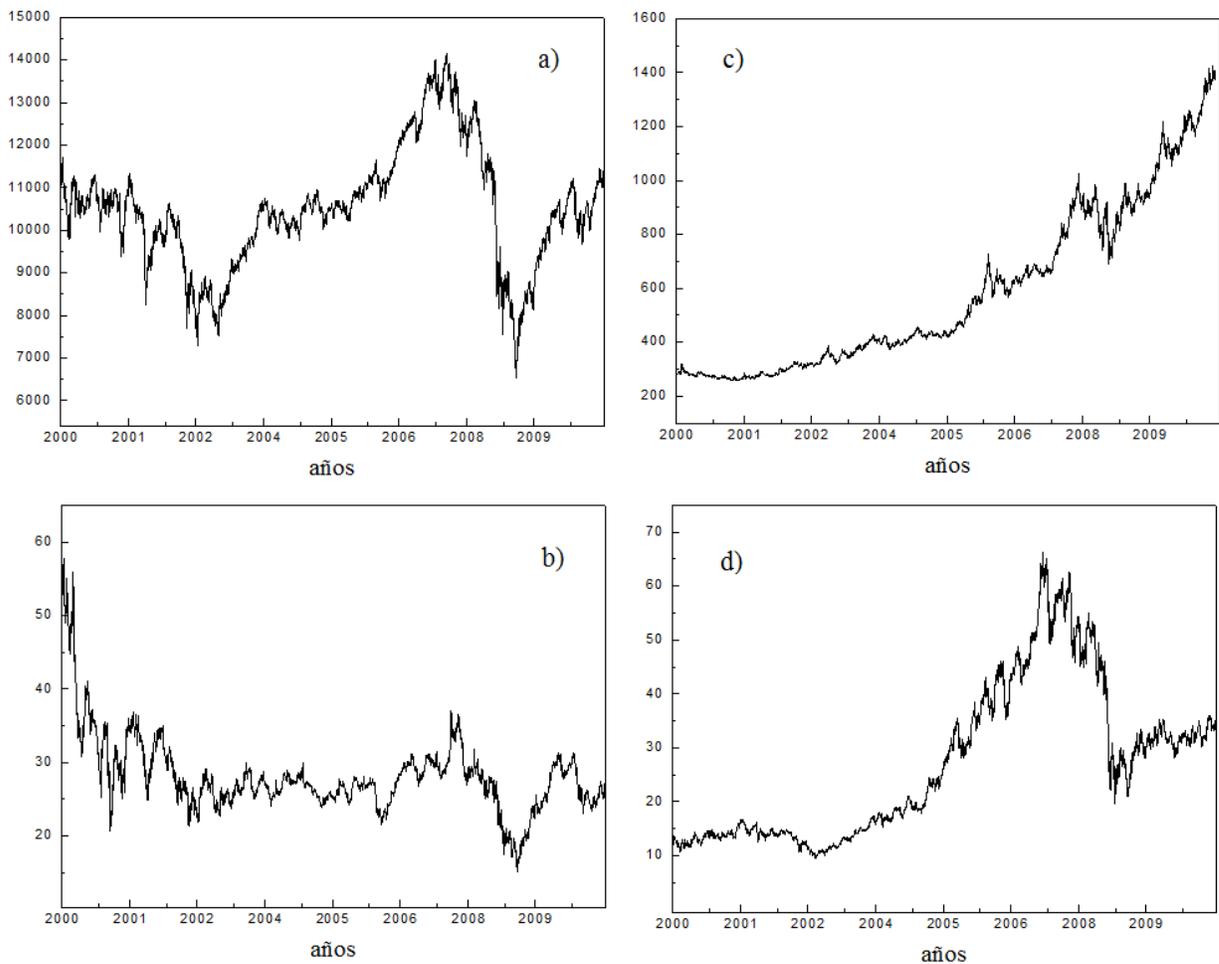


Figura 2.2: Evolución temporal de las 4 series financieras usadas en este trabajo, las gráficas muestran el valor diario en la bolsa de NY entre los años 2000-2010 de cada una de ellas, para: a) Dow Jones, b) Microsoft, c) Oro, d) Petróleo.

2.2. Análisis de los Patrones Básicos

Líneas atrás planteamos que las notas eran para la composición musical lo que las palabras son para una obra literaria. De la misma manera, ahora supondremos que los tipos de picos P_k son para la serie de tiempo lo que las notas son para una composición. Adicionalmente, en este contexto, el valor del parámetro ν puede clasificar las distintas series financieras utilizadas. Dado que caracteriza una buena imagen de la estructura y evolución de los elementos de la serie según ésta avanza en el tiempo.

Entonces, con el fin de obtener los valores V , T y f_1 , se desarrolló un programa basado en la definición de *pico* antes planteada en la sección 2.1, que a partir de una serie temporal identifica y cuenta las veces que aparece cada tipo de pico, ordenándolos luego de mayor a menor según su frecuencia de aparición (*ver apéndice 11*).

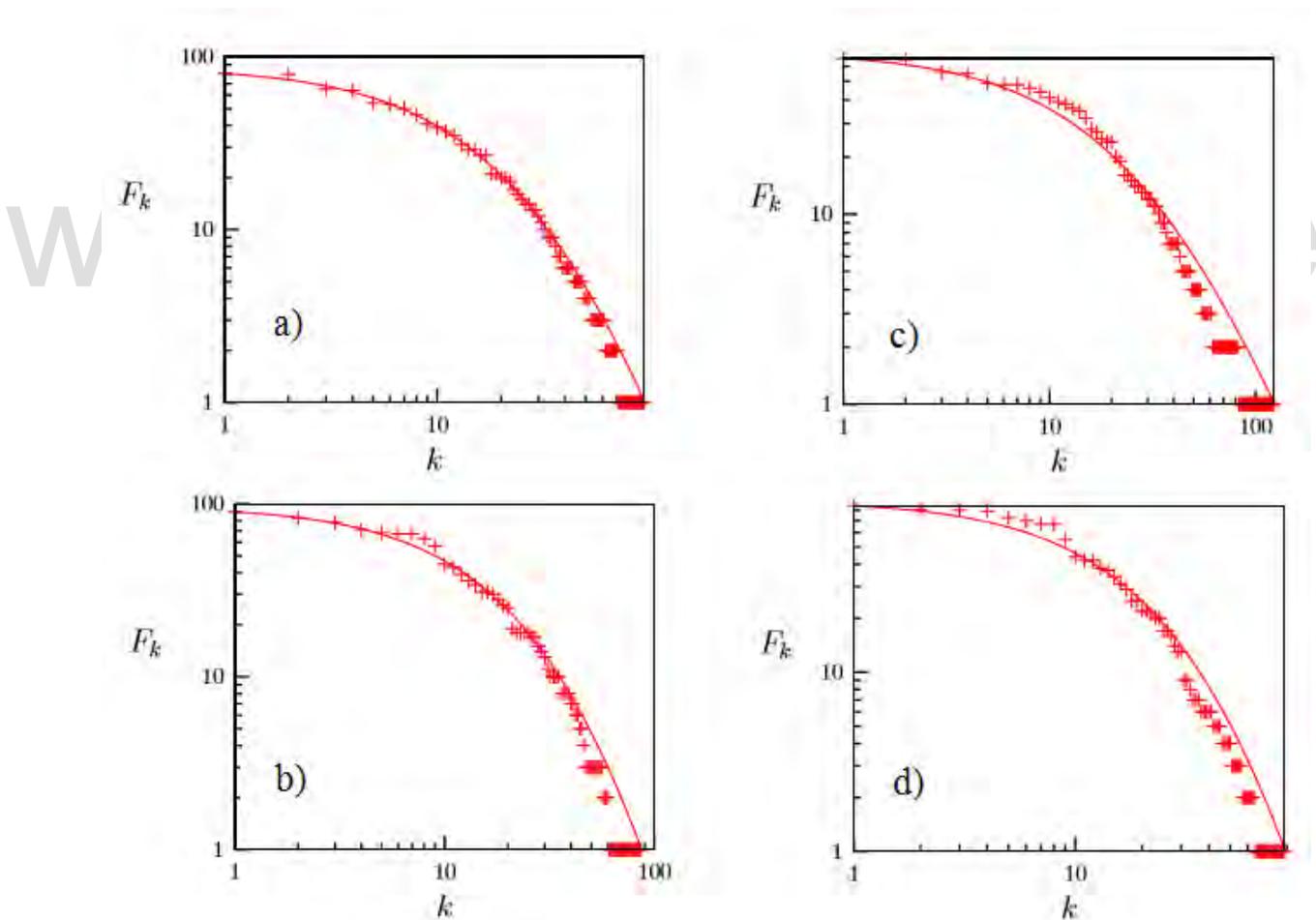


Figura 2.3: Distribución de frecuencias de los tipos de picos en las 4 series financieras: a) Dow Jones, b) Microsoft, c) Oro, d) Petróleo.

Adquiriendo los datos de las 4 series de yahoo finance: "http://finance.yahoo.com/", formato: *.csv* (*Comma Separated Values*) se procesan usando el programa mencionado anteriormente que está desarrollado en lenguaje Fortran para obtener 4 archivos de datos.

Por su parte, los datos de las composiciones musicales se obtuvieron de la tabla de datos desarrollada por Oliver Vielma en 2008 [6] (*ver apéndice 10*), una vez obtenido los datos estadísticos de nuestras series temporales recurrimos a dicha tabla como una base de datos de 217 composiciones para encontrar el análogo musical de su serie y así proceder a su melodización. Siendo el criterio de comparación la diferencia entre los exponentes de Zipf de la serie temporal y de la composición. Tomando como composición análoga a la serie, a aquella composición que minimice ésta diferencia.

2.2.1. Cálculo del Exponente de Zipf

Una vez conocidos V , T y f_1 de las 4 series temporales y de las 217 composiciones se desarrolló otro programa, esta vez en lenguaje C, que implementa el método de la prueba de Kolmogórov-Smirnov (*ver apéndice 9*), el cual ofrece una medida del ajuste de curvas de distribución como lo son las leyes de potencia [21].

La prueba de Kolmogorov-Smirnov es una prueba no paramétrica de la igualdad de las distribuciones de probabilidad continuas y unidimensionales, que pueden utilizarse para comparar una muestra con una distribución de probabilidad de referencia, o comparar dos muestras. La prueba cuantifica la distancia entre la función de distribución empírica de la muestra y la función de distribución acumulativa de la distribución de referencia, o entre las funciones de distribución empírica de dos muestras. Para una función de distribución acumulada $F(x)$ el estadístico es de la forma

$$D_n = \sup_x | F_n(x) - F(x) | \quad ; \quad (2.1)$$

donde \sup_x es el supremo del conjunto de distancias. Por el teorema de Glivenko-Cantelli [22], si la muestra $F_n(x)$ viene de la distribución $F(x)$, entonces D_n converge a 0 casi seguramente en el límite cuando el número de muestras que se tomen n tiende a infinito.

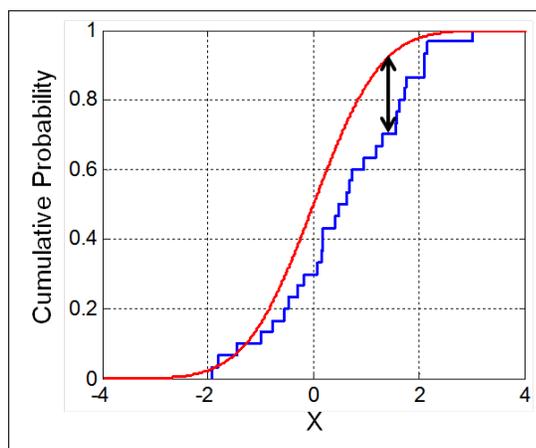


Figura 2.4: Ilustración de la estadística de Kolmogorov–Smirnov [23].

2.3. Escuchando las Series Temporales

Como mencionamos en la introducción de este trabajo, la idea básica es percibir las series temporales de forma auditiva. Enfocándonos en esta perspectiva y dicho de forma simple: ahora vamos a escuchar las series financieras escogidas, pero con las notas de la composición *MIDI más afín* a dicha serie. El cuadro 2.1 muestra las parejas serie-composición acompañadas de sus respectivos valores F_1 , V , T y ν . Recordemos que F_1 es la ocurrencia de la nota ó pico más frecuente, V el número total de notas ó picos distintos. T el número total de notas ó picos en la composición o serie y ν el exponente de la expresión para el cual se obtiene el mejor ajuste de curva para cada distribución de notas o picos en una composición o serie obtenido mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

F_1	V	T	ν	Serie / Composición	$\Delta\nu$
41	54	524	0.04	Dow Jones	0.007
98	144	2914	0.033	Moszkowski Étincelles, Opus 36	
36	57	504	0.06	Microsoft	0.005
28	52	400	0.065	Schumann Reverie, Opus 15	
37	63	501	0.21	Oro	0.01
47	153	1478	0.2	Schumann Kreisleriana, Opus 15	
25	71	469	0.16	Petróleo	0
198	94	2634	0.16	Chopin Préludes, Opus 28	

Cuadro 2.1: Tabla de series junto con las composiciones más afines a ellas, además se muestran los valores F_1 , V_s , T , ν y $\Delta\nu$.

En este punto tenemos ya los medios para crear un archivo MIDI para cada una de las 4 series financieras utilizadas. Esto se logra desglosando las composiciones más afines en sus *notas* constituyentes, ordenándolas por orden decreciente según su ocurrencia y tocándolas en un piano digital, usando solamente la mano derecha. Luego emparejamos 1 a 1 los picos con las notas, es decir que el pico de mayor ocurrencia en la serie tendrá su análogo en la nota de mayor ocurrencia en la composición más afín a la misma, el segundo pico en la segunda nota, el tercero en la tercera y así sucesivamente. En la imagen 2.6 se muestra un esquema de la superposición de las curvas para la distribución de frecuencias de los picos de las series y de las notas de las composiciones.

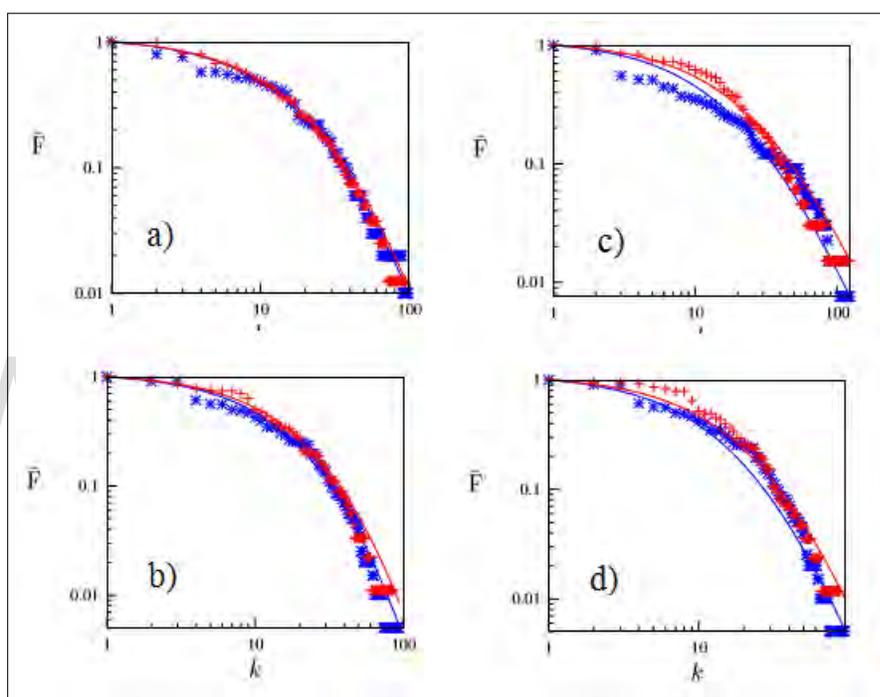


Figura 2.5: Esquema de la superposición de las series temporales analizadas (azul) y las composiciones con el exponente de Zipf más afín (rojo).

Recordando la restricción de que el número de tipos de pico V debe ser siempre menor o igual al número de tipos de nota. Permittiéndonos así escuchar la totalidad de la serie temporal "melodizada", incluso si no escuchamos todas las notas de la composición. Produciendo así las cuatro melodías respectivas (*ver apéndice 12, 13, 14 y 15*).

2.3.1. Compás y Ritmo

Una vez creados los archivos MIDI de cada serie debemos refinarlos al oído para que sean interpretados como música, entrando así en esta categoría, la cual ofrece todo un lenguaje para aquellos con formación en el ámbito musical. Esto se hace con la intención de hacer el reconocimiento de patrones temporales y evocación de los mismos algo más fácil para el cerebro. Entonces, con el propósito de hacerlos naturales de escuchar haremos uso de ciertos estándares musicales, en específico, del compás y del ritmo.

Pero, ¿en qué consiste el compás y el ritmo en la música? El compás es la entidad métrica musical compuesta por varias unidades de tiempo (figuras musicales) que se organizan en grupos, en los que se da una contraposición entre partes acentuadas y átonas [24]. La representación gráfica del compás se hace mediante la indicación de compás al comienzo de la partitura, luego de la *clave*, como se muestra en la figura 2.6, convención empleada en la notación musical occidental para especificar cuántos pulsos hay en cada compás y qué figura musical define un pulso. Por ejemplo, si definimos un compás de 4/4 con una unidad de 1/4 para una *negra*, entonces por cada compás necesitaríamos 4 negras o su equivalente en duración para llenar dicho compás.



Figura 2.6: Fragmento de la partitura acompasada a 4/4 para la serie melodizada del petróleo.

Para este ajuste se desarrolló un programa en el lenguaje JAVA, haciendo uso de las librerías de *Jmusic*, el cual a partir de una serie de notas consecutivas, calcula y ajusta los silencios respectivos a cada pulso, acompasando la melodía total de la forma deseada (*ver apéndice 20*) ajustando también el tiempo total. El compás al que ajustamos todos los archivos MIDI producidos es el de 4/4 (compasillo), con una duración total de 40 segundos para cada melodía.

Ahora, con los audios totalmente acompasados y ajustados a cierto ritmo, la diferencia al oído es notable (*ver apéndice 16, 17, 18 y 19*), dando así un paso más en este nuevo método de sonificación, permitiéndonos pasar a la experimentación directa con sujetos de prueba.

“They both listened silently to the water, which to them was not just water, but the voice of life, the voice of Being, the voice of perpetual Becoming.”

Hermann Hesse, Siddhartha.

Capítulo 3

Montaje Experimental, Aplicación del Método y Resultados

El propósito de este trabajo, además del desarrollo del nuevo método de sonificación expuesto, es el de comprobar o refutar la hipótesis planteada, es decir, si el oído, mediante este nuevo método, es capaz o no de ser entrenado para adquirir la información subyacente en las series temporales. En otras palabras, usamos la interfaz del oído para hacer *minería de datos*. Se implementa un montaje experimental que consta de un test simple, con la finalidad de evaluar el método a ser usado por diferentes sujetos de prueba, haciendo posteriormente el análisis de los resultados del test.

3.1. El Montaje Experimental

Básicamente lo que se desea en este punto es utilizar los archivos MIDI melodizados de las cuatro series temporales, es decir con compás y ritmo, para determinar si de esta nueva forma el oído puede adquirir información de las series escogidas de forma más eficiente que la vista. Este hecho de *adquirir información* fue desglosado en tres partes, las cuales nos dirán si existe el potencial de extraer dicha información, en que magnitud y de que forma. Por ende nos planteamos tres preguntas, las cuales pensamos son fundamentales al momento de adquirir información de forma práctica.

1. ¿Se puede **reconocer** una serie antes escuchada, es decir, identificar la serie que se está escuchando?
2. ¿Se puede **reproducir** la serie temporal, es decir, evocar la melodía característica de dicha serie?
3. ¿Se puede **predecir** fragmentos de una serie temporal? ¿Puede una persona predecir qué viene a continuación en la melodía?

Para responder a estas incógnitas se desarrolló el montaje experimental, el cual consiste en dos partes: un test y un periodo de entrenamiento, que procederemos a explicar respectivamente en los dos apartados siguientes.

3.1.1. El Test

Consta de tres partes, cada una enfocada en las preguntas antes expuestas. Cada parte, reconocer, reproducir y predecir; está a su vez subdividida en dos subpartes, una auditiva y otra visual, para un total de seis preguntas. Esto se hizo con la finalidad de entender si en realidad es el oído una mejor herramienta para la minería de datos de series temporales que la vista. La metodología utilizada para emplear este test consiste en mostrar cuatro videos (*imagen/audio*) de las series temporales: Dow, Microsoft, Oro y Petróleo. Permittedole a los evaluados escuchar la melodía referente a cada serie mientras se ve la evolución temporal. Luego se pasa a comprobar si pueden reconocer, reproducir y predecir tanto de forma auditiva como visual.

Para esto, luego de ver los cuatro videos de las series, procedemos a realizar dos preguntas por cada una de las tres partes del test referentes a dichos videos. Como mencionamos líneas atrás, una pregunta referente a la parte auditiva y otra a la visual. El test es de selección múltiple, con cuatro posibles respuestas. Dejando de lado la quinta opción correspondiente a “ninguna de las anteriores” de forma intencional, forzando así al azar a entrar en juego, y así poder evaluar mejor la etapa de aprendizaje.

La parte de reconocer consiste en escuchar y ver una de las series (primero sólo el audio y luego la gráfica), para después escoger una opción entre las cuatro posibles: Dow, Gold, Microsoft o Oil; siendo sólo una de las opciones la correcta. Identificando así si los evaluados son capaces de reconocer las series que acaban de ver y escuchar, ya sea por reconocimiento visual, auditivo ó ambos inclusive. La escogencia de la melodía utilizada para evaluar esta parte de la prueba es aleatoria, así como la gráfica (puede ser cualquiera de las cuatro). Esta metodología será aplicada de forma similar en las otras dos partes.

En la parte de reproducir se presenta un fragmento de una de las 4 series, de forma auditiva y visual, luego se preguntará cuál de las opciones es la continuación correcta de ese fragmento, permitiendo identificar si el evaluado es capaz de reproducir ó evocar la serie antes escuchada y vista. Evidentemente en este punto, el ser capaz de reproducir un fragmento de la serie está intrínsecamente relacionado con ser capaz de reconocer dicho fragmento.

Los fragmentos utilizados para evaluar si se puede reproducir la serie son aleatorios. No necesariamente pertenece a la serie usada en la parte de reconocer. Es decir, se escoge una de las cuatro series melodizadas, se selecciona un rango de la misma con el audio y la gráfica de duración equivalentes, y luego se muestran, siendo la continuación de ese fragmento una de las cuatro opciones presentadas. Las otras tres opciones son fragmentos aleatorios de las otras tres series. Aunque cabe destacar que también se pueden utilizar otras series melodizadas que no sean ninguna de las cuatro.

Para las últimas dos preguntas referentes a la tercera y última parte del test, la de predecir, primero se muestra un video corto con un fragmento de una de las cuatro series que no se ha visto antes, preguntando un instante después: ¿cómo continúa dicho fragmento? Es decir, cuál es la siguiente nota, o el siguiente pico inmediato, del fragmento de la serie vista. Esto nos dirá si existe el potencial de vislumbrar la continuación del siguiente paso de forma auditiva o visual. Básicamente este último test nos dice si se puede llegar a predecir parcialmente los valores futuros de la serie, lo cual reflejaría la existencia de cierta estructura o patrones recurrentes, los cuales el cerebro puede llegar a anticipar. El fragmento mostrado corresponde a los últimos 8 segundos de una de las cuatro melodías, recalando que este fragmento es desconocido, dado que de la longitud total de las series melodizadas hasta este punto es de 40 segundos, de los que se presentaron los primeros 32 segundos. En la figura 3.1 se muestra la ficha utilizada para responder las 6 preguntas.

El Test se realizará dos veces, una antes de empezar el periodo de entrenamiento y otro al final del mismo. Comparando así ambos resultados, observando entonces si se produjo mejoras, en que aspecto y en que magnitud.

9/12/16					
*¿Ha estudiado música?: _____					
<u>Test de Melodización</u>					
Nombre: _____			E-mail: _____		
Reconocer		Reproducir		Predecir	
a	a	a	a	a	a
b	b	b	b	b	b
c	c	c	c	c	c
d	d	d	d	d	d
*Marque con un círculo su respuesta.					

Figura 3.1: Ficha de respuestas del Test utilizado en el montaje experimental.

3.1.2. El Entrenamiento

Como ya mencionamos, la segunda parte del montaje experimental corresponde al entrenamiento. El cual consiste en escuchar y ver cada uno de los cuatro videos correspondientes a las series financieras escogidas (*ver apéndice 1, 2, 3 y 4*) de forma diaria, al menos una vez, durante un periodo de quince días. Cada video está ajustado a 32 segundos de duración, para un tiempo total de dos minutos y ocho segundos de entrenamiento diario mínimo. La duración de los videos, así como la del periodo total de 15 días fue escogida de forma arbitraria, tomando en cuenta un estimado de lo que lleva aprenderse una canción corta, fijándose así la melodía en la memoria a largo plazo. Una vez completado el periodo de entrenamiento se realizará nuevamente el test, adquiriendo así un segundo grupo de resultados, que servirán de base para la comparación y análisis de resultados.

3.2. Análisis de Resultados

Finalmente, ya con los datos de las respuestas del test, antes y después del entrenamiento, procedemos a compararlas. Para ello haremos un estudio de dos muestras, calculando un valor teórico y observando cuando discrepa de los valores que arrojan los tests. El grupo de sujetos de prueba lo conforman personas sin ninguna preparación musical, músicos autodidactas y músicos de escuela.

Sujeto	T1a	T1v	T2a	T2v	T1	T2
1	1	1	1	2	2	3
2	2	1	2	0	3	2
3	1	2	1	1	2	0
4	3	2	3	2	5	5
5	1	0	0	0	2	2
6	1	0	3	1	1	4
7	2	0	1	2	2	3
8	2	0	1	1	2	2
9	0	0	1	2	2	3
10	1	0	3	1	1	4
11	2	2	3	2	5	5
Promedio	1.45	0.72	1.72	1.27	2.45	3

Cuadro 3.1: Resultados del primer y segundo test. Donde T1a es el puntaje total del test 1 para la parte auditiva y T1v para la parte visual. De igual forma T2a es el puntaje total del test 2 para la parte auditiva y T2v para la visual. Siendo T1 y T2 los puntajes totales de la primera y segunda prueba respectivamente.

El cuadro 3.1 muestra los resultados de cada prueba, noté que los mismos varían de acuerdo al individuo ya que puede influir entre otras cosas la afinidad personal respecto a la parte gráfica ó auditiva. Sin embargo, si calculamos el promedio de los puntajes para el primer y segundo test, recordando que la máxima nota posible es seis y la mínima cero, observamos inmediatamente un cambio interesante. Aumentando la puntuación de T1 a T2, lo cual corresponde a una mejora en promedio aproximada del 18%. Sin embargo, ¿es esto coincidencia ó causa de un aprendizaje? El punto fuerte del análisis de resultados consiste en responder esta incógnita.

Cabe destacar que dado el enfoque de la prueba, ésta no toma en cuenta el caso en el que el sujeto no pueda mejorar más, es decir, que su puntaje sea prácticamente perfecto. En este sentido el promedio no se verá afectado, dado que no hubo ninguna diferencia total. Entonces, para determinar que tanto el azar entró en juego, calcularemos las probabilidades de cierto puntaje específico, el cual servirá como nuestro valor teórico y base de comparación a la hora de afirmar que las respuestas vienen efectivamente, de la información extraída por los sujetos de prueba de las series melodizadas.

En general, si una variable aleatoria X sigue la *distribución binomial* [25] con los parámetros $n \in \mathbb{N}$ y $p \in [0, 1]$, escribimos $X \sim B(n, p)$. Lo cual significa que la probabilidad X , de obtener exactamente k éxitos en n ensayos, está dada por la función de masa de probabilidad

$$f(k; n, p) = Pr(X = k) = \binom{n}{k} \cdot (p^k)(1 - p)^{n-k} \quad ;$$

donde p es la probabilidad de acertar una pregunta en un intento. La figura 3.2 muestra esta función para $n = 6$ y $p = 1/4$, que corresponde a los valores de las probabilidades de los aciertos si las respuestas de las 6 preguntas de los test son escogidas al azar, de las 4 alternativas. Por ejemplo, la probabilidad de responder correctamente $k = 2$ preguntas de las $n = 6$ es

$$f(2, 6, 1/4) = \binom{6}{2} \cdot (0.25^2)(1 - 0.25)^4 \approx 0.29$$

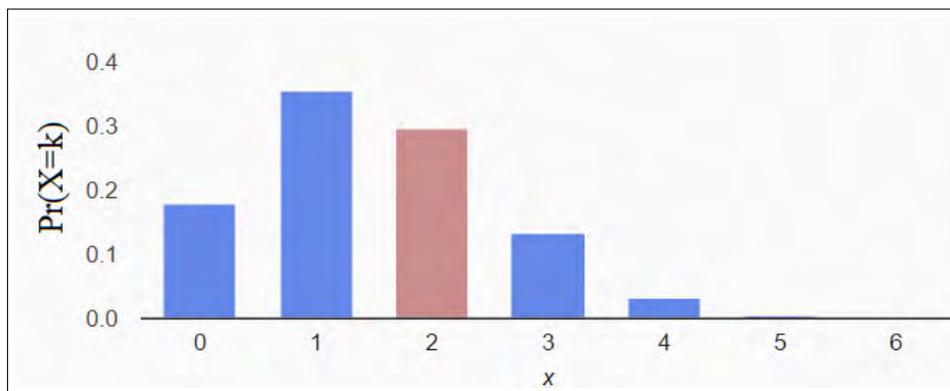


Figura 3.2: Probabilidades discretas de obtener k éxitos en seis intentos, en una prueba con de selección múltiple con cuatro opciones.

En la figura 3.2 se aprecia que esta probabilidad se va reduciendo rápidamente a medida que subimos la cantidad de respuestas exitosas, es decir, a medida que se desea obtener un puntaje más alto, llegando prácticamente a una improbabilidad para un puntaje de $k = 5$ o $k = 6$. Escogimos el número $k = 2$ para el ejemplo por ser el más cercano al puntaje promedio del primer test $T1 = 2.45$. Mientras que para el segundo test el promedio total es de $T = 3$, lo cual corresponde ya a probabilidades más bajas de ocurrencia por medios aleatorios de $f(3, 6, 1/4) \approx 0.13$. Por lo que estos resultados comienzan a parecer poco probables de alcanzar por medios enteramente aleatorios.

Ahora, si calculamos la varianza de nuestras muestras, y luego la desviación estándar, podemos realizar un estudio de si se cumple o no la hipótesis planteada. Es decir, dado un margen de aceptación para el error, podemos inferir si nuestro valor para la media del test difiere en gran medida del valor teórico obtenido de respuestas aleatorias. Este estudio se conoce como la *prueba de t-Student's*, ó simplemente como *la prueba de la hipótesis nula*. Este último nombre se debe a que primero suponemos una hipótesis que sea contraria a la deseada, para luego intentar refutarla, comprobando así su alternativa opuesta en caso de lograrlo.

Si establecemos la hipótesis nula de que el valor medido será igual al valor teórico esperado producto de respuestas aleatorias, y esto no se cumple, es decir que el valor de t está por debajo del umbral de aceptación, entrando en la región de rechazo (generalmente $\alpha = 5\%$). Estaríamos comprobando que de hecho, hubo un aprendizaje. La figura 3.3 muestra las regiones de aceptación y rechazo para la hipótesis nula.

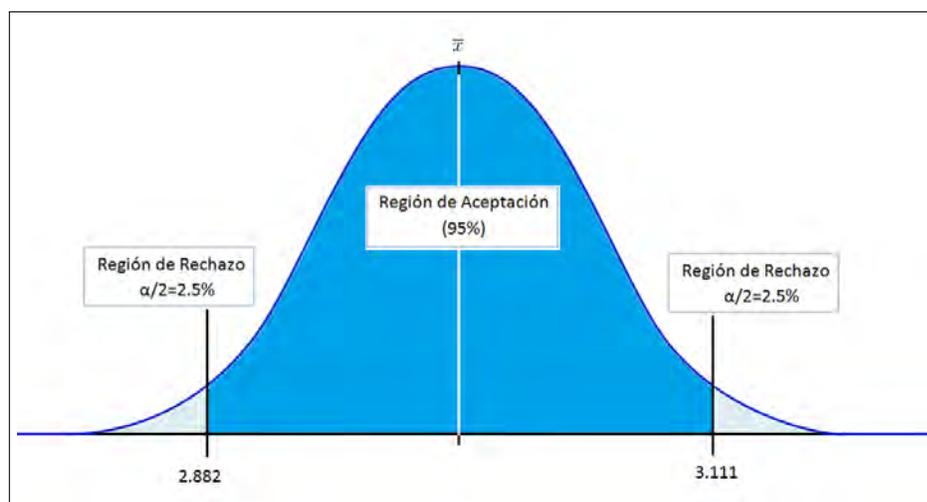


Figura 3.3: Esquema para la Región de Aceptación y Rechazo de la hipótesis nula.

Entonces, la desviación estándar vendrá dada por:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.1)$$

donde n es el tamaño poblacional, x_i el puntaje de cada sujeto y \bar{x} el valor medio de los puntajes del test. Para el valor medio correspondiente al primer test (T1), observamos que la desviación estándar es de: $\sigma = 1.3$. Mientras que de: $\sigma = 1.4$ para el segundo test (media T2).

Luego, haciendo uso de la desviación estándar, la prueba de la hipótesis nula vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$t = (\bar{x} - \mu_0)/(s/\sqrt{n}) \quad (3.2)$$

La cual corresponde a una valor t producto de la resta entre la media muestral (\bar{x}) y teórica (μ_0), entre el error estándar (s/\sqrt{n}), siendo (s) la desviación estándar de las muestras y (n) la población total (11). Definiendo los límites de nuestras regiones de aceptación y rechazo (figura 3.3) como: $\bar{x} \pm t_\alpha(s/\sqrt{n})$. Donde t_α viene dado por: $0.025(m-1)$. Siendo m el número de grados de libertad (población), y 0.025 el margen de error equivalente al 2.5%.

Ya conocidos todos los datos y sus significados, simplemente calculamos, para el segundo test:

$$t = \frac{(3-2)}{(1.4/\sqrt{11})}$$

Obteniendo así un valor de 2.2361, el cual corresponde a una probabilidad de ocurrencia del 0.049330, la cual se encuentra fuera de la región de aceptación estipulada, es decir que es menor de nuestro valor de significancia, por ende no podemos aceptar la hipótesis nula. Concluyendo entonces que en efecto sí hubo un aprendizaje.

Nótese que este estudio no se realizó para el primer test dada su relativamente alta probabilidad de provenir de medios aleatorios ($\approx 29\%$). Lo cual a su vez era de esperarse en cierto modo, dado que era la primera vez que los sujetos se sometían a este tipo de prueba, habiendo visto y escuchado las 4 series solamente una vez.

“Other things being equal, simpler explanations are generally better than more complex ones.”

Ockham’s razor.

Conclusiones y Recomendaciones

En esta tesis se desarrolló un nuevo método de sonificación musical, el cual traduce una serie de datos temporales en sonidos, los cuales a su vez fueron trabajados bajo ciertos estándares musicales como el compás y el ritmo, produciendo así una melodía más agradable y fácil de apreciar. Las series sonificadas corresponden a un periodo de diez años, para el valor de cierre diario de la bolsa de valores de Nueva York del Dow Jones Industrial Average, Microsoft Corporation, Oro y Petróleo. Utilizando como valor característico el exponente de Zipf intrínseco a las 4 series, comparando cada una de ellas con su composición musical más afín, para una posterior aplicación experimental con varios sujetos de prueba, teniendo como enfoque fundamental el corroborar la hipótesis planteada, la cual busca conocer si el oído puede ser entrenado para extraer información de series temporales. Para esto se elaboró y aplicó un montaje experimental, que consiste en un test y un periodo de entrenamiento, el cual se enfoca en la parte auditiva, evaluando así si existe la capacidad de extraer información de las series melodizadas y en que magnitud. Desglosando este hecho en tres partes concretas, las cuales son: reconocer, reproducir y predecir.

Es importante resaltar ciertos hechos que, a lo largo de la aplicación del montaje experimental fueron siendo evidentes, de esta forma se puede optimizar dicho montaje para una posterior aplicación del método. Primero que nada, se pudo evidenciar la existencia de patrones recurrentes, dada la escogencia de los elementos representativos de la serie como picos, los cuales se hicieron a su vez más evidentes mediante la sonificación musical desarrollada. Sin embargo, a pesar de la facilitación al oído mediante aplicación de ciertos estándares musicales, como el compás y el ritmo, existen varias cosas a considerar a la hora de poner todo esto en un contexto evaluativo, es decir, a la hora de realizar el test.

Algunas personas son más dadas a lo gráfico mientras que otras a lo auditivo, aunque en promedio se evidenció una tendencia privilegiada en la parte auditiva, sigue siendo una interrogante si ésto sucederá con una población aún mayor. Los músicos autodidactas y de escuela demostraron no sólo una afinidad bastante significativa con las melodías utilizadas, reconociéndolas como música, sino que también lograron memorizarlas, lo cual indica un logro en la realización del método de sonificación. Sugiriendo incluso la posibilidad de aplicar lo que en música se conoce como *lectura adelantada*, la cual es común en aquellos que practican géneros tales como el Jazz.

A lo largo de este trabajo se pudo constatar que las series temporales melodizadas pueden ser diferenciadas, reconocidas y reproducidas. Aunque los resultados de los sujetos de pruebas no son suficientes para realizar estudios estadísticos a gran escala, si se pudo inferir acerca de la naturaleza de los mismos, determinando un factor relativamente significativo para el azar en el primer test y bastante improbable para el segundo, concluyendo entonces que se dio un aprendizaje debido al entrenamiento, comprobando así la hipótesis planteada en este trabajo. Se recomienda aplicar este mismo método, basado en un montaje similar optimizado, a tantas personas como sea posible, en especial a aquellos con capacitación formal en el ámbito musical. Teniendo en consideración no sólo el determinar si el método es factible, como se pudo evidenciar, sino que también en qué magnitud y a que consecuencias concretas conlleva. Sobre todo en el área de predicción, cuyo alcance total aún permanece por ser explorado.

Bibliografía

- [1] Domenico Vicinanza. Generation of music sequences through the logistic iterative maps. *Universidad de Salerno Italia*, 2006.
- [2] I. Pollack and L. Ficks. Information of elementary multidimensional auditory displays. 1954.
- [3] E. E. Fournier d'Albe. On a type-reading optophone. 1914.
- [4] Ron Cowen. Nuevas aplicaciones de la sonificación. *Investigación y Ciencia*, 2015.
- [5] J. H. Flowers. Thirteen years of reflection on auditory graphing: Promises, pitfalls, and potential new directions. 2005.
- [6] Kay Tucci, A. Parravano y Oliver Vielma. Melodización de series financieras. *Universidad de los Andes, Venezuela*, 2008.
- [7] David M W Powers. Applications and explanations of zipf's law. *Association for Computational Linguistics*, page 151–160., 1998.
- [8] M.A. Montemurro and D. H. Zanette. New perspectives on Zipf's law in linguistics: From single texts to large corpora. *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Goltometrics*(4):86–98, 2002.
- [9] D.H. Zanette. Zipf's law and the creation of musical context. *Concejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas Instituto Balseiro, 8400 Bariloche, Río Negro Argentina*, 2004.
- [10] Tang C. Bak, P. and K. Wiesenfeld. Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise. 1987.
- [11] David M W Powers. Geiger muller tubes. *Association for Computational Linguistics*, issue 1.

- [12] Gregory Kramer. Auditory display: Sonification, audification, and auditory interfaces. *Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings*. Volume XVIII, 1994.
- [13] J. Keller. Goddard space flight center space physics data facilityt, 2003.
- [14] NASA. Educational and public outreach for STEREO/IMPACT and wind.
- [15] Natasha Barrett. Interactive spatial sonification of multidimensional data for composition and auditory display. *University of Oslo Department of Musicology Postboks 1017*, 2016.
- [16] Dušan Kovář. Generation of music sequences through the logistic iterative maps. *Department of Theoretical Physics, Faculty of Science, Palacký University, Tr. 17. listopadu 50, CZ-77207 Olomouc, Czech Republic.*, 2002.
- [17] Ramazan Fagan, Stephen; Gençay. An introduction to textual econometrics. 2010.
- [18] M. E. J. Newman. Power laws, pareto distributions and zipf's law. *Contemporary Physics* vol 5:323–51, 2005.
- [19] Nathan Winslow. Introduction to self-organized criticality and earthquakes. *Dept. of Geological Sciences*.
- [20] H. Hoffmann and D. W. Payton. Suppressing cascades in a self-organized-critical model with non-contiguous spread of failures. *Chaos, Solitons and Fractals*:87–93, 2014.
- [21] Francesc Font-Clos Isabel Moreno-Sánchez and Álvaro Corral. Large-scale analysis of zipf's law in english texts. , number=, pages=, year=2016, publisher=.
- [22] Howard G.Tucker. A generalization of the glivenko-cantelli theorem. *Dept. of Geological Sciences, The Annals of Mathematical Statistics*:30: 828–830., 1959.
- [23] Wayne W Daniel. Kolmogorov–smirnov one-sample test. *Applied Nonparametric Statistics*, 2nd Edition, 1990.
- [24] Hermann Grabner. Teoría general de la música. pages 39–49, 2001.
- [25] G. P. Wadsworth. Introduction to probability and random variables. page 52, 1960.

Apéndices

Descripción de Archivos Adjuntos:

Apéndice 1: *Video de la serie Dow Jones para el periodo 2000-2010, melodía acompañada, duración 40 segundos.*

Apéndice 2: *Video de la serie Oro para el periodo 2000-2010, melodía acompañada, duración 40 segundos.*

Apéndice 3: *Video de la serie Microsoft para el periodo 2000-2010, melodía acompañada, duración 40 segundos.*

Apéndice 4: *Video de la serie Petróleo para el periodo 2000-2010, melodía acompañada, duración 40 segundos.*

Apéndice 5: *Video de la densidad del viento solar (proyecto STEREO) para el año 2007, comprimido en 2min.*

Apéndice 6: *Video de la densidad del viento solar, baja, (proyecto STEREO) para el año 2007, comprimido en 50 segundos.*

Apéndice 7: *Video de la densidad del viento solar, alta, (proyecto STEREO) para el año 2007, comprimido en 1min.*

Apéndice 8: *Muestra auditiva para el mapa logístico, sonificación musical, duración 11 segundos.*

Apéndice 9: *Fragmento del código desarrollado en C para el método de Kolmogorov-Smirnov y la adquisición del exponente de Zipf.*

Apéndice 10: *Fragmento de la tabla utilizada como referencia para la escogencia de la composición MIDI con el exponente de Zipf más afín.*

Apéndice 11: *Fragmento del código desarrollado en Fortran para el método de hallar picos y tipos de picos en una serie temporal.*

Apéndice 12: *Audio de la serie Dow Jones para el periodo 2000-2010, melodía sin acompañar, duración 40 segundos.*

Apéndice 13: *Audio de la serie Oro para el periodo 2000-2010, melodía sin acompañar, duración 40 segundos.*

Apéndice 14: *Audio de la serie Microsoft para el periodo 2000-2010, melodía sin acompañar, duración 40 segundos.*

Apéndice 15: *Audio de la serie Petróleo para el periodo 2000-2010, melodía sin acompañar, duración 40 segundos.*

Apéndice 16: *Audio de la serie Dow Jones para el periodo 2000-2010, melodía acompañada, duración 40 segundos.*

Apéndice 17: *Audio de la serie Oro para el periodo 2000-2010, melodía acompañada, duración 40 segundos.*

Apéndice 18: *Audio de la serie Microsoft para el periodo 2000-2010, melodía acompañada, duración 40 segundos.*

Apéndice 19: *Audio de la serie Petróleo para el periodo 2000-2010, melodía acompañada, duración 40 segundos.*

Apéndice 20: *Fragmento del código desarrollado en JAVA para la creación del MIDI continuo, acompañado y con ritmo.*

Sitios Web Relacionados:

Education and Public Outreach for STEREO/IMPACT and wind:

http://cse.ssl.berkeley.edu/stereo_solarwind/index.html

Mt. Etna Volcano Sonification, Listening to Sismograms:

<http://grid.ct.infn.it/etnasound/page4/page6/page6.html>

jMusic, Music Composition in Java:

<http://explodingart.com/jmusic/>

Yahoo Finance:

<https://finance.yahoo.com/>

Large-Scale Analysis of Zipf's Law in English Texts:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4723055/>

Nuevas aplicaciones de la sonificación:

<http://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/numero/465/nuevas-aplicaciones-de-la-sonificacin-13191>