



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Música

Facultad de Música

EL SONIDO DE LA VIDA VEGETAL

Sonificación de genes MADS-box involucrados en el ciclo de vida de *Arabidopsis thaliana*

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRO EN MÚSICA

(Tecnología Musical)

PRESENTA

Biol. Aketzalli Rueda Flores

TUTOR

Dr. Hugo Solís García

(Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma)

Ciudad de México, diciembre 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Tesis dedicada a la Ecología para:

CONOCER-la, VALORAR-la y ASUMIR un papel a favor de la Naturaleza.

Agradecimientos,

A mis padres Chelo y Rolando,

a mis hermanos Tonalli y Rolando,

a mi ratita Kimichin,

a mi tutor el Dr. Hugo Solís,

a mis profesores de la maestría, sobretodo a la Dra. Rosana Lara y a su papa el Dr. Felipe Lara,

a Cristhian y Giovanny de Kualí Studio,

a los voluntarios,

y a mis amigos.

INDICE

I RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN	1
II INTRODUCCIÓN	4
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2. PENSAMIENTO COMPLEJO	9
3. TRABAJOS QUE ABORDAN LA COMPLEJIDAD (ARTICULACIÓN ARTE-CIENCIA-TECNOLOGÍA)	12
4. GENERALIDADES DEL SISTEMA DE ARTICULACIÓN	14
5. EXPLORACIONES ACTIVAS	18
5.1. Usuario con espacialización estéreo	19
5.2. Tecnología de desarrollo de la aplicación para dispositivo móvil	20
5.3. Entorno al que pertenece	20
III MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO	22
1. SONIFICACIÓN	27
1.1. Por qué ocupar el material genético de <i>Arabidopsis thaliana</i>	30
1.2 Propuesta del modelo de sonificación	31
1.2.1. Sonificación del genoma	33

1.2.1.1. Técnica de transformación de los datos	33
1.2.1.2. Implementación del algoritmo	41
1.2.2 Sonificación por estadio	44
1.2.2.1. Técnica de transformación de los datos	55
1.2.2.2. Implementación del algoritmo	64
1.2.3. Interacción de la sonificación con el usuario	68
1.2.3.1. Implementación del algoritmo	70
1.2.3.2. Aplicación: <i>El Sonido de la Vida Vegetal</i>	72
IV DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	74
V GLOSARIO	78
VI ANEXOS	86
VII BIBLIOGRAFÍA	98

NOTA: Los conceptos que aparecen escritos en negrita y cursiva a lo largo del manuscrito se encuentran definidos en un glosario al final de la tesis. También encontrarás ejemplos sonoros asociados a hipervínculos que llevan a los audios en *SoundCloud*. Si la lectura es en papel puedes acceder a ellos a partir del siguiente enlace:

<https://soundcloud.com/aketzalli-rf/sets/audios-tesis-el-sonido-de-la>



I

RESUMEN DE LA INVESTIGACIÓN

Quiero empezar esta tesis escribiendo sobre el trabajo que antecede a la presente investigación: la tesis que desarrollé en la licenciatura en biología, que del mismo modo trató de incluir en su proceso cuestiones artísticas que articulaban las ciencias biológicas, la música y el arte; tesis que se concretó en el año 2015 con el título *Interpretación musical basada en una composición natural de las redes genéticas que regulan la floración por fotoperiodo en Arabidopsis thaliana* o en su título divulgativo *Te Escucho Floración*. Sin conciencia, lo que en un principio fue diseñado como un proyecto de divulgación científica se convirtió poco a poco en un **espacio** (*ver glosario*) de discusión y reflexión; originándose nuevos cuestionamientos como por ejemplo: ¿por qué hacía música —o sonido— en biología? o ¿con qué criterios consideraba características útiles o significativas, las cuales seleccioné para relacionar el **sistema** genético con el sistema musical? Preguntas que me fueron acercando al mundo de la cultura del pensamiento complejo y de la **transdisciplinariedad**, re-estructurando nuevos enfoques de **organización** entre el sujeto y el objeto, los cuales forman parte de un sistema mayor, ayudándome a conceptuar el por qué del anterior trabajo de licenciatura y del por qué del trabajo expuesto en esta tesis.

De tal modo que al acercarme a la **complejidad** y a la transdisciplina me ayudó a tomar una posición plástica de este proyecto, a esto me refiero que la investigación se vuelve moldeable y que no forma parte de un lugar en específico, ni de la biología, ni del **arte sonoro**. Investigación que se encuentra ubicada en los espacios conectivos de las ciencias y las artes, en puntos intermedios e itinerantes. De ahí la necesidad de que surjan nuevas categorías como la **investigación artística** respecto a temas que aparentemente no tienen cabida en la academia actual y de donde surgen nuevos tipos de preguntas

como: ¿cuál es el impacto de un trabajo que no se ubica dentro de un campo ya establecido? o ¿cómo dar sentido a la investigación artística siendo ésta tan diversa en sus enfoques? Preguntas que he tratado de responder a lo largo de esta tesis, considerando que la mejor respuesta posiblemente se encuentra en la exposición al producto resultante —*instalación sonora* para dispositivo móvil—.

Finalmente, esta investigación artística va más allá de solo responder cuestionamientos específicos, también busca incentivar una reflexión social en torno a temas de la diversidad tanto del conocimiento como de las formas en que éste se genera, siendo la aleatoriedad un factor importante de la complejidad que nos permite no negarnos al sazón inherente de las artes dentro de las metodologías de trabajo de las ciencias duras; de tal manera que y a partir de éste agregado es de donde emerge *El sonido de la Vida Vegetal - Sonificación de genes MADS involucrados en el ciclo de vida de Arabidopsis thaliana*. Tesis que es posible gracias al apoyo de mi tutor el Dr. Hugo Solís quien colaboró enormemente en la programación de la sonificación en el software *SuperCollider*; así como en las conceptualizaciones de la sonificación para poder desarrollar el modelo más coherente del transito de la información que va del sistema biológico vegetal al sistema sonoro y que junto a su idea de presentar la obra resultante en una instalación sonora para dispositivo móvil fue posible generar la experiencia sonora *El Sonido de la Vida Vegetal*. Instalación desarrollada en el software *Unity* gracias a Cristhian Serrano de Quali Studio. Por lo que es interesante ver como éste trabajo no se hubiera logrado sin su participación y la de los voluntarios quienes colaboraron en las pruebas piloto para probar la funcionalidad de la aplicación. Del mismo modo, agradezco enormemente a la Dra. Rossana Lara, quien me incentivó a romper las barreras entre las ciencia y las artes a partir de generar un único territorio combinado dirigido a un lector incentivado por la transdisciplinariedad.

En resumen, se logró en ésta tesis un transito de información que va del sistema biológico y el sistema sonoro a partir de la sonificación. Técnica que actúa como un puente de conexión de ambos mundos. La sonificación es generada desde una analogía que se enmarca en la complejidad, donde es la interacción de los diferentes elementos, su combinatoria, su dimensión y su estructura la que definirá, del mismo modo, la complejidad sonora a través de la interacción, la combinatoria, la dimensión/saturación y estructura de ondas simples.

Para lograrlo primero se delimitó la información biológica, definiendo a los genes MADS-box como recurso para llevar a cabo la sonificación debido a su importante papel que desempeñan en el desarrollo de las plantas, de manera que se pueda extrapolar la información extraída de la base de datos NCBI de la planta modelo *Arabidopsis thaliana* (una especie de crucífera nativa de Europa, Asia y el noroeste de África) al resto de plantas con flores y así poder hablar desde el sonido de la vida vegetal. Una vez obtenida y sistematizada la información biológica se generaron analogías para representar de manera coherente los datos biológicos a sonido por lo que se diseñaron dos modelos de sonificación. El primer modelo de sonificación o como fue nombrado la *sonificación del genoma* es considerado como una nota pedal con el objetivo de representar la característica biológica de que todo el material genético de la planta está ubicado en todas las células que la conforman a pesar de ser distintas entre un tejido y otro. La diferenciación celular se da a partir de la expresión genética y por lo tanto las células son completamente diferentes entre los diferentes tejidos que componen los diversos órganos de la planta. Por ello el segundo modelo de sonificación o *sonificación por estadio* representa a los genes de tipo MADS-box que son expresados en los diferentes momentos del desarrollo de la planta. El último paso de este proceso fue el desarrollo de una aplicación con el objetivo de gestar una experiencia sonora que promueva una sensibilización hacia el mundo vegetal a partir de una instalación sonora para dispositivo móvil con la instrucción de visitar espacios que fomenten una educación ambiental.

Para hacer más fácil la lectura de esta tesis se incluye un glosario de la terminología tanto de la biología como del sonido.

II

INTRODUCCIÓN

Desde la noche de los tiempo el hombre no ha cesado de modificar su visión de la Naturaleza

-anónimo.

Desde que el hombre apareció en la Tierra se ha sentido fascinado por la diversidad de su *entorno*, por la diversidad de las plantas. De su investigación y estudio ha logrado saber qué parte del mundo vegetal es peligroso y qué parte sirve para comer, para sanar, para vestir o construir su habitación. Durante milenios ha domesticado muchas especies de plantas para su beneficio. Todo ello gracias a una homogeneización y simplificación de la información sobre el mundo natural: <<mientras más se conozca acerca de la biodiversidad, más provecho se puede obtener sin perderla>> (Márquez, *et al.*, 2013). El avance de la biología molecular en los últimos sesenta años han venido a revolucionar la manera de visualizar la biología en general. En el área de la biología molecular, todos los días se publican nuevos datos que nos permiten una mayor comprensión y un entendimiento más amplio de los procesos biológicos (Salazar, *et al.*, 2013).

Sin embargo, la visión de la Naturaleza —o de la realidad— afirma Nicolescu (2006) no solo es una construcción social, sino un acuerdo inter y trans subjetivo de una comunidad. Las descripciones de la naturaleza dependen así del imaginario de cada época que, a su vez, depende de una multitud de parámetros; por ejemplo, el grado de desarrollo científico, de las técnicas y tecnologías, del arte y de muchas otras. Así, la realidad, dice Nicolescu, es una constante fluctuación donde todo lo que podemos hacer es comprender aspectos parciales de la realidad gracias a nuestro pensamiento forjado a partir de procesos de extracción, fenómenos y leyes. Por lo que, es interesante y necesario considerar en nuestro pensamiento la existencia de diferentes niveles de realidad, al igual que lo plantea Nicolescu, como un

conjunto de sistemas invariantes a la acción de varias leyes generales, lo cual, nos permite formular una nueva imagen de la naturaleza que actúe de manera afable sobre todos los campos de conocimiento:

[...]the abstraction is no longer a simple tool to describe reality but a constitutive part of reality itself.

-Nicolescu

Así, esta tesis titulada *El Sonido de la Vida Vegetal* se esfuerza en la difuminación de las barreras que enmarcan temas y realidades aparentemente inconexas como son la ciencia con el arte, la biología con el sonido y al ser humano —tecnológico— con la naturaleza; generando puentes que faciliten el libre tránsito de información entre sistemas a partir de un proyecto de creación de arte sonoro que hable sobre la naturaleza vegetal.

De lo anterior surge la necesidad de vincular (a partir del arte sonoro) temas que giren en torno a la ecología, a la tecnología y a la sociedad mediante la triangulación de: a) un sistema informativo y biológico, que provea de materia prima y del discurso o significado de valorización de la naturaleza; b) un sistema de producción artística o sistema sonoro el cuál fácilmente nos brinde (según el modo de estructuración) una experiencia comunicativa y sensible; y c) un sistema tecnológico que nos posibilite de las herramientas necesarias para llevar acabo la traducción de nuestros sistemas de organización: biológico-genético a sonido.

1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Sonido de la Vida Vegetal, extrapola la información obtenida de la planta modelo *A. thaliana* al resto de plantas *Angiospermas* (plantas con flores) gracias a las características que comparten las plantas con *semillas* en su estructura y en su patrón de desarrollo. Tales características están determinadas, en gran medida, por una clase de *genes* denominados *MADS-box*. La expresión de los genes se lleva a cabo por mecanismos altamente conservados y este se refiere al proceso mediante el cual la información contenida en un *gen* es traducida para la codificación de proteínas funcionales en los sistemas vivos (mecanismos de *expresión genética: transcripción y traducción*) (Fig. 1). De tal manera que el sistema resultante de producción sonora no es específico de las plantas sino que puede ser utilizado para producir sonido a partir de información genética proveniente de otros organismos no vegetales.

Además de llevar a cabo lo anterior —la producción de sonido a partir de información genética o sonificación del fenómeno vegetal desde un enfoque de la biología molecular, la bioquímica y del desarrollo—, también se propone una experiencia sonora para dispositivo móvil que vincule el resultado sonoro de la sonificación, la cual se dividió en dos modelos de diseño que surgen de gestar dos tipos de analogías: 1) *sonificación del genoma* de *A. thaliana*, analogía de que toda la información genética está contenida en cada una de las *células* que conforman a la planta por lo que se escucha a lo largo de toda la experiencia; y 2) *sonificación por estadios*, analogía de la expresión de genes tipo *MADS-box* en los diferentes estadios del ciclo de vida de *A. thaliana*. Los estadios de su ciclo definen los eventos sonoros en el plano temporal de acuerdo a cuántos y cuáles genes están involucrados en dicho momento.

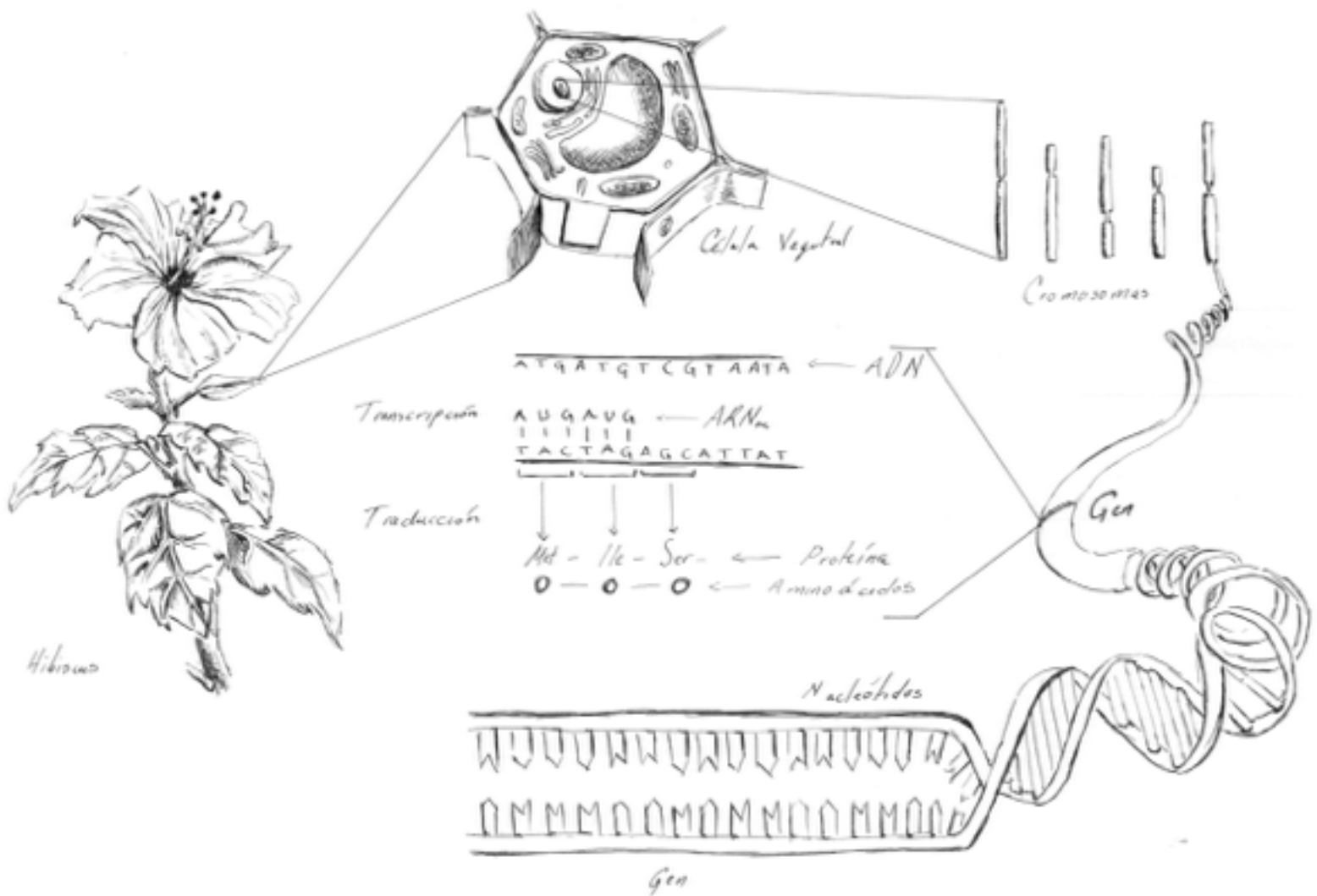


Fig. 1. Expresión genética. Las características de las células vegetales que conforman las diferentes estructuras de la planta depende de la expresión de genes específicos. Los genes son regiones discretas del ADN, el cual se encuentra empaquetado en los **cromosomas**. El mecanismo de expresión se compone de dos procesos: transcripción y traducción. Mediante estos mecanismos se otorga el **fenotipo** característico de cada especie.

De lo anterior surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿De qué manera se puede generar un modelo óptimo y coherente de sonificación que mantenga las relaciones del sistema biológico vegetal? y ¿de qué manera se presentarán los resultados sonoros?

Para poder responder a las preguntas anteriores de investigación se sistematizaron las problemáticas en dos categorías: una problemática ecológica-social y una problemática técnica-metodológica. La primera problemática busca responder al modo en cómo se puede generar un espacio de reflexión y de valorización hacia el mundo vegetal a partir de la exposición sonora de la información biomolecular y bioquímica de la vida de las plantas. La segunda problemática busca encontrar una manera óptima del diseño de traducción del sistema biológico al sistema sonoro manteniendo las características sistémicas de los elementos que los componen, resolviendo un modelo eficaz de sonificación que considere los diferentes niveles que conforman tanto al sistema de información —genético vegetal— como al de producción —sistema sonoro— con la finalidad de ofrecer al usuario una experiencia multi-informacional o *multimodal* de lo que implica las ciencias biológicas, el procesamiento de los datos a su respectiva representación sonora y su inmersión a un espacio natural mediante la exposición en una instalación (instalación sonora para dispositivo móvil). Dichas problemáticas encuentran solución a partir de los siguientes objetivos:

- Objetivo en dimensión ecológica-social:

Invitar al usuario a visitar espacios naturales que fomenten la promoción de estrategias de conservación y valorización hacia los sistemas vegetales así como una autoreflexión y un replanteamiento del papel que desempeñamos como elemento inseparable de los sistemas ecológicos.

- Objetivo en dimensión técnica-metodológica:

Realizar la traducción de los genes MADS-box a sonido (sonificación) buscando un método coherente del flujo de la información del sistema biológico al sistema sonoro.

2

PENSAMIENTO COMPLEJO

The concepts are, so to say, the privileged points where the different Levels of Reality are interweaving

-Heisenberg

Con respecto al capítulo anterior es necesario enmarcar el trabajo en el pensamiento complejo, para <<hacer visible lo invisible>> como mencionan Maldonado & Gómez (2010) y así poder hacer tangible los niveles biomoleculares que están involucrados en el desarrollo de las plantas. Niveles que a simple vista no se pueden observar y que mediante un reconocimiento del pluralismo en las epistemologías, en las metodologías, en los tipos de racionalidad, en los lenguajes y en las formas de pensar se pueden materializar desde el sonido. De manera tal, que emerjan a partir de las ciencias nuevas formas de expresión artística que absorban el exponencial aumento de información junto a las nuevas tecnologías para su análisis. Difuminando los límites en los significados que enmarcan a nuestro tema de estudio, la biología vegetal, el cual es inseparable del sujeto o investigador quien de manera ventajosa formulará relaciones desde la complejidad hacia el sonido.

El concepto complejidad fue definido por el filósofo y sociólogo francés Edgar Morín en 1977 como un pensamiento sistémico que implica simultáneas dimensiones complementarias las cuales nos ayudan a comprender de una manera más amplia la realidad de los diversos fenómenos. Morín define a los *sistemas complejos* como sistemas abiertos que están formados por un número grande de partes interactuantes e interdependientes que se organizan entre sí para un fin común. Sistemas que interactúan profusamente con su entorno obteniendo información, materia y energía necesarias para su adaptación y subsistencia. Así, los sistemas tanto biológico como sonoro desde un enfoque del pensamiento complejo, comprenden un sinfín de factores que interactúan entre sí a diversas escalas y



Fig. 2. Estructura primaria de la planta y sistemas de tejidos. La planta esta conformada por diferentes órganos, por ejemplo: hoja, tallo y raíz; y cada uno de ellos se forma a partir de tres sistemas de tejidos: sistema dérmico (protección y prevención de la pérdida de agua), sistema vascular (transporte de agua y sales y transporte de sustancias elaboradas y metabolitos) y sistema fundamental (fotosíntesis, almacenamiento, regeneración, soporte y protección) (Márquez, et al., 2013).

que gracias a esas interacciones es posible —a una escala perceptual humana— la observación de la variabilidad del fenómeno en el plano temporal tanto del sonido como de la vida. Por ello es necesario considerarlos como fenómenos que implican una cooperación de diferentes elementos o *variables*, que son indisociables y que confieren en su conjunto las propiedades que los caracterizan en un contexto determinado constituyendo un momento específico denominado *estado*.

La descripción de la vida de las plantas se ajusta fácilmente al enfoque sistémico y complejo ya que están bien delimitados los estados o estadios de su ciclo de vida, el cual implica de manera general los procesos de germinación, crecimiento, reproducción y muerte. Tales eventos dependen tanto de variables genéticas como de la interacción de las mismas con el medio ambiente ya que, al ser organismos *sésiles*, han desarrollado estrategias de crecimiento plástico que dictan el desarrollo de sus diferentes estructuras y tejidos a lo largo de su vida. Los diferentes estadios en el ciclo de vida de la planta *A. thaliana* son productos de la proliferación celular en zonas denominadas *meristemos* y de la *diferenciación celular* en zonas en donde, las células proliferativas, se alargan y adquieren sus características finales para formar tejidos y éstos, a su vez, órganos. Los órganos son los encargados de realizar las diversas funciones vegetativas y reproductivas de la planta. Todos los tejidos que estructuran los diversos órganos constituyen la estructura primaria de la planta (Márquez, *et al.*, 2013) (Fig. 2).

Existe una gran cantidad de información genética sobre el desarrollo de la planta modelo *A. thaliana* por lo que, en esta tesis, se usará como sistema modelo para el proceso de síntesis de sonido, así también por sus particularidades biológicas que la convierten en un punto de referencia para facilitar la comprensión de los sistemas vegetales *Angiospermas*. La información con la cual se trabajó se encuentra digitalizada y almacenada en la base de datos *National Center for Biotechnology Information* (NCBI), plataforma que aglomera y actualiza información genética de manera gratuita.

Por otro lado, el sistema sonoro también puede ser entendido como un *sistema complejo* y las diversas *variables de estado*, por ejemplo, la *frecuencia*, la intensidad o el timbre por mencionar algunas, son quienes lo caracterizan. Asimismo la interacción de ondas simples con sus respectivas modulaciones de

sus parámetros produce ondas complejas, a este tipo de técnica de síntesis se le llama *síntesis aditiva*. En base a esta técnica se genera una analogía de la complejización biológica: cada onda sonora simple es sintetizada a partir de las características bioquímicas de los elementos unitarios que componen a las biomoléculas mientras que el número de elementos sonoros depende del conjunto de elementos que configura a las macromoléculas esto quiere decir que las combinatorias seriadas de los elementos que componen a la macromoléculas de ADN y que en su funcionamiento involucra la configuración de genes y codificación de proteínas dictarán la cantidad de elementos sonoros que aparecen en el plano temporal, en otras palabras a mayor expresión genética mayor densidad sonora.

De tal modo, que el proceso de sonificación exige una articulación de diversos saberes (arte-ciencia-tecnología) que por un lado nos provean de información y significado, y por otro, de técnicas necesarias para el uso de herramientas tecnológicas que nos permitan llevar acabo los procesos de análisis de datos y de producción de sonido.

3

TRABAJOS QUE ABORDAN LA COMPLEJIDAD (ARTICULACIÓN ARTE- CIENCIA- TECNOLOGÍA)

Las nuevas prácticas dedicadas a la articulación del arte, la ciencia y la tecnología son cada día más demandadas. En el trabajo de Adam Neely (2017) se interrelaciona metafóricamente a los sistemas sonido-color y tono-ritmo; este trabajo se encuentra expuesto en la charla *Loop - New horizons in Music: Polyrhythms* de *TED-talk* (2017). Él menciona que la construcción de su argumento es a partir de la unión de pensamientos separados (física y música). Neely en su charla afirma que el color, el ritmo y el tono son lo mismo solo que ocurriendo a distintas velocidades y que las diferencias radican

en los límites de nuestros *umbrales de percepción*. Así, Neely en su charla concluye que todo es lo mismo metafóricamente hablando, dando pautas a las infinitas extensiones posibles en el conocimiento y en la percepción del mundo.

Por otro lado, el trabajo de la artista Nathalie Miebach, también expuesto en *TED-talk*, con su charla *Art made of storms* (2011), aborda la cultura de la complejidad al desarrollar unas esculturas a partir de datos meteorológicos, las cuales son flexibles en su lectura dependiendo del contexto que las contenga. Miebach menciona en su charla que su trabajo ubicado en un museo de arte funciona como esculturas, en un museo de ciencia se vuelven una visualización de datos y en un espacio musical una partitura. Así, Miebach en su charla reflexiona sobre los vocabularios pertenecientes al arte o a la ciencia ya que, en su proceso de traducción de la recopilación de los datos meteorológicos —o una realidad hecha números, como ella lo llama— permite llevar a acabo procesos tanto analíticos como de producción, que en un determinado entorno pueden ser interpretados de diversas maneras.

Trabajos que articulan la informática, al arte y a la biología

The metaphor is that the whole model becomes a single sounding object.

-Hermann

Desde 1908, el sonido ha representado en el ámbito científico una herramienta útil de transferencia de información, tal es el caso del *contador de Geiger* (Rutherford & Geiger, 1908), dispositivo generador de sonido que permite medir la radioactividad. Este fue un primer intento el cual más adelante se definiría como sonificación. En 1986 surge otro intento de sonificación (aunque este concepto aún no estaba definido) ligado al arte con el trabajo de la pareja Ohno (Ohno & Ohno, 1986) quienes idearon un sistema de traducción de las unidades básicas del ADN obteniendo una secuencia musical de cuatro notas distintas. Pero no es hasta los años noventa en la *Conferencia Internacional para la Exhibición Auditiva* (ICAD, 1997) donde se llegó a la conceptualización de estos métodos proponiendo la definición del concepto de sonificación como el uso de audio sin voz para transmitir información.

Para inicios del siglo XXI emergen otros trabajos que involucran directamente a la sonificación a partir de la triangulación de la informática, del arte y de la biología, ya sea genética o vegetal. Tales como *genoma Music (2005)*, el *Estudio Biopus, gene2music* de Takahashi y Miller (2007), *Pulsu(m) Plantae (2010)*, *trees: Pinus sylvestris (2015)*, la sonificación de genes de Mark Temple (2017) y más recientemente, la sonificación de proteínas con el uso de inteligencia artificial de Chi-Hua Yu *et al.* (2019). Además, han aparecido recientemente foros especializados en sonificación como es sonifyer.org, donde se muestra una nueva tendencia inter y transdisciplinaria de las nuevas prácticas alrededor de la tecnología, la naturaleza y la cultura.

4

GENERALIDADES DEL SISTEMA DE ARTICULACIÓN

Debemos tener cuidado en no confundir los niveles de realidad y los niveles de organización, tal como lo menciona Nicolescu:

The organisation levels correspond to different arrangements of the same fundamental laws, while the Levels of Reality are generated by the coherent action of radically different ensembles of laws. [...] Due to the notion of Levels of Reality, the Reality acquires a multidimensional and multireferential structure. The Levels of Reality also allow defining useful notions as: levels of language, levels of representation, levels of materiality or levels of complexity.

Los niveles de organización, dice Nicolescu, se refieren a los arreglos de las mismas leyes fundamentales, es decir, diferentes sistemas son regidos y configurados por el mismas leyes. En cambio, los niveles de realidad son la acción coherente del conjunto de leyes fundamentales entre sistemas, por lo que los diferentes niveles de realidad poseen una estructura multidimensional y multireferencia compuesta por niveles mas pequeños: de lenguaje, de representación, de materialidad y

de complejidad; gracias a esta organización de la realidad planteada por Nicolescu es posible hacer las relaciones de las generalidades del sistema.

Las generalidades del sistema (planteamiento de esta tesis) se enmarcan en el campo de investigación *Sound and Music Computing* (SMC) el cual Bernardini & De Poli (2007) lo definen como un campo abierto en donde se abordan diversos temas que giran en torno al sonido, a la música y a su interacción; con el objetivo básico de comprender las diferentes facetas del sonido desde un punto de vista computacional (Widmer, *et al.* 2007).

Cada tema de investigación en el campo de SMC puede ser investigado a partir de dos diferentes enfoques: analítico o sintético. El enfoque analítico se refiere al estudio de la energía física del sonido codificada al significado; mientras que el enfoque sintético va en dirección opuesta, del significado a la energía física del sonido codificado (Widmer, *et al.* 2007). El segundo enfoque, el enfoque sintético, es el que nos interesa para poder llevar a cabo el desarrollo de nuestra metodología del diseño de la sonificación, el cual no niega el enfoque analítico ya que es necesaria la comprensión de las descripciones sónicas para la generación y el procesamiento del sonido.

El sonido, desde este campo de estudio (SMC) no solo es considerado como un aspecto físico sino también como un canal de comunicación transportador de información (Widmer, *et al.*, 2007). De tal manera que al considerar al sonido como un vehículo de información, es posible generar una relación con el significado del material biológico (molecular y bioquímico), el cual en su estructura y funcionalidad, contiene y transporta, del mismo modo, información (Horton, *et al.*, 2008). Tal relación, del material genético al sonido, se explica en el capítulo *Marco teórico-metodológico* en el que se desarrolla el diseño de la sonificación.

Por lo tanto, la sonificación consiste, a grandes rasgos, en dar una representación audible de la información, de los eventos y de los procesos vegetales. Por lo que la tarea principal del diseñador del sonido es encontrar un mapeo efectivo entre los datos (biológicos) y los objetos sonoros que se supone los representan de manera perceptiva y cognitiva.

Existe una especialización de la sonificación: la sonificación interactiva (otro campo de estudio del SMC: *Sound Interaction Design - SID*), la cual aprovecha la difusión cada vez mayor de las tecnologías de detección y activación para promover la interacción persona-computadora, de modo que, el oyente participe activamente en un bucle de percepción-acción en donde se generen exploraciones activas de los espacios a partir de experiencias multimodales y más atractivas (Fig. 3) (Widmer, *et al.* 2007). Por lo que, el sonido debe entenderse como un fenómeno percibido por el sistema auditivo humano para darle identidad. La ***identidad del sonido*** es definida por Simon Carlile (2011) como una característica sumamente importante de carácter biológico y que no puede ser entendida sin un receptor que distinga a partir de su percepción el ***espectro audible***, el timbre, sus características de temporalidad y la ubicación en el espacio de la fuente emisora.



Fig. 3. Adaptación del modelo SMC con un enfoque sintético. Se muestra el modelo de la investigación en su vista más amplia: la información de entrada (inputs) que provienen de la biología de las plantas (significado) es traducida en sonido. La salida de audio (outputs) presentada en una sonificación interactiva a partir del desarrollo de una aplicación para dispositivo móvil. Este sistemas multimodal propone así, para el oyente, una nueva interpretación y experimentación tanto de los conceptos de la biología como del sonido que emana de la vida de las plantas.

5

EXPLORACIONES ACTIVAS

Generar exploraciones activas en jardines botánicos sumerge a lo usuarios de la instalación a la Vida Vegetal. Los organismos vegetales poseen un papel muy importante en el mantenimiento de los sistemas naturales, además de que las encontramos en todo lugar y en todo momento: creciendo en nuestros campos, en nuestras casas, en las ciudades y en los jardines, formando parte intrínseca de nuestra alimentación, de nuestra cultura y de nuestra historia.

En el libro *Biología de las Angiospermas* (2013) se expresa la dependencia de este grupo de organismos en la vida humana y por ello miles de investigadores en el mundo han dedicado y dedican sus vidas a elucidar los misterios del origen, estructura, funcionamiento, evolución y ecología de las plantas con flor. Por lo que cada investigador gracias a su labor científica pasa a formar parte activa del desarrollo de esta obra, que sin sus definiciones sobre el mundo vegetal y la evolución de las tecnologías sería imposible poder llevar acabo estas nuevas formas de producción sonora.

Para poder generar tales experiencias activas o multimodales, se propone una instalación sonora basada en el *sound map* o *cartophony* con la ayuda de un teléfono móvil con GPS. El *sound map* o *cartophony* es definido por Samuel Thulin como un método que facilita la percepción de diferentes *estratos* de información sonora a partir de la introducción de variables dinámicas al espacio en el sistema de sonificación diseñado. Esto quiere decir que el espacio se vuelve parte fundamental del significado de la información sonificada. A este tipo de instalación se le conoce también como *sistema de sonido geo-localizado*, el cual se justifica en la generación de procesos comunicativos a partir de la no separación de las representaciones y las prácticas con la característica de, como menciona John Krygier en su artículo *Sound and Geographic Visualization* (1994), <<la agregación de capas adicionales de

información al sistema>> volviendo a la sonificación un <<mapeo multisensorial>> de manera que se amplíen los alcances de la percepción del usuario respecto a la vida vegetal mediante la inclusión de la localización del oyente en el espacio (espacios dedicados al resguardo de la vida vegetal así como a la educación ambiental).

Por lo anterior, la instalación sonora para dispositivo móvil que se propone en esta tesis está diseñada para funcionar o emitir el sonido únicamente en jardines botánicos dentro del país, volviéndolos escenarios de la sonificación. Su desarrollo involucra tres aspectos importantes a considerar: 1) usuario con especialización estéreo (audífonos), 2) tecnología de desarrollo de la aplicación para dispositivo móvil y 3) el entorno al que pertenece.

5.1. Usuario con espacialización estéreo

El usuario se refiere a la persona que interactúa con la obra en el espacio natural; para que el usuario pueda experimentar la sonificación se recomienda disponer de audífonos lo cual lo posibilita de una experiencia sonora con espacialización estéreo (*localización binaural*). La especialización estéreo se refiere a la existencia de dos fuentes sonoras que permiten el movimiento del sonido. En la síntesis de sonido la variable que modula este fenómeno se denomina *paneo* ($\backslash pan$) y es un elemento muy importante en el diseño de la sonificación. El uso de audífonos, menciona Hunt & Hermann (2011) es un modo de privacidad, por lo que la obra está pensada para individuos solitarios que busquen una conexión con la naturaleza; enfatizando las relaciones simbióticas entre el usuario, el sonido y el espacio.

Además, el uso de audífonos para esta obra involucra la no perturbación tanto del espacio como del sonido y se vuelve una forma no invasiva de interacción con el jardín y con el sonido, debido a que el sonido viajará sin impedimentos al oído del receptor generando un *campo libre* o *free field* (Everest &

Pohlmann, 2009) lo cual no altera el comportamiento del sonido que esta siendo emitido (no existen barreras físicas como edificios, habitaciones, árboles, entre otros) manteniéndolo lo mas fiel posible.

5.2. Tecnología de desarrollo de la aplicación para dispositivo móvil

La tecnología de desarrollo de la aplicación para dispositivo móvil tiene como objetivo ampliar el alcance de la experiencia, ya que como instalación no solo estará disponible en un lugar y una fecha definida, sino que estará disponible en 22 jardines (*Ver anexos*) repartidos en varios estados del país. Volviendo a la obra de acceso libre aunque condicionada a los siguientes requerimientos: un dispositivo móvil *Android*, acceso a GPS (acceso a red), audífonos y un poco de espacio en el dispositivo para descargar e instalar la aplicación (57.9 MB).

El desarrollo de la obra involucra así el uso de dos diferentes softwares: *SuperCollider* y *Unity*. El primero se utilizó como herramienta de análisis de la información así como para la síntesis de sonido (sonificación) y el segundo se utilizó para el desarrollo de la aplicación. La descripción detallada de cada uno de ellos está contenida en el apartado *Diseño del modelo de la sonificación*, el cual ahonda en las descripciones de los sistemas biológico y sonoro, su sistematización, sus conexiones de flujo y su posterior desarrollo así como los códigos QR que llevan a los enlaces de *GitHub*.

5.3. Entorno al que pertenece

Las plantas, como todos los demás organismos, forman parte integral del ecosistema y por ello se ven sometidos a la acción continua de factores tanto *bióticos* como *abióticos* y a su vez ejercen sobre su entorno un efecto determinado; esto constituye una ley en ecología: la de las interacciones (Márquez, *et*

al., 2013). Nosotros como organismos también tenemos la responsabilidad de interrelacionarnos con el resto de la vida, sin embargo y tristemente, el papel tan importante que deberíamos desempeñar en la ecología lo hemos transgredido, atacándola. Por ello, la tarea tan urgente de invitar al usuario a ubicarse en espacios de respeto y educación vegetal que propicien una *simbiosis* entre el ser humano tecnológico y la naturaleza. Tal como dice Widmer, *et al.* (2007) estos desarrollos tecno artísticos se vuelven herramientas necesarias con fuertes implicaciones en la vida social y cuya importancia es subestimada asombrosamente. De modo que, esta instalación se vuelve una estrategia de conservación la cual puede ser experimentada en espacios de diferentes escalas que van desde espacios arquitectónicos, como el jardín botánico cosmovitral de Toluca, hasta contextos urbanos e incluso dimensiones verdaderamente geográficas, como es el jardín etnobotánico Helia Bravo Hollis en Zapotitlán Salinas.

En conclusión, los diferentes jardines botánicos son pensados como parte fundamental de la obra resultante. Primero por que fungen como parte inherente a nuestra ecología; segundo, porque los jardines botánicos se han dedicado en gran parte a la educación ambiental y tercero porque son espacios abiertos al público, a la contemplación y al conocimiento. Por lo que, la obra es de tipo *site specific*, lo que quiere decir que en su conjunto como instalación sonora debe ser integrado un jardín botánico y es éste el que le da sentido.

Para lograrlo, como dice John G. Neuhoff, se debe considerar la difusión de las intenciones del diseñador, sobre cuál es la información que se quiere transmitir, qué eventos y qué procesos para que en su experimentación exista una sincronía con lo que se escucha, se ve y se experimenta.

III

MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO

Lo simple no existe; solo existe lo simplificado.

-Bachelard

Entender la metodología —para este trabajo— aislada del marco teórico sería imposible. Por ello, se redactó en este capítulo *Marco teórico-metodológico* las transiciones que van de las definiciones biológicas a las definiciones sonoras. Tal como Morín menciona (Morín, 1997), volviéndose las definiciones interesantes puntos de partida para la organización, que en este caso en particular es el sonido. El sonido organizado o bien estructurado funciona —a partir de nuestra percepción— como un fenómeno increíblemente emotivo y detonador de pensamientos, lo que hace posible —gracias a la evolución de las tecnologías— su síntesis y modelado a partir del análisis de la información.

La conexión de dichos métodos de análisis y síntesis de sonido son cada vez más comunes en las prácticas de investigación artística, quienes en su proceso buscan la inclusión y la no-separabilidad. Chapman & Sawchuk (2012) en su texto *Research-Creation: Intervention, Analysis and “Family Resemblances”* caracterizan a este tipo de prácticas como una integración de la investigación con procesos creativos —componentes estéticos experimentales— o con el desarrollo de obras artísticas con el objetivo de disolver las líneas que enmarcan a las diferentes disciplinas en un único espacio.

La inclusión del aspecto tecnológico en la investigación artística requiere, además, nuevas formas de abordar nuestras metodologías, la cual se embarcan desde el modelo de investigación *Sound and Music*

Computing (SMC) definido por Bernardini & De Poli en 2007, el cual exige en las prácticas el conocimiento de las implicaciones del uso del código y del software.

Es interesante ver como David Berry en su libro *The Philosophy of Software* (2011) describe al código y al software —al proceso y a la aplicación— en dos grandes niveles, los cuales resultan ser muy semejantes a los niveles abordados desde la genética, los cuales se refiere al material genético y a su expresión de genes que dicta el fenotipo de un organismo. Ambos van de lo micro a lo macro, o como menciona Berry de lo literario a lo mecánico, de lo textual a lo procesual; requiriendo la existencia de uno con el otro a la vez para la existencia de las plantas o del software.

A new Relativity Principle emerges from our model of Reality: no Level of Reality constitutes a privileged place from where one could understand all the other Levels of Reality. A Level of Reality is what it is because all the other levels simultaneously exist.

-Nicolescu

Así, la información biológica que se encuentra almacenada en la molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico) —el texto— con sus respectivas características de estructuración y expresión genética es leído e interpretado —*compilado*— por un *complejo proteico* que se encarga de la codificación de proteínas que finalmente determinarán el fenotipo del organismo en un momento determinado. Lo anterior únicamente hablando del sistema biológico pero si la misma información que dicta el desarrollo de las plantas es compilada o ejecutada por una computadora con el objetivo de generar sonido es posible que obtengamos un resultado sonoro o un fenotipo sonoro el cual mantenga las características del código anteriormente diseñado en función de la genética de la planta. Por lo tanto, el sonido y la vida en ese proceso de *compilación* o sus respectivos programas corriendo derivarán según los objetivos trazados en: sistemas operativos, programas, aplicaciones, sonido, tejidos celulares, expresión de estructuras orgánicas, etc. En dónde Berry hace una distinción de acuerdo con el nivel en el que se esté operando:

As an analogy we can think of code as the ‘internal’ form and software as the ‘external’ form of applications and software systems. Or to put it slightly different, code implies a close reading of technical systems and software implies a form of distant reading.

-Berry

La analogía que plantea Berry de las formas “internas” y “externas” se relacionan con los dos momentos claves de procesamiento del sonido a partir de la biología. Esto quiere decir que el resultado sonoro de esta tesis es esa “lectura distante” que se codifica a partir de la información genética, la cual para su producción requiere de sistemas técnicos específicos que permitan su lectura y producción. Esta analogía es mucho más compleja ya que para su funcionamiento es necesaria la forma “interna” que involucra todos esos niveles intermedios que hacen posible el tránsito de la información del genotipo al fenotipo o del código al software, aunque mucho de esos niveles (por ejemplo, la programación de bajo nivel en el campo tecnológico o el sistema exógeno del cual depende la expresión genética) son omitidos y aún así ambos sistemas pueden funcionar. Sin embargo, no debemos obviar su existencia ya que sin esos niveles intermedios no existirían los sistemas que fueron ocupados.

De modo que, hablar del genotipo en esta tesis se refiere a la forma simbólica y abstracta de cuatro caracteres (A, G, C y T) y sus diferentes arreglos en secuencias denominadas genes (x número de caracteres) los cuales solo pueden ser entendidos e interpretados desde la computadora quien los almacena en archivos de texto para que posteriormente puedan ser utilizados. Esto advierte que no se hizo ningún tipo de experimentación biológica en el laboratorio y solo fueron descargados los archivos de texto desde la base de datos NCBI. En vista de que la información utilizada fue extraída de organismos vivos para almacenarla y procesarla digitalmente esta investigación artística busca poner en contacto el plano digital —el mundo transformado en datos, recurso para ser utilizado— de la genética de las plantas con la naturaleza o plano analógico con la idea de regresar la información a su lugar de origen mediante el sonido (Fig. 4), tal como menciona Berry (2011):

Software is a tangle, a knot, which ties together the physical and the ephemeral, the material and the ethereal, into a multi-linear ensemble that can be controlled and directed.

-Berry

Por lo que, el software es quien nos permite controlar y dirigir la construcción del puente o de la sonificación que nos permita el tránsito de la información de un sistema a otro con la finalidad de, como menciona Berry, poner en contacto a la materia orgánica con lo etéreo de las plataformas digitales que reúnen y actualizan de manera acelerada el significado de lo biológico.

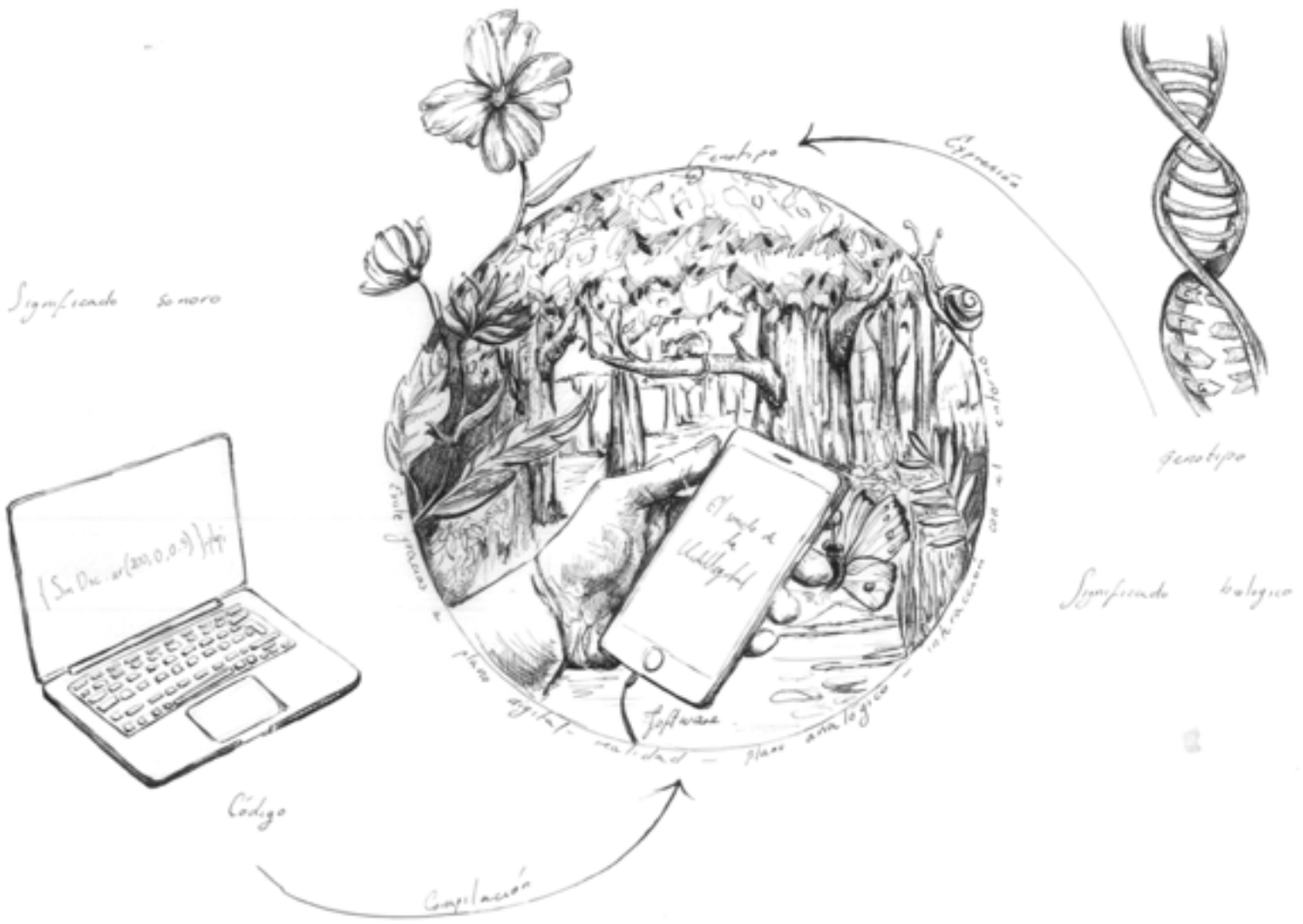


Fig. 4. Analogía **genotipo**/fenotipo y código/software. El genotipo o información genética es expresado/compilado en fenotipo. El código o la información digital es expresada/compilada en el software. El fenotipo y el software son el conjunto de características propias y visibles del sistema expresado en el organismo vivo o compilado para generar sonido el cual se encuentra cargado en una aplicación. En el centro se muestra la interacción de uno con el otro en el entorno, donde el plano digital y el plano analógico son interdependientes para la experiencia diseñada del “El Sonido de la Vida Vegetal”.

1

SONIFICACIÓN

Sound is a medium of representation and a medium of perception at the same time.

-Claudia Tittel

Para llevar a cabo el diseño de la sonificación, solo se consideraron ciertos enfoques del sistema vegetal, ya que estos como dicen Márquez *et al.* (2013) son sistemas estructurales y funcionales altamente complejos constituidos por diversos niveles de organización (*molecular, celular, histológico, orgánico y organísmico*) interactuando entre sí y con el ambiente. Por tal motivo para éste trabajo únicamente se consideró: al sistema genético y proteico (transcripción y traducción), las estructuras químicas de los elementos que los conforman y el ciclo de vida de la planta modelo *A. thaliana*.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de traducción del sistema biológico al sistema sonoro se denomina sonificación y una de sus principales características es facilitar la lectura masiva de la información. Hunt & Hermann en *The Handbook Sonification* (2011) mencionan que el proceso de sonificación tiene la particularidad de ofrecer nuevas perspectivas de los datos que se examinan. De manera que este campo de estudio se divide en tres aspectos: a) la técnica de transformación de los datos, b) la implementación del algoritmo y c) la interacción de la sonificación con el usuario (Fig. 5).

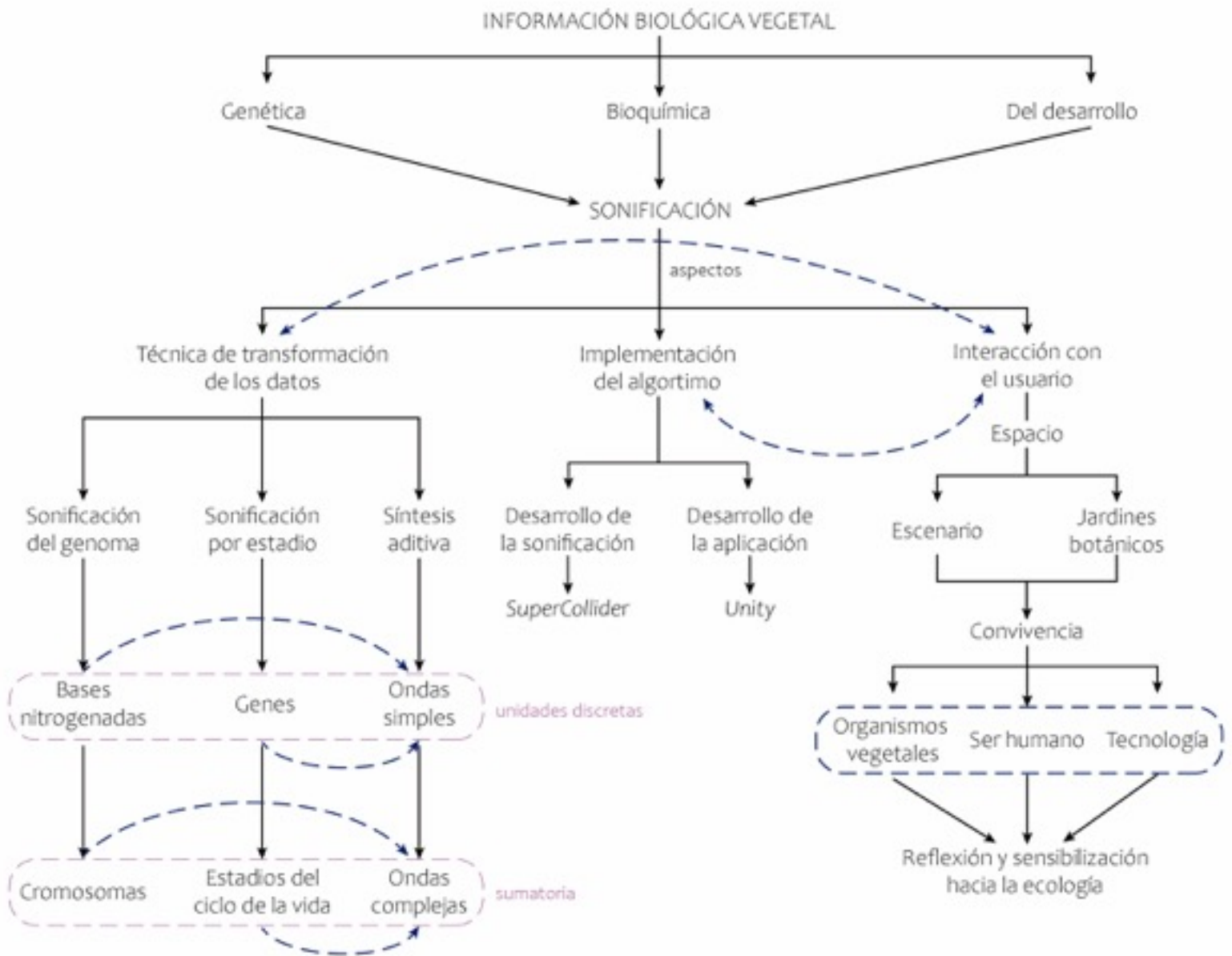


Fig. 5. Mapa conceptual de los diferentes aspectos de la sonificación. Para empezar, se debe delimitar la información que va a ser sonificada debido a la amplia cantidad que existe actualmente; se consideró únicamente a la información genética, a la información bioquímica y a la información que comprende la expresión de genes a lo largo del desarrollo de la planta *A. thaliana*. La sonificación consta de tres aspectos y cada uno de ellos está estrechamente relacionado; del tercer aspecto, la interacción con el usuario, dependen los dos primeros. 1) La técnica de transformación da como resultado un modelo de sonificación; el modelo diseñado se fundamenta en la síntesis aditiva, así pues, la sonificación del genoma completo es la suma lineal de las bases nitrogenadas; la sonificación por estadio es la suma de los genes que se expresan en un determinado

estadio del ciclo de vida de la planta; la síntesis aditiva, como técnica de síntesis de sonido, se refiere a la suma de x número de ondas simples para generar ondas complejas las cuales se definen de acuerdo a la cantidad y combinatoria secuencial de las unidades discretas que componen a los sistemas biológicos. 2) La implementación del algoritmo se refiere al uso del software para llevar a cabo el modelo diseñado de sonificación; en este caso para el desarrollo de la sonificación se ocupó SuperCollider y para el desarrollo de la aplicación Unity. 3) La interacción con el usuario se refiere al modo de presentación de la sonificación; para este trabajo la sonificación forma parte de espacios exclusivos, jardines botánicos; de tal manera que dichos espacios se vuelan escenarios del sonido que es estructurado a partir de la información genética que dicta el desarrollo de las plantas; así se gestó una convivencia simbiótica entre los organismos vegetales (su conocimiento), el ser humano y la tecnología con el objetivo de generar una reflexión y una sensibilización hacia la ecología.

De los aspectos anteriores, *la técnica* se ocupa de decidir las relaciones básicas de los datos con su eventual representación sonora. Dichas técnicas son categorizadas en: 1) *Parameter Mapping Sonification* (MPSon), 2) *Audification* y 3) *Model-Based Sonification* (MBS). Cada una de ellas es conceptualmente diferente y se adaptan a diversas situaciones. *La implementación de algoritmos* concierne a los diferentes lenguajes de programación y a cuestiones computacionales. Los dos aspectos anteriores (la técnica y la implementación de algoritmos) son parte fundamental del tercer aspecto, *la interacción de la sonificación con el usuario*, la cual involucra las necesidades del receptor así como sus acciones en respuesta al sonido percibido.

Para el desarrollo de la sonificación *El sonido de la Vida Vegetal* se utilizó la técnica *Model-Based Sonification* (MBS) desarrollada en el software *SuperCollider* bajo condiciones de interacción sonificación-usuario, exigiendo un estímulo dado (su ubicación en el espacio) por el usuario que excite al modelo dinámico desarrollado (abra el candado de sonido). Por lo que el usuario en esta sonificación debe ingresar a un espacio definido (jardines botánicos) para que el sonido sea reproducido. Así, el estímulo de ubicarse en espacios que promueven la educación ambiental pueda ofrecer información adicional acerca de los datos.

Otro aspecto importante en el desarrollo de la sonificación de *El sonido de la Vida Vegetal* es el uso del método *Sonic Interaction Design* (SID). El SID explora diferentes formas de cómo el sonido puede ser

utilizado en un contexto interactivo para transmitir información, significado, estética y emociones (Serafin, *et al.*, 2011). Aunque el método que se ocupó en esta sonificación fue de manera muy general, ya que solo existe un único estímulo pero suficiente para que los usuarios identifiquen nuevos roles en relación a los artefactos tecnológicos con el entorno natural.

Model-Based Sonification (MBS)

En esta técnica de sonificación se utilizan conjuntos de datos para configurar sistemas dinámicos con leyes y condiciones iniciales ya determinadas. En esta técnica debe existir al menos un estímulo excitatorio en el modelo dinámico que provea de una respuesta sonora de manera que ayude a percibir cambios útiles y significativos en el sistema (Hunt & Hermann, 2011).

Sin embargo, al desarrollar cualquier tipo de técnica de sonificación se debe tener en cuenta que el resultado ofrece una única vista sonora del conjunto de datos analizados, o en otras palabras, la sonificación propuesta en este trabajo ofrece una única representación del significado de la información biológica de *A. thaliana*. Por lo que, si el objetivo fuera entender el sistema biológico y dinámico a profundidad desde el sonido se necesitarían, como dicen Hunt & Hermann (2011), de varias vistas sonoras o varios modelos de sonificación. Sin embargo, ese no es nuestro tema de investigación, ya que ésta tesis busca una sola forma, lo más coherente posible, del paso de la información de un sistema a otro con la finalidad de ofrecer a los usuarios una experiencia agradable.

1.1. Por qué ocupar el material genético de *Arabidopsis thaliana*

A. thaliana pertenece al grupo de las *Angiospermas* o plantas con flores, grupo con una gran diversidad de formas y hábitats de vida pero que mantienen una organización estructural básica construida por raíces, tallo y apéndices como ramas, hojas y flores (Márquez, *et al.*, 2013). Estas características

compartidas son útiles para extrapolar información entre especies, por ello, es posible hablar en este trabajo de la vida vegetal debido a los principios básicos en el desarrollo de las plantas *Angiospermas*. Los factores de transcripción son proteínas encargadas del óptimo funcionamiento de estos principios básicos ya que regulan la expresión de una gran cantidad de genes. Las proteínas MADS son factores de transcripción que participan en todos los procesos de desarrollo de *A. thaliana* y se han estudiado ampliamente en el desarrollo de los órganos florales tanto en esta especie como en otras especies de plantas con flor (Smaczniak, *et al.*, 2012).

A. thaliana, además, posee gran importancia en el ámbito científico y es considerada un organismo modelo. Los organismos modelo son aquellos que tienen la particularidad de poseer características biológicas ideales en la experimentación como ser una planta pequeña y con un ciclo de vida corto y relativamente simple a nivel genético. Por su importancia, en el año 2000 fue secuenciado el genoma completo de *A. thaliana* por el proyecto AGI (*Arabidopsis Genome Initiative*).

El genoma completo (aproximadamente 25 498 genes empaquetados en cinco cromosomas) se encuentra disponible en la base de datos NCBI de forma gratuita así como las funciones que se han encontrado para algunos de los miembros de la familia de factores de transcripción tipo MADS, información relevante para el desarrollo de esta sonificación.

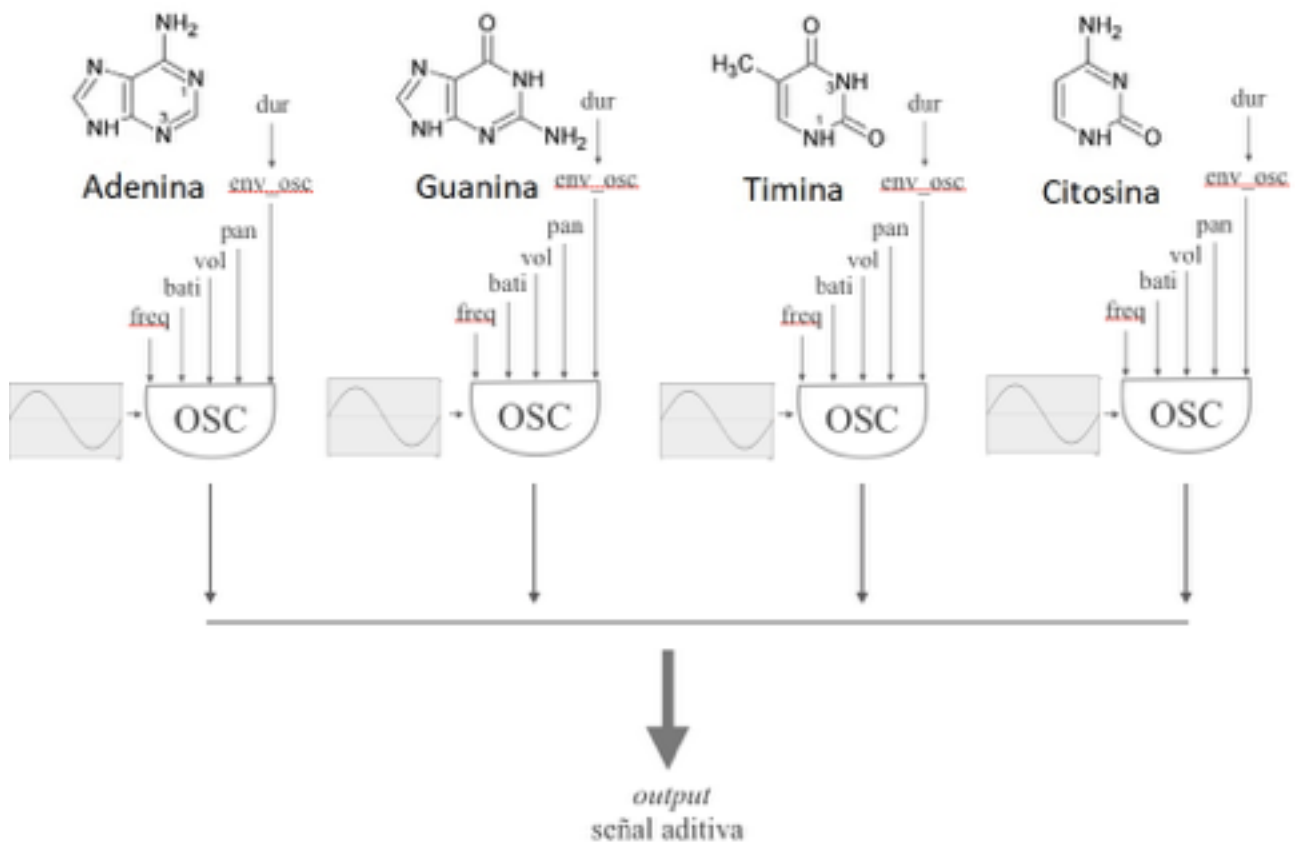
1.2. Propuesta del modelo de sonificación

The metaphor is that the whole model becomes a single sounding object.

-Hermann

La sonificación desarrollada para esta tesis se divide en dos partes: 1) la *sonificación del genoma* y 2) la *sonificación por estadios*. Cada una de ellas depende conceptualmente de información biológica distinta pero metodológicamente siguen el mismo principio de *síntesis aditiva*.

La *síntesis aditiva* es un método de síntesis de sonido que se refiere a la suma de varios *osciladores* individuales de *ondas sinusoides* para formar ondas compuestas de sonido (Roads, 1995). Con este tipo de método podemos tener el control individual de los parámetros de cada una de las ondas, como por ejemplo, la *frecuencia*, los *batimentos*, el *volumen*, el *paneo*, la *duración*, entre otros (Fig. 6). La modulación de cada *onda sinusoidal* es determinada, según la sonificación a la que nos refiramos (*sonificación del genoma o por estadios*), por la información obtenida de la bioquímica de las *moléculas* (*bases nitrogenadas* o *aminoácidos*) que componen el genoma de *A. thaliana* y del código genético con el cual se codifican a las diferentes proteínas que determinan el desarrollo de la planta.



*Fig. 6 . Método de síntesis aditiva. Los parámetros (frecuencia, batimentos, volumen, paneo y **envolvente**) de cada onda sinusoidal son modulados por la información de las bases nitrogenadas (A,G,T y C), por lo que, cada una de ellas es diferente. Este tipo de síntesis tendrá como output una señal aditiva o compuesta.*

1.2.1. Sonificación del genoma

La *sonificación del genoma* es la analogía de que toda la información genética se encuentra contenida en cada una de las células que conforman a la planta, por ello, el sonido se escuchara durante toda la experiencia sonora.

Recordado los aspectos de la sonificación, primero describiremos la técnica utilizada de transformación de los datos o el modelo de sonificación y posteriormente la implementación del algoritmo en el software *SuperCollider*. El tercer aspecto de la interacción de la sonificación con el usuario involucra los dos momentos de sonificación *sonificación del genoma* y *sonificación por estadio*, por tal motivo se describirá al final de la descripción de ambos momentos.

1.2.1.1. Técnica de transformación de los datos

El genoma se refiere al conjunto de genes (regiones codificantes) y regiones no codificantes que están contenidas en las células de un organismo empaquetados en estructuras denominadas cromosomas. La macromolécula que almacena esta información se denomina ADN. El ADN está estructurado por una serie de unidades discretas denominadas bases nitrogenadas, las cuales, codifican un lenguaje casi universal sobre la forma en cómo están diseñados los organismos vivos (Avery, *et. al.*, 1944).

Las bases nitrogenadas se denominan adenina (A), guanina (G), timina (T) y citosina (C) y su combinatoria da lugar a un mensaje encargado de conservar las características de cada especie. Por ello,

el orden exacto de las bases nitrogenadas es muy importante. Si se modifica alguna de estas bases o se cambia el orden se altera la información.

Cuando la información genética no es expresada, el ADN se encuentra en una estructura de doble hélice (Fig. 7). Las bases nitrogenadas de una de las cadenas de ADN se unen mediante puentes de hidrógeno a las bases nitrogenadas de la otra cadena, uniéndose siempre A con T mediante dos **puentes de hidrógeno** y G con C mediante tres puentes de hidrógeno. Así, una cadena de la doble hélice del ADN siempre es el complemento de la otra (Salazar, *et al.*, 2013).

La doble hélice del ADN se forma gracias a la estructura química de las bases nitrogenadas. Las bases nitrogenadas son moléculas formadas de átomos de carbono y nitrógeno que crean **anillos heterocíclicos**. Se conocen dos tipos de bases nitrogenadas: las **purinas** y las **pirimidinas**; las purinas se componen de dos anillos condensados mientras que las pirimidinas están formadas por un solo anillo. Los átomos de carbono (C) y nitrógeno (N) de los anillos se identifican mediante números naturales: del 1 al 6 para las pirimidinas y del 1 al 9 para las purinas (Salazar, *et al.*, 2013) (Fig. 8). La posición de los **puentes de hidrogeno** es muy importante para lograr la estabilidad de la doble cadena de ADN, por que los puentes de hidrogeno se forman en sitios potenciales y específicos (Horton, *et al.*, 2008).

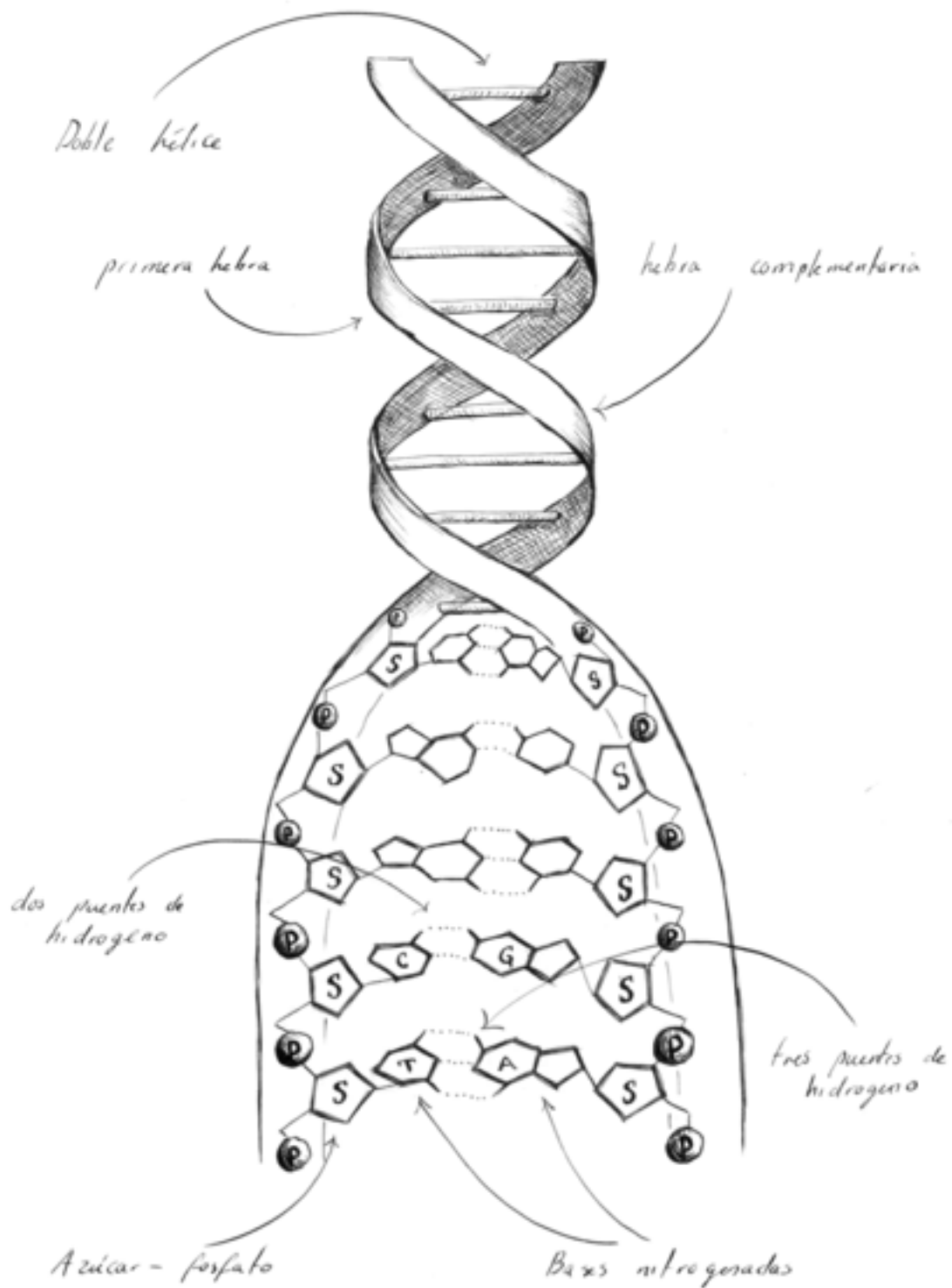


Fig. 7. Doble hélice del ADN. Apareamiento e interacción de bases complementarias en el ADN; el apareamiento de bases producen una estructura regular, donde una hebra es complementaria de la otra. La molécula de ADN se puede visualizar como una "escalera" que se ha torcido para formar una hélice y las bases apareadas representan los peldaños de la escalera mientras que los esqueletos de azúcar-fosfato, representan los soportes.

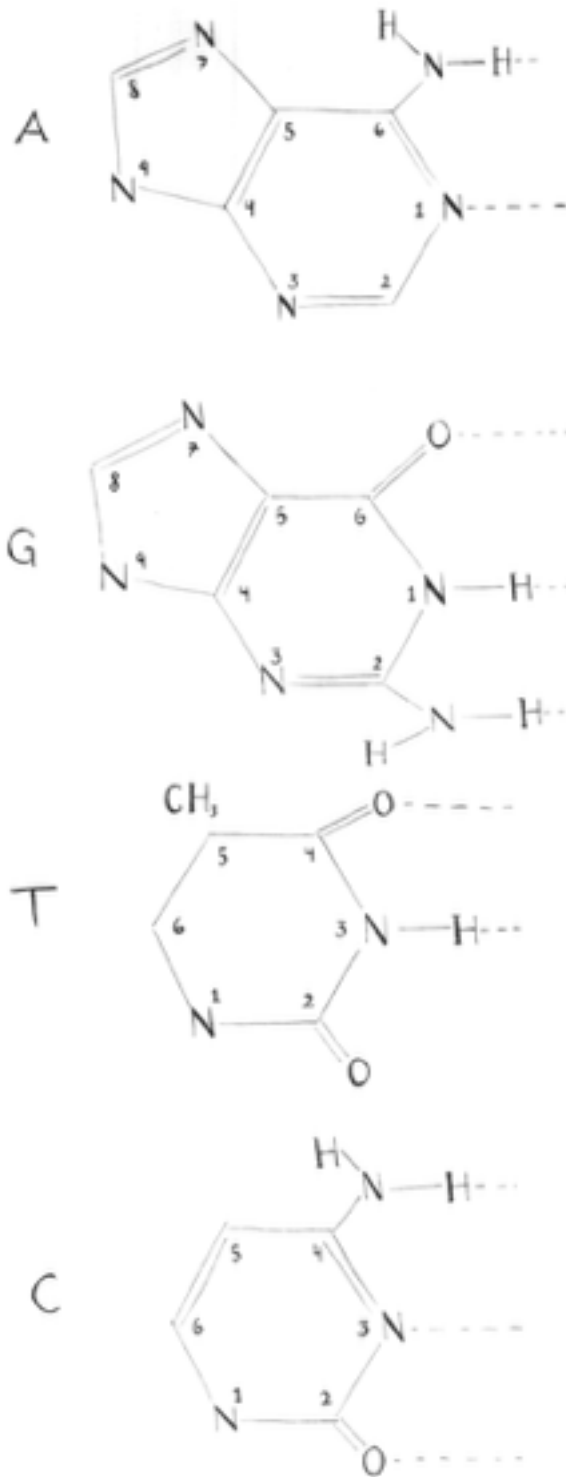
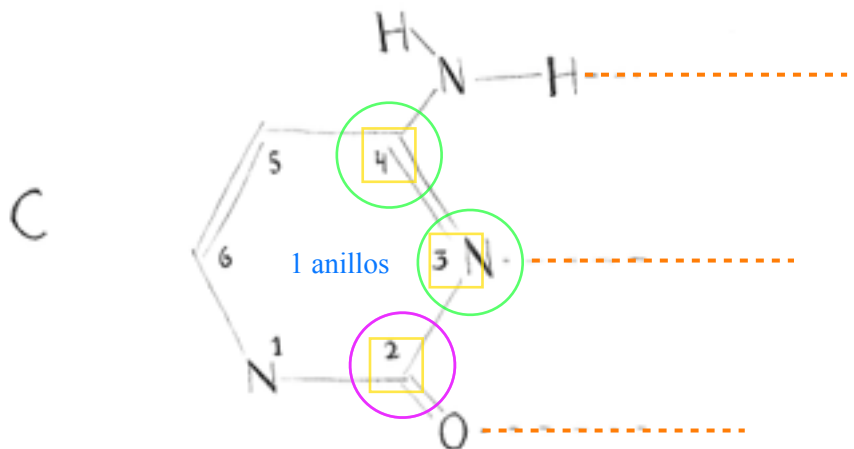
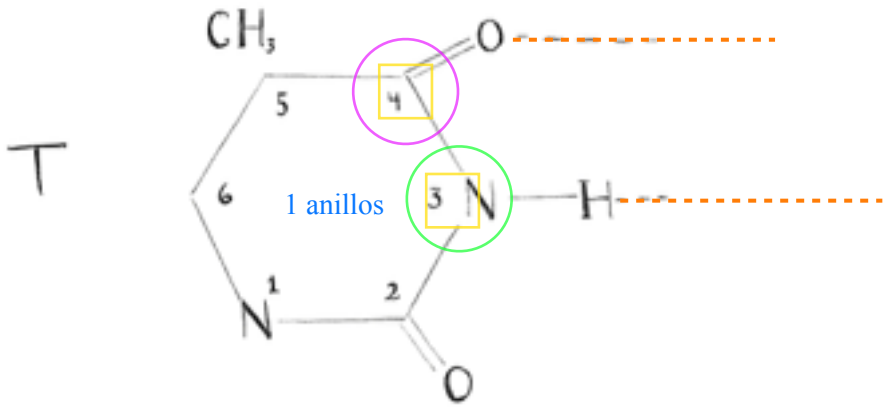
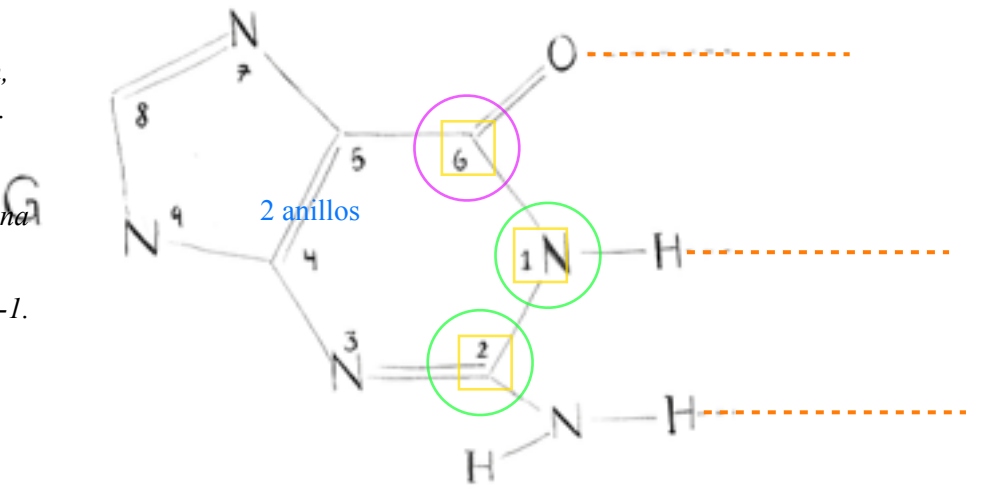
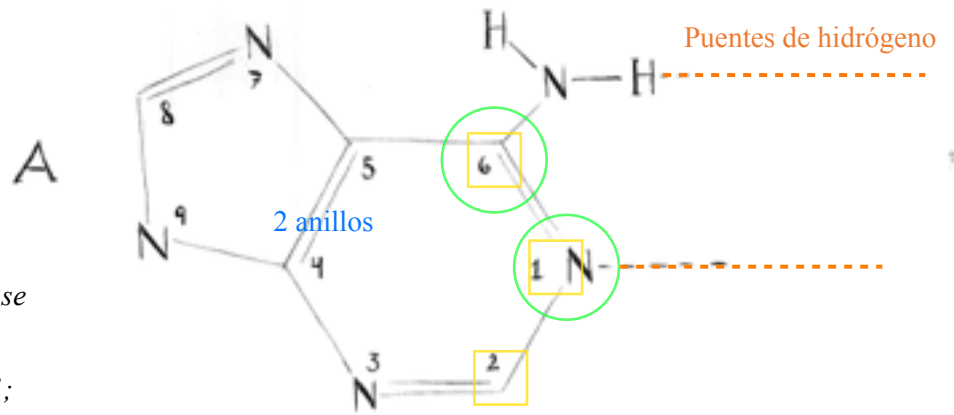
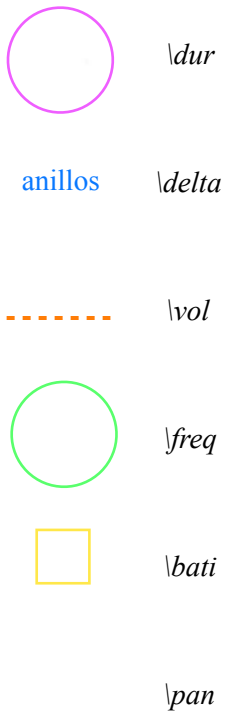


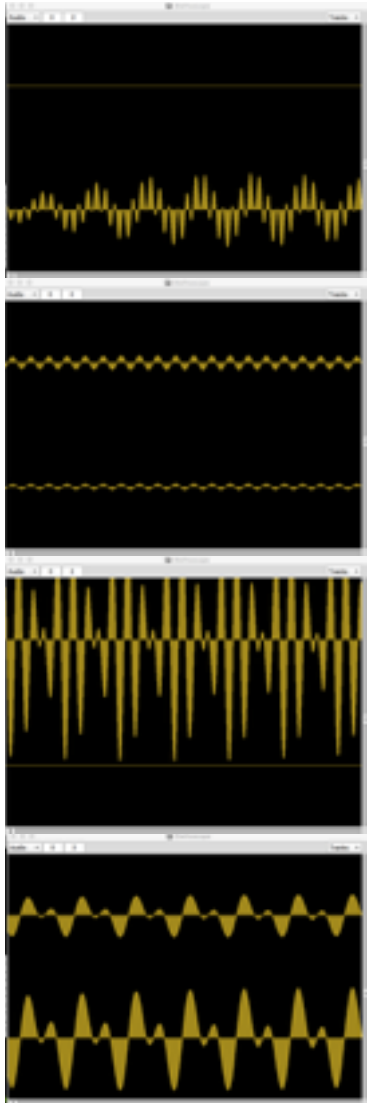
Fig. 8 . Convención de la numeración de los C y N de las bases nitrogenadas y sitios potenciales y específicos de la formación de puentes de hidrógeno. Los puentes de hidrógeno en adenina (A) se forman en el N-1 y C-6; en guanina (G) se forman en el N-1, C-2 y C-6; en timina (T) se forman en N-3 y C-4; y en citosina (C) se forman en C-2, N-3 y C-4.

Como se muestra en la *Figura 9*, la posición del átomo de carbono (C) unido con doble enlace a un átomo de oxígeno (O) —rodeado en rosa— que forma un puente de hidrógeno con su base complementaria para unir las dos cadenas de ADN determinó la duración (*\dur*) —tiempo de vida— de la onda en segundos; para adenina (A) se seleccionó un 1 debido a que no posee ese tipo de unión. La cantidad de anillos que conforma la estructura química de las bases nitrogenadas —marcado en azul— y que confiere su naturaleza: pirimidina o purina; determinó el delta (*\delta*), esto quiere decir el tiempo de disparo en segundo entre una y otra onda de sonido. La cantidad de puentes de hidrógeno que forma cada base nitrogenada con su complementaria para unir las dos cadenas de ADN —marcado con línea punteada en naranja del lado derecho— determinó el volumen de la onda (*\vol*). La posición de los nitrógenos (N) que forman los puentes de hidrógeno —rodeados en verde— para formar la doble hélice del ADN determinó la relación de frecuencias (*\freq*) que posteriormente fueron mapeadas al rango audible. La posición de los átomos que forman todos los puentes de hidrógeno en la estructura química —marcados con un cuadrado amarillo— de cada base nitrogenada para formar la doble hélice del ADN determinó de forma aleatoria los batimentos de la onda (*\bati*). Por último, para el paneo estéreo, se asignaron valores distintos a cada base nitrogenada.

De modo que, la información de la estructura química (número de anillos y posición de los átomos que forman los puentes de hidrógeno) de cada base nitrogenada determinó los parámetros de cada onda simple (Fig. 10). La densidad sonora depende de los cinco cromosomas que conforman el genoma de *A. thaliana* los cuales suenan simultáneamente; en el plano temporal la secuencia de ondas sonoras que se disparan depende de la combinatoria de las bases nitrogenadas que configuran a cada cromosoma.

Fig. 9. Información de la estructura química de cada base nitrogenada que se consideró útil para llevar acabo la sonificación. Para adenina (A): $\backslash dur, 1; \backslash delta 2; \backslash vol, 0.2, \backslash freq, \{[1,6]\}; \backslash bati, \{([1,6]).choose\}; \backslash pan, 1$. Para guanina (G): $\backslash dur, 6; \backslash delta 2; \backslash vol, 0.3, \backslash freq, \{[2,1]\}; \backslash bati, \{([1,2,6]).choose\}, \backslash pan, 0.5$. Para timina (T): $\backslash dur, 4; \backslash delta 1; \backslash vol, 0.2, \backslash freq, \{[3]\}; \backslash bati, \{([3,4]).choose\}, \backslash pan, -0.5$. Para citocina (C): $\backslash dur, 2; \backslash delta 1; \backslash vol, 0.3, \backslash freq, \{[3,4]\}; \backslash bati, \{([2,3,4]).choose\}, \backslash pan, -1$.





A

T

C

G

Fig. 10. Bases nitrogenadas traducidas a su onda dependiendo de la naturaleza química de cada base. Gráficas de las ondas obtenidas del osciloscopio en SuperCollider. Escuchar adenina (A): [Audio 1](#). Escuchar timina (T): [Audio 2](#). Escuchar citosina (C): [Audio 3](#). Escuchar guanina (G): [Audio 4](#).

Los sonidos anteriores son solo un elemento que compone al cromosoma por lo que sonoramente los cromosomas se componen de una serie de elementos sonoros (ondas simples) los cuales podemos escuchar en los siguiente enlace: para escuchar al cromosoma 1: [Audio 5](#), cromosoma 2: [Audio 6](#), cromosoma 3: [Audio 7](#), cromosoma 4: [Audio 8](#), cromosoma 5: [Audio 9](#). Para terminar la *sonificación del genoma* los cinco cromosomas de *A. thaliana* sonificados se superponen sonando así al mismo tiempo (Fig. 11).

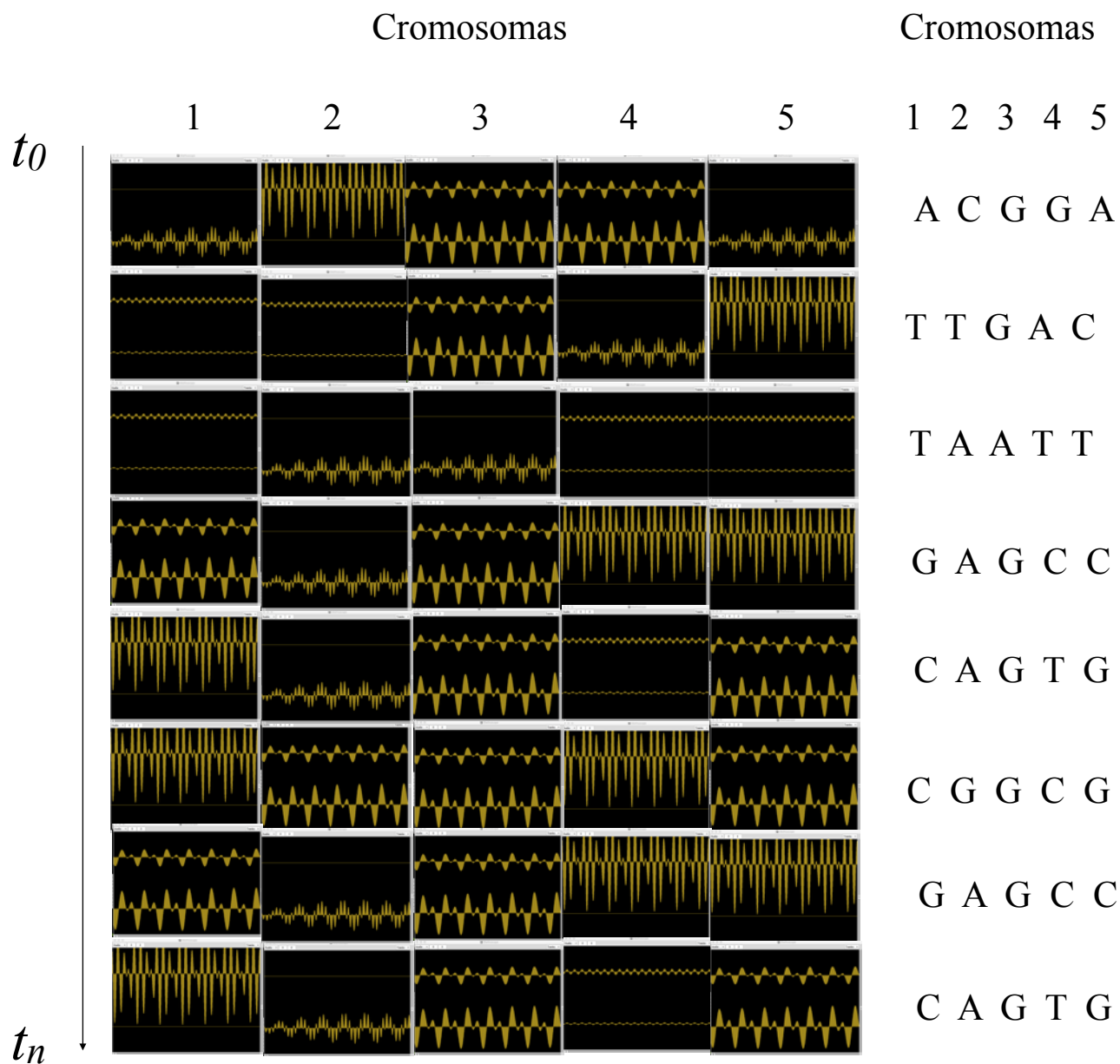


Fig. 11. Pequeña región de cada cromosoma de *A. thaliana* sonificado. Cada cromosoma que conforma el genoma de *A. thaliana* posee su propia combinatoria en la secuencia lineal de bases nitrogenadas por lo que la suma de las ondas es diferente en cada t_n . Gráficas de las ondas obtenidas del osciloscopio en SuperCollider. Escuchar la sonificación del genoma: [Audio 10](#).

1.2.1.2. Implementación del algoritmo

La implementación del algoritmo, para ambas sonificaciones, se llevó a cabo en el software *SuperCollider*. Primero se cargaron en el software los archivos descargados en formato FASTA desde la base de datos *National Center for Biotechnology Information* (NCBI), con los siguientes números de identificación (GI): 332189094 (cromosoma 1), 240254678 (cromosoma 2), 332640072 (cromosoma 3), 332656411 (cromosoma 4) y 240256493 (cromosoma 5).

La información contenida en cada archivo (cromosoma) es una lista de caracteres compuesto por una serie de cuatro bases nitrogenadas (A, G, T y C) (Fig. 12).

```
/Users/Aketzalli/Dropbox/Aketzalli/data/genoma/  
[ C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C,  
T, C, T, G, A, A, T, C, C, T, T, A, A, T, C, C, C, T, A, A, A, T, C, C, C, T, A, A, A, T, C,  
T, T, T, A, A, A, T, C, C, T, A, C, A, T, C, C, A, T, G, A, A, T, C, C, C, T, A, A, A, T, A,  
1 C, C, T, A, A, T, T, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, G, A, A, A, C, C, G, G, T, T, T, C, T, C,  
T, G, G, T, T, G, A, A, A, A, T, C, A, T, T, G, T, G, T, A, T, A, T, A, A, T, G, A, T, A, A,  
T, T, T, T, A, T, C, G, T, T, T, T, A, T, G, ...etc...  
[ N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
2 N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
...etc...  
[ N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
3 C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A,  
C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, C, T, A,  
A, A, T, C, C, A, T, A, A, A, T, C, C, C, T, A, ...etc...  
[ N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
4 N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N, N,  
...etc...  
[ T, A, T, A, C, C, A, T, G, T, A, C, C, C, T, C, A, A, C, C, T, T, A, A, A, A, C, C, C, T, A, A, A, C, C, T, A, T,  
A, A, A, A, C, C, T, A, T, A, C, T, A, T, A, A, A, T, C, T, T, T, A, A, A, A, C, C, T, A, T,  
A, C, T, C, T, A, A, A, C, C, A, T, A, G, G, G, T, T, T, G, T, G, A, G, T, T, T, G, C, A, T,  
A, A, A, G, T, G, T, C, A, C, G, T, A, T, A, A, G, T, G, T, T, T, C, T, A, A, C, A, T, G, T,  
G, A, G, T, T, T, G, C, A, T, A, A, G, A, G, T, C, T, C, G, A, C, T, A, T, G, T, G, T, T, T,  
G, T, T, C, A, A, A, A, G, T, G, A, C, G, T, A, ...etc...
```

Fig. 12. Cromosomas como se muestran en el Post window de *SuperCollider*. Se muestran las primeras secuencias lineales de las bases nitrogenadas de los cinco cromosomas, las letras N significan que son regiones

que aún no han sido identificadas, las cuales fueron descartadas en la sonificación. Cada carácter es traducido de acuerdo con la información descrita anteriormente.

Una vez cargados los archivos de los cinco cromosomas que componen el genoma de *A. thaliana* se prosiguió a construir un **sintetizador digital**, *SynthDef* o instrumento digital (Fig. 13).

```
(
SynthDef(\basenitro, {arg freq,bati, vol, pan=1, dur;
  var signal, env;
  env = EnvGen.kr(Env.sine(dur), doneAction: 2);
  signal = SinOsc.ar([freq,freq+bati]).sum;
  Out.ar(0, Pan2.ar(signal * vol, pan, env));
}).add;
)
```

Fig. 13. Sintetizador construido en SuperCollider. El sintetizador con nombre *\basenitro* construye dos ondas sinusoidales (*SinOsc*). Los argumentos (*arg*) son los parámetros modulados por la información bioquímica. Cada onda generada por el sintetizador es una única base nitrogenada.

El sintetizador *\basenitro* recibe los parámetros asignados y descritos anteriormente a cada base nitrogenada a partir de un *switch*, el cual es una condicional: si es la base nitrogenada A es igual al valor asignado, por ejemplo: A -> \dur, 1, (Fig. 14) y así respectivamente para el resto de parámetros sonoros de acuerdo a la base nitrogenada que se este leyendo.

```
Pbind(
  \instrument, \basenitro,
  \bases, Pseq(-cromosomas[1], inf),
  \dur, Pfunc{levl switch(ev[\bases], $A, {1}, $G, {6}, $T, {4}, $C, {2}, $N, {1}, {1})},
  \delta, Pfunc{levl switch(ev[\bases], $G, {2}, $C, {1}, $T, {1}, $A, {2}, $N, {1}, {1})},
  \pan, Pfunc{levl switch(ev[\bases], $A, {1}, $G, {0.5}, $T, {-0.5}, $C, {-1}, $N, {0}, {0})},
  \vol, Pfunc{levl switch(ev[\bases], $A, {0.2}, $G, {0.3}, $T, {0.2}, $C, {0.3}, $N, {0.01}, {0.01}) * 0.06},
  \freq, Pfunc{levl switch(ev[\bases], $A, {[1,6]}, $G, {[1,2]}, $T, {3}, $C, {[3,4]}, $N, {0}, {0}) * 70},
  \bati, Pfunc{levl switch(ev[\bases], $A, {(1,6)}.choose), $G, {(1,2,6)}.choose), $T, {(3,4)}.choose},
  $C, {(2,3,4)}.choose), $N, {0}, {0}),
),
```

Fig. 14. *Pbind* construido en SuperCollider. Donde se asigna el instrumento construido *\basenitro*. Se determina el cromosoma que va a leer y según sea su secuencia de bases nitrogenadas se determinarán los parámetros a partir de un *switch*.

Una vez se asignaron los cinco cromosomas a su respectivo *Pbind*, se evaluaron simultáneamente mediante un objeto llamado *Ppar* bajo las condiciones asignadas anteriormente (Fig. 15). Lo cual trata de representar desde el sonido a las cinco estructuras en las que es almacenado el material genético de la planta modelo *A. thaliana*.

```
//5 cromosomas en A. thaliana
(
a=Ppar([
  Pbind(
    \instrument, \basenitro,
    \bases, Pseq(-cromosomas[0], inf), //Cromosoma 1
    \dur, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {6}, $T, {4}, $C, {2}, $N, {1}, {1}}}, //posición del C=O que forma puente de hidrógeno
    \delta, Pfunc{levl switch(ev\bases), $G, {2}, $C, {1}, $T, {1}, $A, {2}, $N, {1}, {1}}}, //la cantidad de anillos de la estructura química
    \pan, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {0.5}, $T, {-0.5}, $C, {-1}, $N, {0}, {0}}}, //aun no esta determinado con iformación bioquímica
    \vol, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {0.2}, $G, {0.3}, $T, {0.2}, $C, {0.3}, $N, {0.01}, {0.01}} * 0.06}, //cuantos puentes de hidrógeno forman
    \freq, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}, $G, {[1,2]}, $T, {3}, $C, {[3,4]}, $N, {0}, {0}}*60}, //posición de los N que forman los puente de
    \bati, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}.choose}, $G, {[1,2,6]}.choose}, $T, {[3,4]}.choose}, $C, {[2,3,4]}.choose}, $N, {0}, {0}}}, //p
  ),
  Pbind(
    \instrument, \basenitro,
    \bases, Pseq(-cromosomas[1], inf),
    \dur, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {6}, $T, {4}, $C, {2}, $N, {1}, {1}}},
    \delta, Pfunc{levl switch(ev\bases), $G, {2}, $C, {1}, $T, {1}, $A, {2}, $N, {1}, {1}}},
    \pan, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {0.5}, $T, {-0.5}, $C, {-1}, $N, {0}, {0}}},
    \vol, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {0.2}, $G, {0.3}, $T, {0.2}, $C, {0.3}, $N, {0.01}, {0.01}} * 0.06},
    \freq, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}, $G, {[1,2]}, $T, {3}, $C, {[3,4]}, $N, {0}, {0}}*70},
    \bati, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}.choose}, $G, {[1,2,6]}.choose}, $T, {[3,4]}.choose}, $C, {[2,3,4]}.choose}, $N, {0}, {0}}},
  ),
  Pbind(
    \instrument, \basenitro,
    \bases, Pseq(-cromosomas[2], inf),
    \dur, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {6}, $T, {4}, $C, {2}, $N, {1}, {1}}},
    \delta, Pfunc{levl switch(ev\bases), $G, {2}, $C, {1}, $T, {1}, $A, {2}, $N, {1}, {1}}},
    \pan, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {0.5}, $T, {-0.5}, $C, {-1}, $N, {0}, {0}}},
    \vol, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {0.2}, $G, {0.3}, $T, {0.2}, $C, {0.3}, $N, {0.01}, {0.01}} * 0.06},
    \freq, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}, $G, {[1,2]}, $T, {3}, $C, {[3,4]}, $N, {0}, {0}}*80},
    \bati, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}.choose}, $G, {[1,2,6]}.choose}, $T, {[3,4]}.choose}, $C, {[2,3,4]}.choose}, $N, {0}, {0}}},
  ),
  Pbind(
    \instrument, \basenitro,
    \bases, Pseq(-cromosomas[3], inf),
    \dur, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {6}, $T, {4}, $C, {2}, $N, {1}, {1}}},
    \delta, Pfunc{levl switch(ev\bases), $G, {2}, $C, {1}, $T, {1}, $A, {2}, $N, {1}, {1}}},
    \pan, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {0.5}, $T, {-0.5}, $C, {-1}, $N, {0}, {0}}},
    \vol, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {0.2}, $G, {0.3}, $T, {0.2}, $C, {0.3}, $N, {0.01}, {0.01}} * 0.06},
    \freq, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}, $G, {[1,2]}, $T, {3}, $C, {[3,4]}, $N, {0}, {0}}*90},
    \bati, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}.choose}, $G, {[1,2,6]}.choose}, $T, {[3,4]}.choose}, $C, {[2,3,4]}.choose}, $N, {0}, {0}}},
  ),
  Pbind(
    \instrument, \basenitro,
    \bases, Pseq(-cromosomas[4], inf),
    \dur, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {6}, $T, {4}, $C, {2}, $N, {1}, {1}}},
    \delta, Pfunc{levl switch(ev\bases), $G, {2}, $C, {1}, $T, {1}, $A, {2}, $N, {1}, {1}}},
    \pan, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {1}, $G, {0.5}, $T, {-0.5}, $C, {-1}, $N, {0}, {0}}},
    \vol, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {0.2}, $G, {0.3}, $T, {0.2}, $C, {0.3}, $N, {0.01}, {0.01}} * 0.06},
    \freq, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}, $G, {[1,2]}, $T, {3}, $C, {[3,4]}, $N, {0}, {0}}*100},
    \bati, Pfunc{levl switch(ev\bases), $A, {[1,6]}.choose}, $G, {[1,2,6]}.choose}, $T, {[3,4]}.choose}, $C, {[2,3,4]}.choose}, $N, {0}, {0}}},
  ),
],inf).play
)
```

Fig. 15. *Ppar* construido en SuperCollider. Donde se evalúan los cinco *Pbind*, uno por cromosoma.

1.2.2. Sonificación por estadio

La *sonificación por estadio* es la analogía de la expresión de genes tipo MADS-box en las diferentes etapas del desarrollo de *A. thaliana* (germinación, etapa vegetativa, crecimiento, transición floral, floración, gametogénesis y fructificación). El desarrollo de una planta se define como la suma total de cambios en la forma y función que experimenta durante su ciclo de vida y estos cambios son característicos de cada especie.

Existen muchos genes involucrados en cada estadio del ciclo de vida de las plantas pero son los factores de transcripción los que regulan la expresión de muchos otros genes, funcionando como reguladores claves para generar nuevas estructuras. Los genes MADS-box codifican a factores transcripcionales, por lo tanto participan en todas las etapas del desarrollo de *A. thaliana* (Smaczniak, *et al.*, 2012) brindándonos información suficiente para el diseño de nuestra sonificación.

Los genes tipo MADS-box

Los genes son segmentos de ADN que, como hemos mencionado, contienen información específica de cómo deben funcionar las células que componen a los diversos organismos. Los genes deben ser expresados o reprimidos en momentos y lugares específicos para el óptimo desarrollo de las diferentes estructuras que los componen. El buen desarrollo de la planta depende así de la expresión de genes para la codificación de proteínas denominadas factores transcripcionales a partir de dos procesos altamente conservados denominados transcripción y traducción.

A grandes rasgos la transcripción es el paso del ADN a ARNm, y la traducción es la codificación de proteínas a partir del ARNm en función del código genético (Fig. 16):



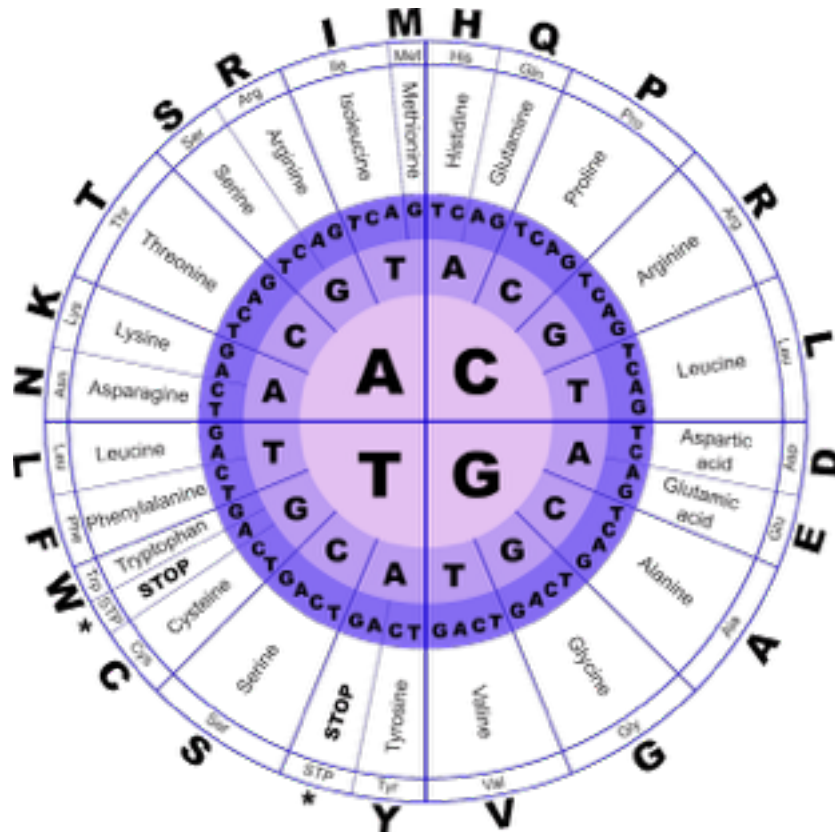


Fig. 16. Código genético. Es la forma en cómo se lee la información genética. Las cuatro bases nitrogenadas (A, T, C y G) se leen en arreglos de tres en tres, estructuras denominadas **codones**. Cada **codón** codifica un aminoácido de los 20 que conforman a las proteínas en los organismos vivos.

Los genes de tipo MADS-box juegan un papel muy importante en casi todos los procesos de la planta, por ejemplo, se encuentran presentes en los procesos de identidad floral, en la gametogénesis, en la morfogénesis de muchos órganos y por lo tanto en los diferentes estadios del ciclo de vida de la planta. Toda la información sobre este tipo de genes se extrajo del artículo *Developmental and evolutionary diversity of plant MADS-domain factors: insights from recent studies* de Smaczniak, et al. (2012) gracias a que presenta una visión general de dicha familia de genes con un foco en el desarrollo de la planta modelo *A. thaliana*.

En la *Tabla 1* (ver *Anexos*) se muestran los 44 genes MADS-box utilizados en la sonificación por estadios junto a su función y su número de identificación (LOCUS TAG) para su ubicación en la base de datos NCBI. Tales genes se escogieron de acuerdo a lo reportado en el artículo de Smaczniak, *et al.* (2012). Se puede observar que un gen puede intervenir en varias etapas del desarrollo. Por ejemplo, el gen FLC esta involucrado en la germinación, en la transición de juvenil a adulto y en la floración.

Sesgo del codón

El paso del lenguaje genético a proteína o procesos de transcripción y traducción depende del código genético. Una característica de este código es que es redundante pero no ambiguo. Esto se refiere a que los codones son las combinatorias de las bases nitrogenadas dando un total de 64 codones; de los cuales 61 codifican a los 20 aminoácidos naturales y los tres codones restantes (UAA, AGA y UAG) conocidos como tripletes de terminación, de paro o sin sentido tienen la función de terminar la traducción de una secuencia de *nucleótidos*. Por lo tanto, hay aminoácidos codificados por más de un codón, y en general, en estos casos se parecen entre sí y difieren sólo en la tercer base, de tal manera que la tercer base presenta una baja especificidad, lo que se denomina “degeneración” (Salazar, *et al.*, 2013). Esta característica del código genético es útil para definir cambios sonoros entre un codón y otro aún aunque codifiquen al mismo aminoácido. Entonces la primer base del codón define el delta ($\backslash\delta$), la segunda el paneo ($\backslash\text{pan}$) y la tercer base la envolvente ($\backslash\text{env}$).

Aunque el código genético es considerado casi universal (mismo código desde las bacterias hasta el hombre y en casi todas las células de todas las especies con sus respectivas excepciones en las mitocondrias humanas, en mitocondrias de otros mamíferos y en ciertas bacterias) (Salazar, *et al.*, 2013), es interesante la característica entre especies de preferir un determinado codón de los codones sinonimos para codificar un mismo aminoácido. A este fenómeno se le conoce como *sesgo del uso del codón*, el cual difiere sustancialmente entre especies (Athey, *et al.* 2017) (Fig. 17). Como se ve en la *Figura 17* la información del *sesgo del uso del codón* es diferente entre el ser humano y la planta

modelo *A. thaliana* y que gracias a esa característica podemos generar diferencias sonoras entre especies a partir de un lenguaje que en principio es universal.

Arabidopsis thaliana: (Genetic code: Standard)

Triplet	Amino acid	Fraction	Frequency/ Thousand	Number
TTT	F	0.51	21.9	534456
TTC	F	0.49	20.7	505253
TTA	L	0.13	12.6	308336
TTG	L	0.22	20.9	508909

Human: (Genetic code: Standard)

Triplet	Amino acid	Fraction	Frequency/ Thousand	Number
TTT	F	0.45	16.9	336562
TTC	F	0.55	20.4	406571
TTA	L	0.07	7.2	143715
TTG	L	0.13	12.6	249879

*Fig. 17. Captura de pantalla de GenScript del sesgo del uso del codón de cuatro codones. Se muestra en la primer tabla el sesgo del uso de codón para la planta modelo *A. thaliana*. En la segunda tabla se muestra el uso del sesgo del codón para el *Homo sapiens*. Se muestra en la primera columna los codones seguido del aminoácido codificado. Se observa que el aminoácido fenilalanina (F) es codificado por los codones TTT y TTC en donde *A. thaliana* prefiere el uso del codón TTT (0.51) para la codificación de F mientras que *H. Sapiens* prefiere el codón TTC (0.55). Tablas completas en el siguiente enlace: [GenScript](#).*

Ciclo de Vida de *A. thaliana*

En el transcurso de la vida de las plantas los genes se activan y reprimen tanto por estímulos externos como por estímulos internos; lo anterior hace posible que las plantas puedan pasar por sus diferentes fases en su ciclo de vida. Este ciclo se inicia con la germinación de la semilla seguido del establecimiento de la *plántula*, el crecimiento de la misma hasta la fase adulta y concluye con la formación de semillas (Márquez, *et al.*, 2013).

Así, el desarrollo de la planta incluye procesos bioquímicos a nivel celular que permiten la integración ordenada de su crecimiento y desarrollo (Fig. 18). Como se mencionó anteriormente el desarrollo de la planta se define como la suma total de cambios en forma y función resultado de eventos tanto de división como de expansión celular determinando los diferentes tejidos y órganos de la planta (Márquez, *et al.*, 2013). En el cual se incluyen dos importantes transiciones: 1) del *gametofito* al *esporofito* y 2) de la fase juvenil a la fase adulta; la segunda transición se incluye en la etapa esporofítica junto a los demás eventos en su ciclo de vida, los cuales se describen a continuación.

Germinación

La germinación es el evento que concluye la vida de una semilla constituyendo un puente entre una generación a otra, lo cual permite la multiplicación de los individuos de una especie a partir de su dispersión en el espacio. Así, la germinación es un evento clave en el desarrollo de las plantas ya que, por una parte, establece una nueva generación esporofítica y por otra, marca la transición de la forma de vida *heterótrofa* a la *autótrofa* (Fig. 19) (Márquez, *et al.*, 2013).

Etapa vegetativa

La plántula crece hasta alcanzar la fase juvenil, la cual crece y se desarrolla de acuerdo con su patrón genético adquiriendo tamaño y masa. La duración de esta etapa varía mucho de una especie a otra y termina cuando la planta alcanza su madurez (Márquez, *et al.*, 2013). En esta etapa *A. thaliana* se encuentra en estado de roseta (Fig. 20).

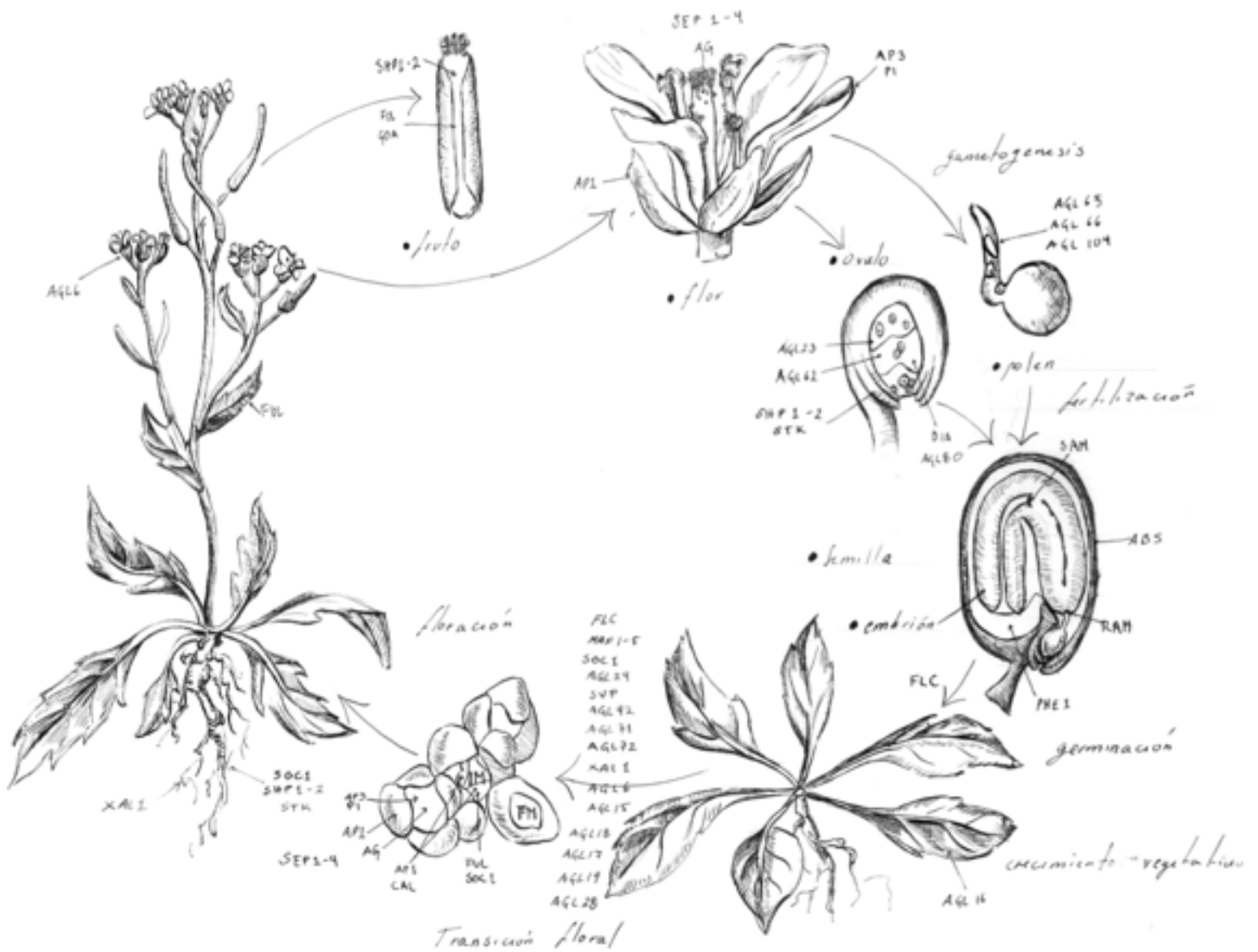


Fig. 18. Ciclo de vida de *A. thaliana*. El ciclo de vida incluye todos los procesos de crecimiento y desarrollo, tales como la germinación, el crecimiento vegetativo, la transición floral, la floración, la gametogénesis y la fructificación.

Crecimiento

El crecimiento se refiere al desarrollo de la etapa de roseta temprana a la adulta, en donde se activan genes MADS-box para el desarrollo de la raíz (la raíz se forma desde el *embrión*) y formación periódica de las raíces laterales (desde la plántula) (Fig. 20).

Transición floral

La transición de la etapa vegetativa a la reproductiva constituye uno de los procesos fundamentales del ciclo de vida de una planta lo cual le permitirá multiplicarse. El éxito de este proceso depende de que la planta logre florecer y forme semillas viables en condiciones ambientales adecuadas (Márquez, *et al.*, 2013). Esta transición incluye una serie de eventos que se inician con la transformación del *meristemo vegetativo* indeterminado a un *meristemo floral* determinado.

La inducción a la floración implica por lo tanto, la coordinación entre la percepción de diferentes estímulos ambientales y la de factores endógenos como, por ejemplo, la edad de la planta. Esta coordinación asegura que la transición se lleve a cabo en el momento preciso para lograr una reproducción exitosa (Márquez, *et al.*, 2013).

Floración

Una vez el *meristemo apical* se ha diferenciado es posible que la planta pueda generar estructuras florales. A este evento se le conoce como floración y forma parte de la etapa reproductiva en el ciclo de vida de las *Angiospermas* (Fig. 21).

En las flores se lleva a cabo la formación de los gametos así como la reproducción sexual (Márquez, *et al.*, 2013).

Gametogénesis

La gametogénesis es la formación tanto de gametos femeninos (óvulo) como masculinos (polen). Los gametos son fecundados para formar el cigoto, el cual dará lugar al embrión. El embrión permanece en estado de reposo junto a un tejido de reserva en una estructura denominada fruto.

Fructificación

La fructificación constituye parte de la fase reproductiva. Los frutos se desarrollan a partir de la fecundación del óvulo. Los frutos contienen semillas (embriónes) que, si son viables y tienen las condiciones apropiadas para germinar darán lugar a la formación de nuevos individuos, iniciando nuevamente el ciclo de una nueva vida (Márquez, *et al.*, 2013).

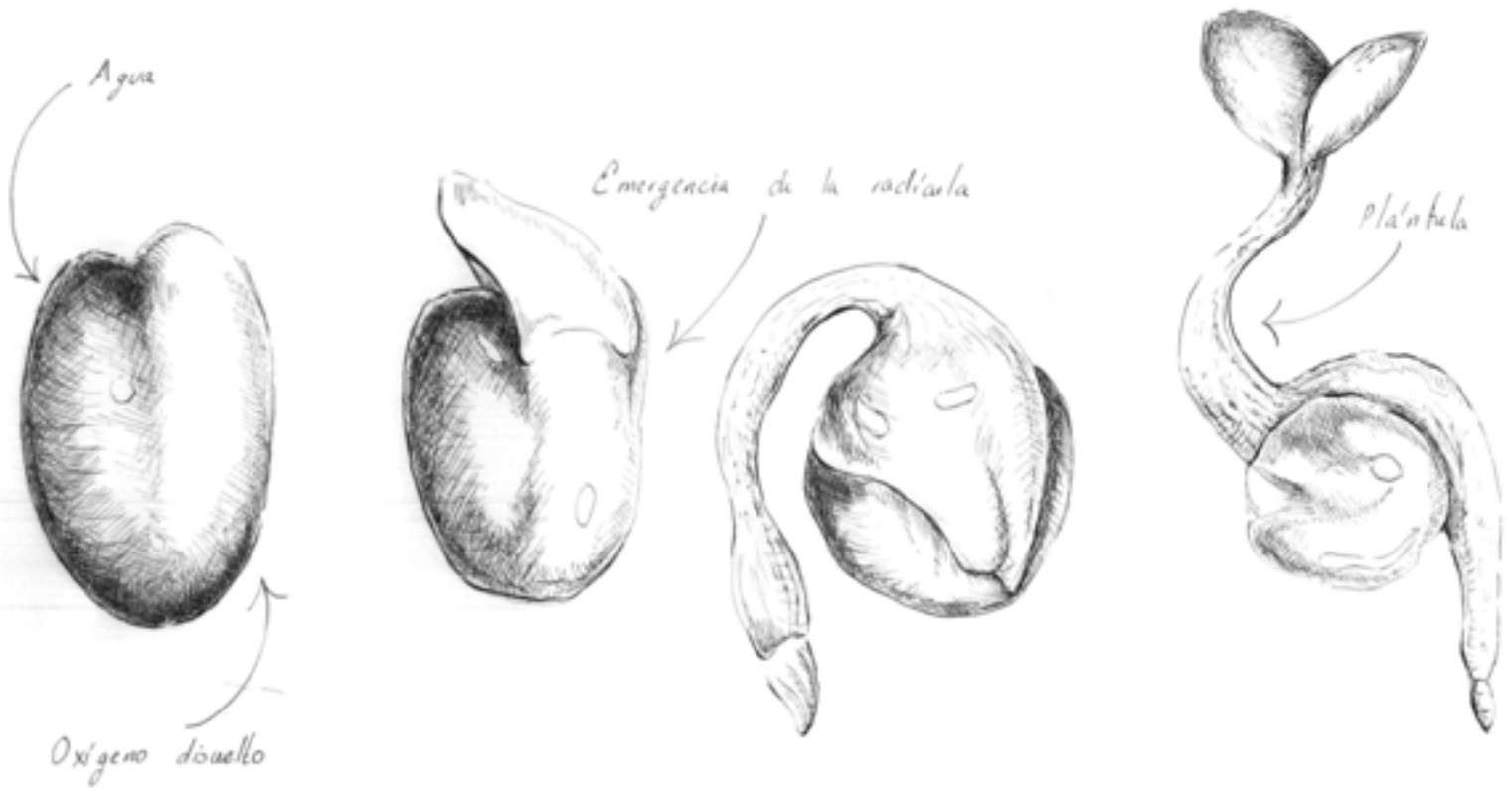


Fig. 19. Germinación de *A. thaliana*. La germinación esta regulada por factores ambientales como agua, oxígeno, bióxido de carbono, temperatura y luz. La germinación se inicia con la absorción de agua y de oxígeno disuelto, lo que reactiva los procesos bioquímicos y metabólicos para la emergencia de la radícula y posterior formación de la plantula. En este proceso el gen MADS-box *FLC* se expresa (en este estadio se expresan muchos genes más pero solo *FLC* se considero para la sonificación de acuerdo a lo reportado por Smaczniak, et al., 2012).

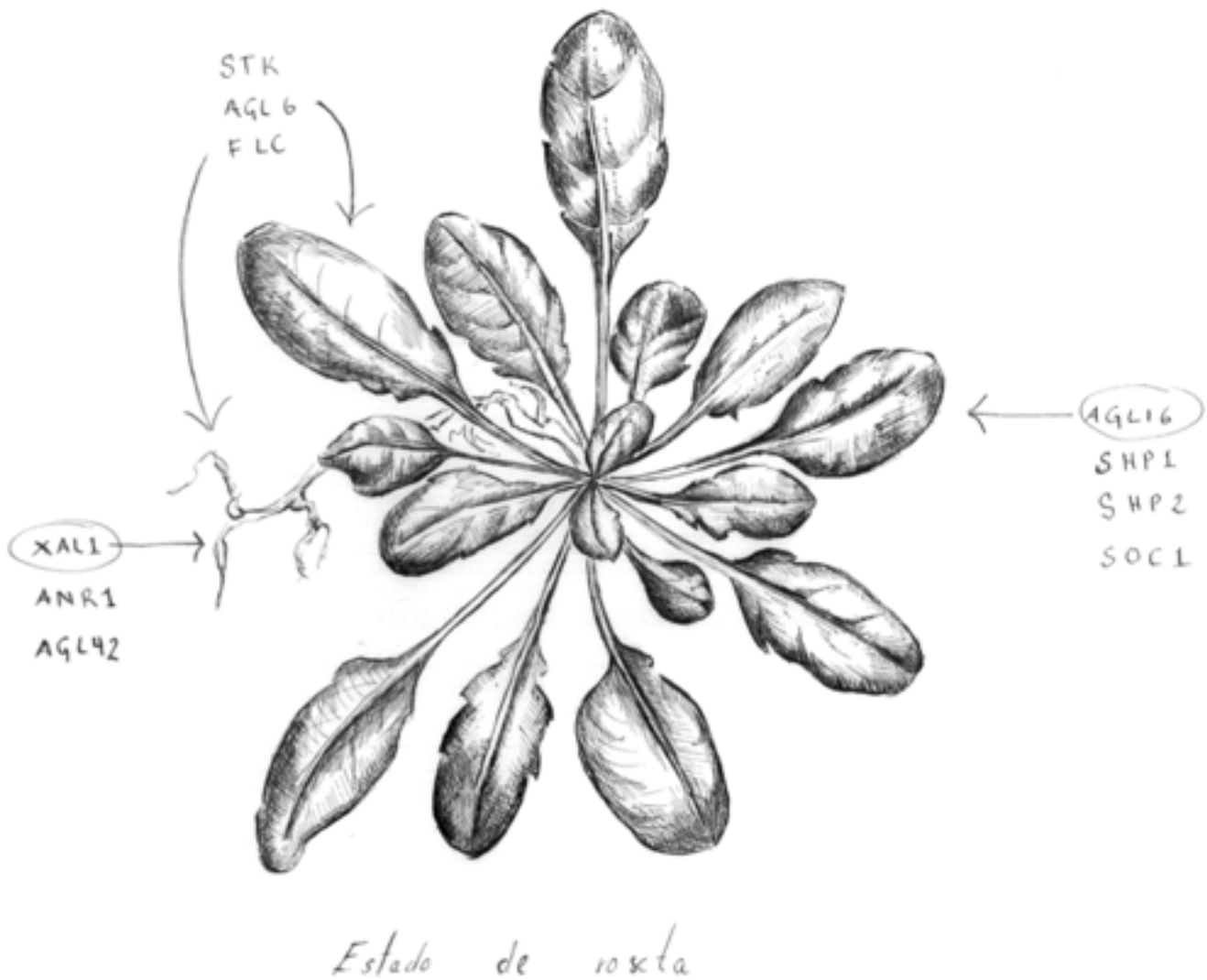


Fig. 20. Etapa vegetativa de *A. thaliana*. Estado de roseta. Los genes MADS-box rodeados: *XAL1* y *AGL16* son expresados en la etapa vegetativa. En el crecimiento los genes MADS-box: *SHP1,2*, *STK*, *XAL1*, *AGL16*, *ANR1*, *AGL6*, *FLC*, *AGL42* y *SOC1* son expresados. Principalmente los genes *XAL1*, *ANR1* y *AGL42* participan en el desarrollo y crecimiento de la raíz, mientras que los genes *AGL16*, *SHP1,2* y *SOC1* en las hojas. Los genes *STK*, *AGL6* y *FLC* participan en ambas estructuras.

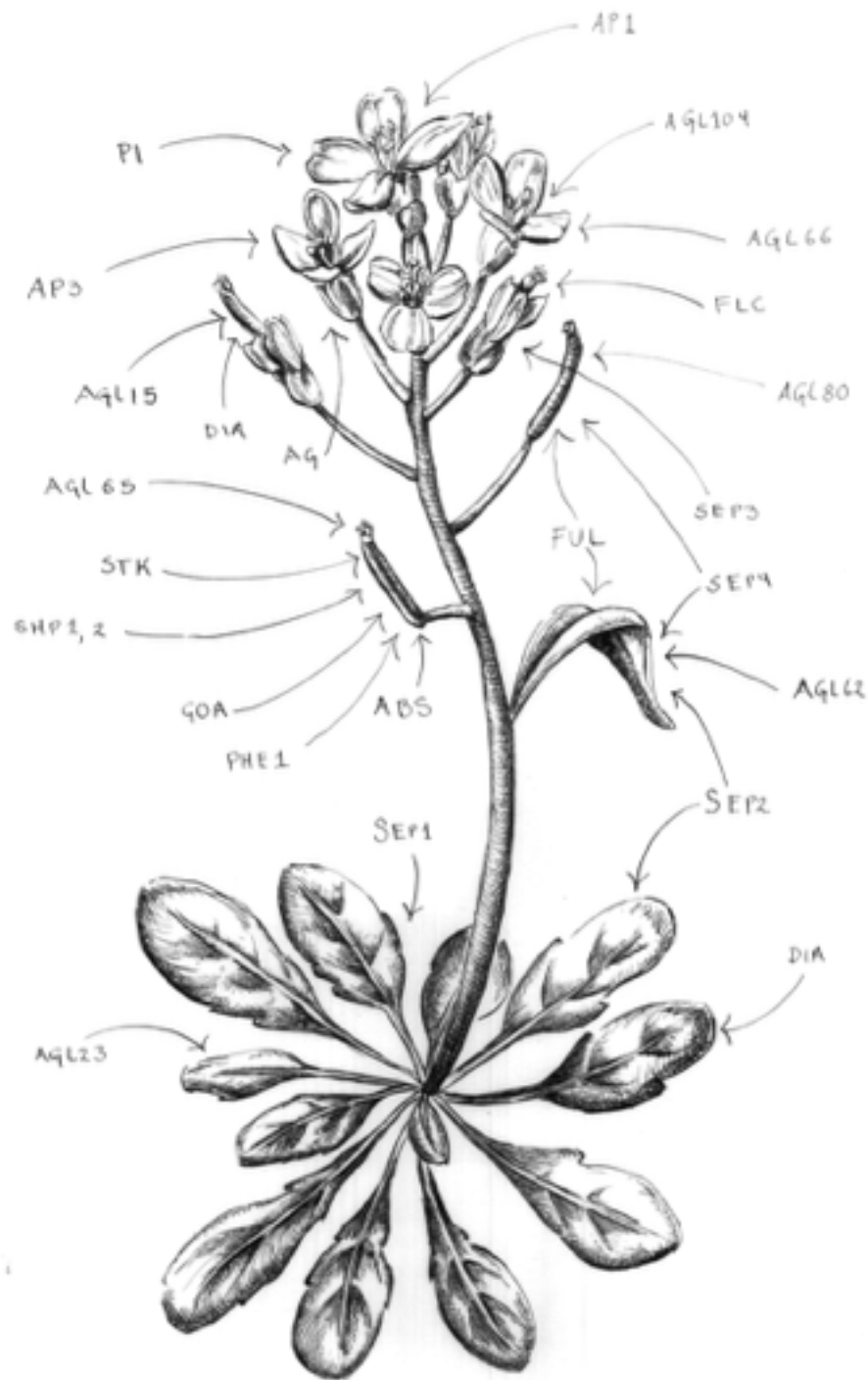


Fig. 21. Etapa reproductiva de *A. thaliana*. En la etapa reproductiva intervienen los eventos de floración, gametogénesis y fructificación, así como la formación de hojas caulinares. En el proceso de floración los genes MADS-box: SHP1,2, STK, AGL65, AG, AGL15, AP3, PI, FLC, SEP1-4, FUL y AP1 son expresado. En el proceso de gametogénesis los genes MADS-box: SHP1,2, STK, AGL65, AGL23, AGL104, AGL66, FLC, DIA, AGL62 y AGL80 son expresados. En el proceso de fructificación los genes MADS-box: AGL15, ABS, GOA, DIA, FUL, AGL80 y PHE1 son expresados.

1.2.2.1. Técnica de transformación de los datos

Como se mencionó anteriormente las plantas poseen un fenotipo característico en cada estadio de su ciclo de vida debido al fenómeno de diferenciación celular, el cual depende de la expresión de regiones específicas del genoma (genes) a partir de código genético con su respectiva característica del *sesgo del uso de codón* el cual es específico de cada especie. Por ello, aunque los diversos tipos de células en un organismo multicelular contengan la misma información genética, su estructura y función difiere ampliamente (Salazar, *et. al.* 2013). Con esa misma lógica de expresión genética el sonido será producido mediante las reglas de los dos lenguajes biomoleculares: el genético y el proteico. Debido a ello, en éste nivel de sonificación solo se consideraron las **regiones codificantes** de los genes (Fig. 22).

Información útil del codón

Como se mencionó anteriormente los codones o los arreglos de tres en tres bases nitrogenadas definen la codificación de los 20 aminoácidos por lo que el código genético se dice que es “degenerado”, por ejemplo el aminoácido fenilalanina (F) puede ser codificado por los codones TTT o TTC, la diferencia entre ellos es la última letra y es por esa razón que la posición de las bases que lo conforman resulta ser información útil para las modulaciones sonoras.

Así, a cada base nitrogenada se le asignaron valores para el delta ($\backslash delta$), la espacialización ($\backslash pan$) y la envolvente ($\backslash env$), siendo aleatorios para los dos primeros y para el tercero, la envolvente, fueron definidos por la posición de los átomos que forman los puentes de hidrógeno y la cantidad de anillos en la estructura química. Lo anterior con la intención de que la combinatoria y la posición de las bases que conforman al codón ofrezcan diferencias sonoras y nos permitan distinguir entre codones que codifican un mismo aminoácido (Tabla 2).

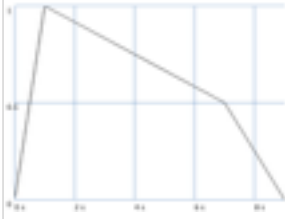

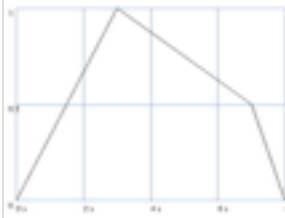
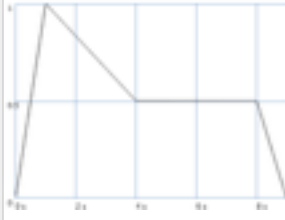
Tabla 2				
Base nitrogenada	Delta	Paneo	Envolvente / Posición de los puentes de hidrogeno y cantidad de anillos en su estructura	
A	0.5	1	1,6,2	
G	1	0.5	1,2,6,2	
T	1.5	-0.5	3,4,1	
C	2	-1	1,3,4,1	

Tabla 2. Se muestran los valores asignados aleatoriamente para el delta y el paneo; la envolvente depende de la estructura química de cada base nitrogenada. En la última columna se muestra gráficamente el tipo de envolvente que resulta de cada base nitrogenada.

Información útil del aminoácido codificado

Los 20 aminoácidos comunes son conocidos como α -aminoácidos debido a que poseen una estructura química común: el grupo amino y carboxilo unidos al mismo átomo de carbono (Fig. 23), el cual se une además a otro átomo de hidrógeno (H) y a una cadena lateral (R) (Horton, *et al.*, 2008). La cadena lateral es única para cada aminoácido por lo que esta variable se ocupó para la modulación del parámetro sonoro de frecuencia (*freq*) para representar en sonido la diferenciación celular que inicia con la expresión de genes que codifican factores transcripcionales, proteínas que son sumamente importantes para dar identidad a las diferentes células que conforman al organismo. De manera que, la modulación de los parámetros sonoros en la *sonificación por estadios* represente la analogía de la expresión genética en momentos específicos del desarrollo, logrando así diferencias sonoras en los diferentes eventos a lo largo del ciclo de vida de *A. thaliana*.

Para lograrlo tanto los procesos de expresión como las estructuras químicas de las bases nitrogenadas y las estructuras de los aminoácidos (R) que le dan identidad se ocuparon para la modulación de los parámetros para generar una onda sonora simple. De esta forma podemos transmitir además de la información de codón información de las características de los aminoácidos codificados en una única onda sonora simple que de acuerdo al conjunto de elementos se configuran ya sean genes, proteínas o una serie de ondas simples en el plano temporal.

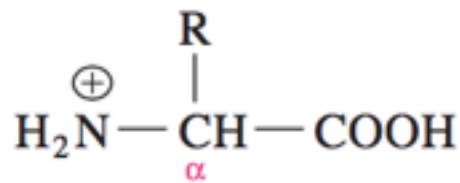


Fig. 23. Estructura de los α -aminoácidos. La cadena lateral R unida al carbono α otorga las propiedades únicas de cada aminoácido.

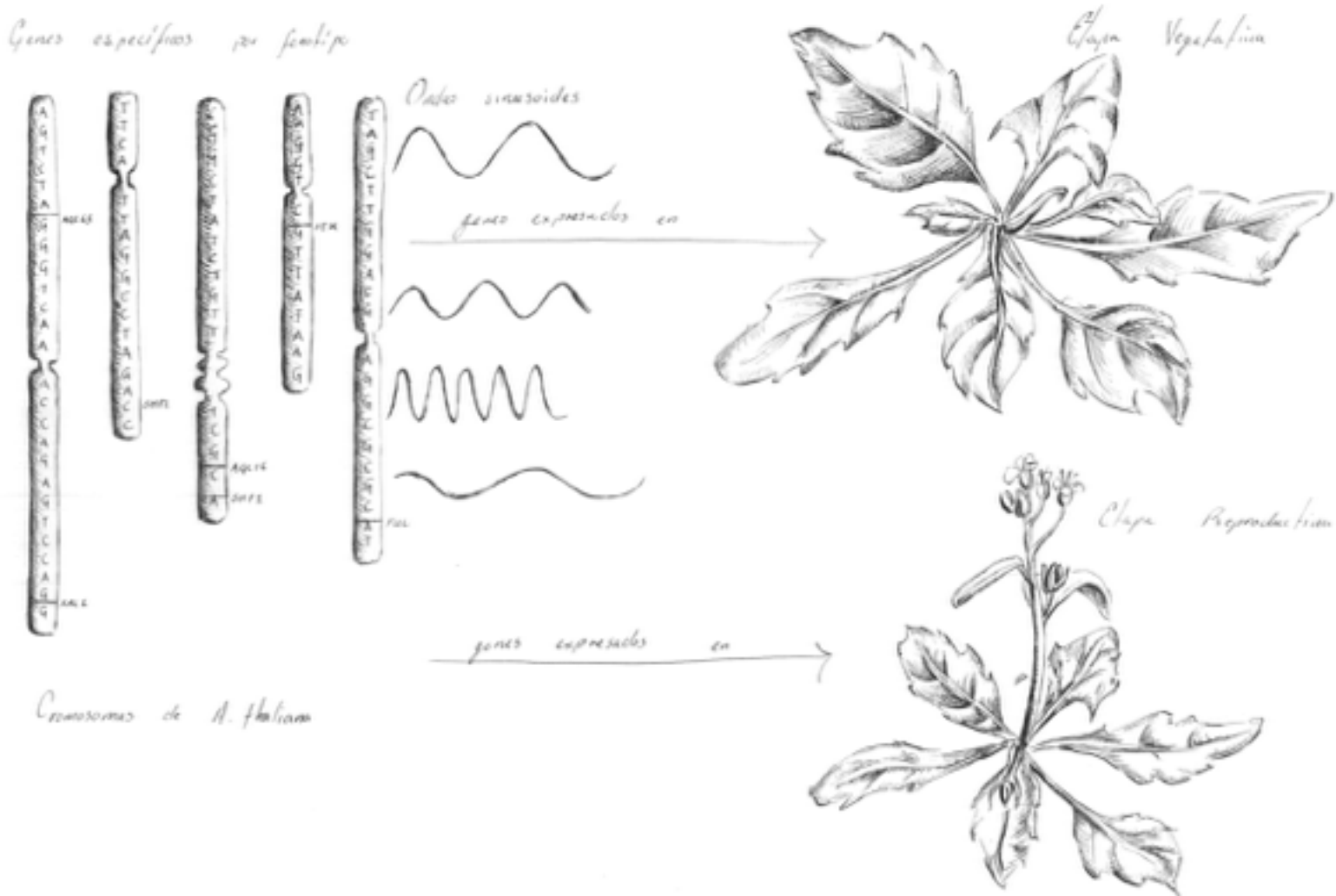


Fig. 22. Lógica de síntesis. Los diferentes estados de la planta se definen por la expresión de genes específicos. Tal como se muestra en la figura, los genes marcados en rosa ubicados en el cromosoma 1 y 3 se expresan en la etapa vegetativa de la planta. Los genes marcados en verde ubicados en todos los cromosomas se expresan en la etapa reproductiva. Cada gen está conformado por una serie de bases nitrogenadas (A, G, T y C) en arreglos de tres en tres o codones. Cada codón define, de acuerdo a sus características y a las características del aminoácido codificado, una onda sinusoidal que dependiendo de la dimensión, combinatoria y cantidad de genes expresados en un estadio generan una señal aditiva distinta. Se muestran algunos de los genes MADS-box que participan en las diferentes etapas del desarrollo de la planta

La composición de las cadenas laterales de los aminoácidos van desde un único átomo de hidrogeno (H) hasta grupos compuestos que forman anillos. En la *Tabla 3* se muestran todos los grupos que pueden formar las cadenas laterales, los cuales se numeraron del 1 al 20 según el número de átomo o compuestos químicos interactuantes. Posteriormente se hizo un listado de los grupos que compone cada cadena lateral por aminoácido, por ejemplo, la equivalencia de R en el aminoácido histidina (H) que solo contiene un Hidrógeno (H) es igual a [1] (Tabla 4).

Tabla 3	
Grupos que componen R	Valor asignado
H	1
C	2
S	3
O	4
CH	5
OH	6
NH	7
SH	8
COO	9
NH ₂	10
CH ₂	11
H ₂ N	12
H ₂ C	13
CH ₃	14
NH ₃	15
H ₃ C	16
H ₃ N	17

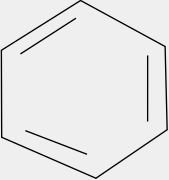
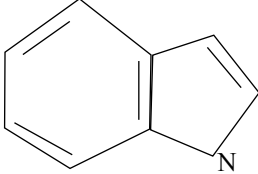
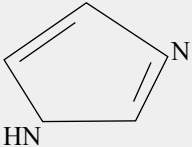




















	18
	19
	20

Tabla 4

Aminoácido	Cadena lateral	Lista asignada
Glicina [G]		[1]
Alanina [A]		[14]
Valina [V]		[5],[16,14]]
Leucina [L]		[11,5],[16,14]]
Isoleucina [I]		[[16,2,1],11,14]
Prolina [P]		[11,11,13,12]
Fenilalanina [F]		[11,18]
Tirosina [Y]		[11,18,6]

Triptófano [W]		[11,20]
Metionina [M]		[11,11,3,14]
Cisteína [C]		[11,8]
Serina [S]		[11,6]
Treonina [T]		[[1,2,6],14]
Histidina [H]		[11,19]
Lisina [K]		[11,11,11,11,15]
Arginina [R]		[11,11,11,7,2,[12,10]]
Aspartato [D]		[11,9]
Glutamato [E]		[11,11,9]
Arparagina [N]		[11,2,[12,4]]
Glutamina [Q]		[11,11,2,[12,4]]

En resumen con la información de expresión genética a partir del código genético que va del codón a la codificación de un aminoácido, que junto a las posiciones de las bases nitrogenadas del codón y las estructuras químicas podemos generar una onda sonora aditiva, la cual depende de R del aminoácido (Fig. 24).

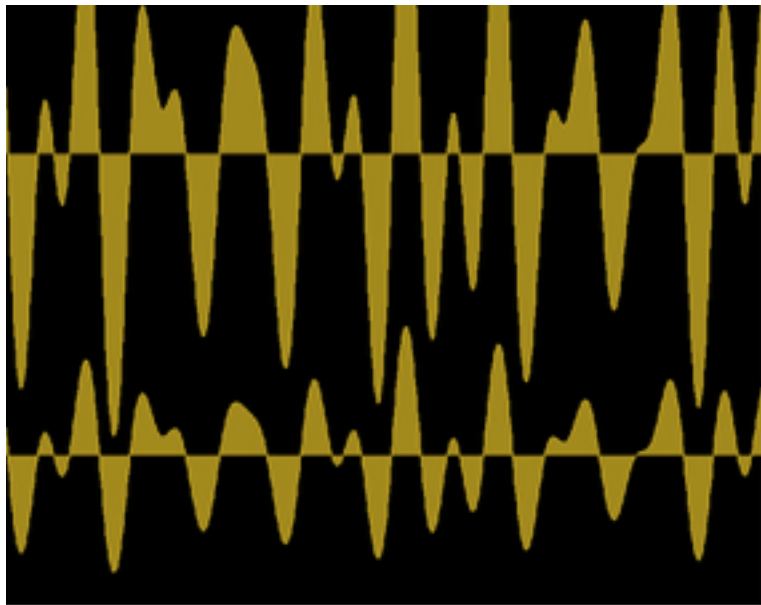


Fig. 24 .Onda generada con la información del codón de inicio AUG que codifica a un solo aminoácido: metionina (M). La información de la cadena lateral (R) del aminoácido modulo la generación del número de ondas y la frecuencia: $\backslash\text{freq}, [11,11,3,14]$, lo que quiere decir que se generan 4 ondas sinusoides cada x tiempo que depende de la primer base que conforma al codón. La frecuencia se mapeó al registro audible en donde primero se sumó el Index (el cual se refiere al estadio en que esta siendo expresado el gen, el Index se multiplicó por 5 para hacer más evidente los cambios entre un estadio y otro), el valor obtenido para las frecuencias aun se mantiene en un registro muy bajo por lo que se multiplicaron por un número mayor: 25; obteniendo la siguiente lista de frecuencias audibles: $\backslash\text{freq}, [275,275,75,350]$. La primer base (A) del codón AUG determinó el delta ($\Delta\text{delta}, 0.5$); la segunda base (U) determinó el paneo ($\Delta\text{pan}, -0.5$); y la tercer base (G) determinó la envolvente ($\Delta\text{env}, [1,2,6,2]$). De la información anterior surge una onda aditiva. Gráficas de la onda obtenida del osciloscopio en SuperCollider. Se pueden escuchar a los 61 codones en el siguiente video: [Video 1](#).

Ensamble

Recordemos que la gráfica de la onda aditiva producto del codón AUG es solo un elemento del gen. Los genes se componen de muchos codones por lo que el ensamble de la sonificación final son las series lineales de los codones que conforman al **gen** (se pueden escuchar los 44 genes utilizados para esta sonificación en el siguiente enlace: [lista de genes MADS-box sonificados](#) del Audio 11 al Audio 54) así como la superposición de los genes expresados en cada estadio (Fig. 25).

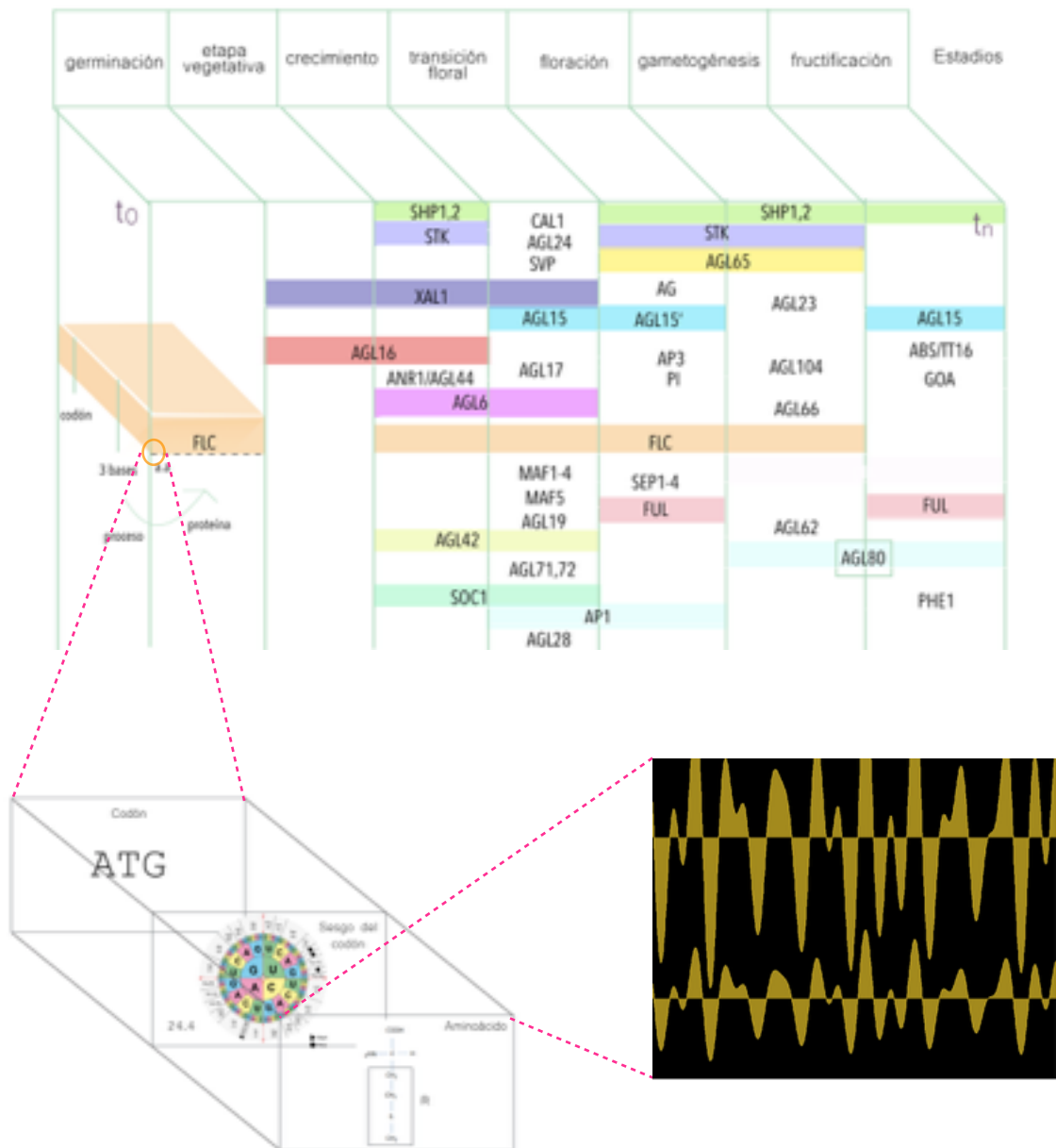


Fig. 25. Proteínas MADS codificadas en cada estadio del ciclo de vida de A. thaliana. Se observa en la tabla superior los diferentes genes que son expresados por estadios. En el primer estadio (germinación) la proteína FLC es expresada. En el cuadro inferior izquierdo se muestra un acercamiento, a grandes rasgos, de la codificación de los aminoácidos a partir de genes específicos. Todos los genes inician con el codón AUG que codifica a metionina (M). La onda resultante de la codificación de M es solo una pequeña fracción del gen que se muestra en el círculo naranja.

De tal manera que la densidad sonora a este nivel de sonificación se define, como se muestra en la *Figura 25*, por la cantidad de genes MADS-box expresados en uno u otro estadio del ciclo de vida de *A. thaliana*. Dado que en la germinación solo se expresa un gen MADS-box (FLC) y en la transición floral se expresan 21 genes la densidad sonora será mucho mayor cuando la planta modelo *A. thaliana* se acerca a su etapa de madurez. Para escuchar los diferentes estadios del ciclo de vida de la planta modelo *A. thaliana* ir al siguiente enlace: lista de [estadios sonificados](#) (del Audio 55 al Audio 61).

1.2.2.2. Implementación del algoritmo

Del mismo modo que la *sonificación del genoma*, la implementación del algoritmo se llevó a cabo en el software *SuperCollider*. Primero se cargaron los archivos de los genes MADS-box descargados en formato FASTA de la base de datos NCBI, los números de identificación se encuentran en la *Tabla 1* (*ver Anexos*). Cada archivo contiene una lista de caracteres que representan a las bases nitrogenadas, las cuales deben ser leídas de tres en tres o codones.

Para representar los procesos descritos arriba se generaron cuatro diccionarios, los cuales nos permiten hacer asociaciones de colecciones y sus valores o *keys*: 1) para el proceso de codificación de proteínas: codón → aminoácido codificado, 2) para el sesgo del uso del codón: codón → sesgo, 3) para la relación de frecuencias que dependen de la cadena lateral de los aminoácidos: aminoácido → relación

de la cadena lateral, y 4) para la información útil del codón (diccionario que posee en su definición 3 relaciones): codón → delta, paneo y envolvente (Fig. 26).

```

1 b = "UUU F
2 UUC F
3 UUA L
4 UUG L
5 UCU S
6 UCC S
7 UCA S
8 UCG S
9 UAU Y
10 UAC Y
11 UAA STOP
12 UAG STOP
13 UGU C
14 UGC C
15 UGA STOP
16 UGG W

1 c = "CCC 5.10
2 CUC 14.92
3 UCC 10.85
4 CCU 18.55
5 UCU 25.93
6 CUU 24.63
7 UUC 19.34
8 UUU 22.63
9 CCA 16.35
10 ACC 9.55
11 CAC 8.33
12 CUA 10.31
13 AUC 17.19
14 UCA 19.57
15 ACU 17.44
16 UAC 12.74

(
~dp = Dictionary.newFrom([
  "G", [1],
  "A", [14],
  "V", [5, [16, 14]],
  "L", [11, 5, [16, 14]],
  "I", [[16, 2, 1], 11, 14],
  "P", [11, 11, 13, 12],
  "F", [11, 18],
  "Y", [11, 18, 6],
  "W", [11, 20],
  "M", [11, 11, 3, 14],
  "C", [11, 8],
  "S", [11, 6],
  "T", [[1, 2, 6], 14],
  "H", [11, 19],
  (
    ~codoninfo = Dictionary.newFrom([
      "A", [0.5, 1, [1, 6, 0, 2]], //delta
      "G", [1, 0.5, [1, 2, 6, 2]],
      "T", [1.5, -0.5, [3, 4, 0, 1]],
      "C", [2, -1, [1, 3, 4, 1]],
    ]);
  )
]);
)

```

Fig. 26. Diccionarios. Del lado izquierdo se encuentra el diccionario codón → aminoácido codificado. Seguido de el diccionario codón → uso del sesgo del codón. Posteriormente el diccionario del aminoácido con su relación de frecuencias según la composición de la cadena lateral. El último diccionario es el de la información del codón; se asigna una lista, aunque los valores son utilizados por separado.

El sintetizador digital de nombre `\basenitroyamino` diseñado es muy similar al que se ocupó en la sonificación del genoma (Fig. 27).

```

(
SynthDef(\basenitroyamino, {arg freq,bati,vol,attack,decay,sustain,release, pan=1;
  var signal, env;
  env = EnvGen.kr(Env([0,1,0.5,0.5,0],[attack,decay,sustain,release]), doneAction: 2);
  signal = SinOsc.ar([freq,freq+bati]).sum;
  Out.ar(0, Pan2.ar(signal * vol, pan, env));
}).add;
)

```

Fig. 27. Sintetizador construido en SuperCollider. Sintetizador \basenitroyamino construye dos ondas sinusoidales (SinOsc). Los argumentos (arg) son los parámetros modulados por la información bioquímica tanto del codón como del aminoácido codificado.

Para llevar acabo la síntesis aditiva se realizó la construcción de una variable global con las listas de los genes expresados por cada estadio. En esta variable ~ciclo se asigna el índice (Index) del estadio, el cual fue útil para realizar los cambios en las alturas de las frecuencias, siendo la germinación el estadio más grave y la fructificación el más agudo (Fig. 28).

```
(
~ciclo = [
  [\FLC], //germinación 0
  [\AGL16,\XAL1], //etapa vegetativa 1
  [\SHP1, \SHP2, \STK, \XAL1, \AGL16, \AGL44, \AGL6, \FLC, \AGL42, \SOC1 ], //crecimiento 2
  [\CAL1, \AGL24, \SVP, \XAL1, \AGL15, \AGL18, \AGL17, \AGL6, \FLC, \MAF1, \MAF2, \MAF3, \MAF4, \MAF5,
  \AGL19, \AGL42, \AGL71, \AGL72, \SOC1, \AP1, \AGL18], //transición floral 3
  [\AGL65, \AG, \SHP1, \SHP2, \STK, \AGL15, \AP3, \PI, \FLC, \SEP1, \SEP2, \SEP3, \SEP4, \FUL, \AP1], //
  floración 4
  [\AGL65, \SHP1, \SHP2, \STK, \AGL23, \AGL104, \AGL66, \FLC, \DIA, \AGL62, \AGL80], //gametogénesis 5
  [\SHP1, \SHP2, \AGL15, \TT16, \GOA, \FUL, \DIA, \AGL80, \PHE1] //fructificación 6
];
)
```

Fig. 28. Lista de genes MADS-box expresados en los diferentes estadios del ciclo de vida de *A. thaliana*. Se muestran los genes expresados y el índice de cada estadio en el ciclo de vida de la planta modelo.

Una vez se tenga cargada la información en el software, el siguiente paso fue construir el *Pbind* (Fig. 29) para poder hacer las traducciones sonoras, tanto *Pbind* como genes en los estadios, es decir para la germinación un solo *Pbind*, para la etapa vegetativa dos, para el crecimiento diez y así sucesivamente. De modo que al ejecutar el código ya podemos escuchar los genes expresados en cada estadio del ciclo de vida de *A. thaliana* bajo las condiciones de asignación descritas anteriormente.


```

Pbind( //freq,bati,vol,attack,decay,sustain,release, pan=1;

      \instrument, \basenitroyamino,
      \freq, Pseq(aminoacidosNor + ((genIndx+1)*5) * 30,1).trace, .
genIndx)) Si quieres camios en estadio
      /\dur, Pseq(ocurrenciasNor * 0.1,inf), //es determinada po
      \bati, Pseq(sesgocod *0.2 ,1), //el sesgo del codón define l
      \pan, Pseq(paneos,inf), //definido por la segunda BN que con
      \attack, Pseq(envolventeA/2,1), //Definida por la tercer bas
La primer posición en donde se forma el puente de hidrógeno
      \decay, Pseq(envolventeD/2,1), //Definida por la tercer base
posición en donde se forman los puentes de hdrógeno, T y A no posee
      \sustain, Pseq(envolventeS/2,1), //Definida por la tercer ba
tercera posición del puente de hidrógeno (dependiendo de la base, si
      \release, Pseq(envolventeR/2,1), //Definida por la tercer ba
forma es estructura química de la base
      \delta, Pseq(deltaCod1,1 ), //definido por la primer base qu
      \vol,mainVol,
      ).play;

```

Fig. 29. Contrucción del Pbind. Se asigna el instrumento \basenitroyamino. En la variable aminoacidosNor se ubica la lista de la cadena lateral de cada aminoácido. La variable genIndx es el indice del estadio del ciclo de vida de A. thaliana. La variable sesgocodon se refiere a la preferencia del uso de un cierto codón para codificar un aminoácido. La variable paneos proviene de la información de la segunda base que conforma al codón. Las variables envolventeA, D, S y R provienen de la información de la tercer base que conforma al codón. La variable deltaCod1 proviene de la información de la primer base que conforma el codón.

El código de la sonificación desarrollada en el software *SuperCollider* está disponible en el siguiente enlace de GitHub:



1.2.3. Interacción de la sonificación con el usuario

Cuando las condiciones ambientales son favorables, la semilla experimenta cambios bioquímicos y metabólicos que conducen al reinicio del crecimiento del embrión y a la protusión de la radícula desencadenando la germinación (Márquez, *et al.*, 2013) y por ende su ciclo de vida.

Al igual que la semilla, la sonificación desarrollada se encuentra empaquetada en una cubierta (teléfono móvil) que protege al embrión (aplicación) a la espera de condiciones favorables (espacios designados —> jardines botánicos) para poder expresar sus mecanismos, de lo contrario, como una semilla en ausencia de humedad, de oxígeno y de otros factores, se encontrará en estado de quiescencia o inactiva.

Así pues, la interacción aunque de manera muy general exige al usuario un único estímulo para abrir el candado que detone al sonido, el cual fue previamente sintetizado en el software *SuperCollider* (*sonificación del genoma y sonificación por estadios*). Entonces el usuario debe proveer al sistema las condiciones idóneas a partir de su ubicación en los jardines botánicos con el objetivo de poner en contacto al ser humano, a la tecnología y a la ecología que genere a través de la experiencia un sentimiento sensible hacia los organismos vegetales. Y que en el mejor de los casos se logre atacar el alejamiento que se tiene acerca del conocimiento de las plantas mexicanas. Tal como menciona Caballero *et. al.* (2012) en su libro *Jardines Botánicos, contribución a la conservación vegetal de México* sobre una ignorancia que existes actualmente sobre el conocimiento vegetal y que se ve reflejado en la extracción no sostenible de recursos vegetales, en cambios en el uso del suelo y en otros factores que son derivados de la actividad humana que junto al calentamiento global ponen en riesgo a por lo menos 60 000 especies vegetales en todo el mundo (BGCI 2002). Este fenómeno alcanza niveles alarmantes en México, uno de los cinco países con mayor biodiversidad del planeta. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT-2010), al menos 985 de las más de 22 000 especies

de plantas mexicanas están en algún nivel de riesgo, ya sea que están extintas en el medio natural, en peligro de extinción, amenazadas o requieren alguna protección especial (Caballero *et al.*, 2012).

De ahí el motivo de considerar condiciones favorables en el uso de la aplicación, las cuales involucra n que el usuario se ubique en un jardín botánico (Fig. 30), los cuales son espacios que promueven la educación ambiental además de servir como reservorios de protección de numerosas especies vegetales amenazadas o en peligro de extinción, así como, lugares de reproducción de especies de alto valor comercial las cuales son extraídas de su sitio de origen. Volviéndose estos espacios lugares transdisciplinarios en donde convergen todo clase de personas haciendo posible como dice Caballero *et. al.* (2012), una <<re-educación de la sociedad respecto a la importancia básica de las plantas en la vida de los mexicanos>>.



Fig. 30. Localización de los jardines botánicos utilizados para la experiencia sonora. Ubicados en los siguientes estados: Aguascalientes, Campeche, Cd. de México, Chiapas, Guerrero, Jalisco, Morelos, Puebla, Oaxaca, Querétaro, Quinta Roo, Sinaloa, Tlaxcala, Estado de México y Yucatán. Mapa obtenido de Google Maps.

Como se mencionó al principio la aplicación se llevó a cabo junto a Cristián Serrano Martínez de *Kuali Studio*. Aplicación que lleva por nombre *El Sonido de la Vida Vegetal*. Dicha aplicación es de tipo *site specific* por lo que solo funciona en los jardines botánicos señalados en la *Tabla 5* (ver Anexos).

1.2.3.1. Implementación del algoritmo

Para poder llevar a cabo lo anterior se ocupó el algoritmo *point in polygon* de Darel Rex (1998) con el fin de determinar si un punto está adentro de un espacio delimitado a través de la trazar un polígono en el sistema de coordenadas geográficas (Fig. 31). Por lo tanto, se obtuvieron las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de cuatro puntos que delimitaran, más o menos, el área de los diferentes jardines. Estas áreas definidas son los espacios en donde se activa la aplicación (Fig. 32). Las áreas generadas no son exactas pero son suficientes para poder generar la experiencia sonora.

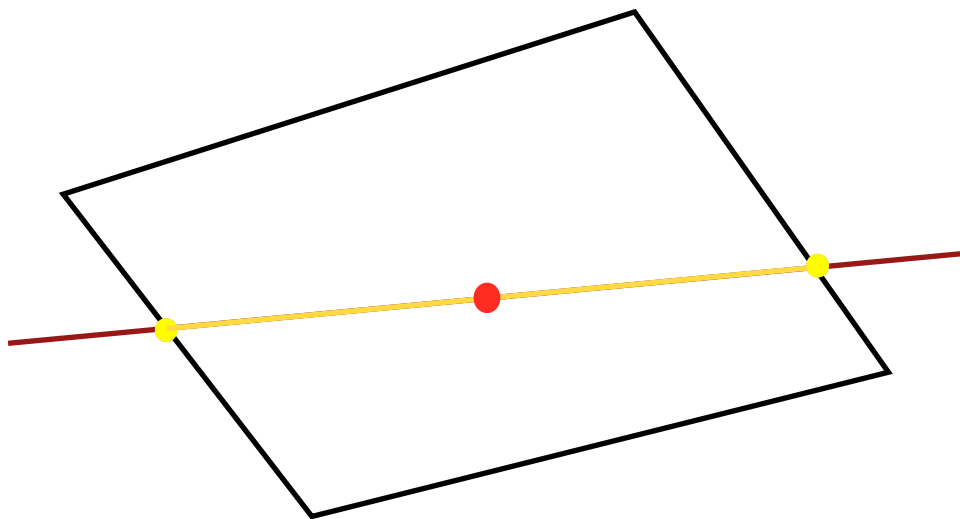


Fig. 31. Polígono de cuatro lados. El algoritmo prueba si el punto rojo está adentro o fuera del área del polígono; por lo que se ocupó para designar si el usuario se encuentra dentro o fuera del área designada en el sistema de coordenadas geográficas que bajo el condicional positivo se abre el candado y se detona la experiencia de lo contrario no ocurre nada (no se activa el sonido).



Fig. 32. Jardín botánico de la Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Las líneas amarillas delimitan el área perteneciente al jardín botánico. Las líneas rojas delimitan el área generada a partir de cuatro puntos. Área en donde la aplicación detona el sonido, por lo que el punto rojo es el condicional positivo y el punto azul el condicional negativo. Se muestra el rango de error al comparar ambas áreas. Mapa obtenido de Google Maps.

Ver el resto de áreas generadas para los 22 jardines en la Tabla 5 en Anexos. Una vez que el usuario se ubique adentro de las áreas delimitadas se activa el audio, primero se reproduce el primer nivel de sonificación (sonificación del genoma), tres minutos después se entrelazan ambas sonificaciones (sonificación del genoma y sonificación por estadio). Al minuto tres se escucha la germinación, al minuto seis la etapa vegetativa y así sucesivamente hasta llegar a la fructificación.

1.2.3.2 Aplicación: *El Sonido de la Vida Vegetal*

El desarrollo de la aplicación se llevó a cabo a través del software *Unity* junto con Cristián Serrano. La interface de la aplicación, que se muestra en la *Figura 33*, cuenta con diferentes paneles, uno para la introducción, uno para las instrucciones que recomendamos siga el usuario para mejorar la experiencia, uno para el menú que lleva a las descripciones del proyecto y uno más para poder escuchar la sonificación.



*Fig. 33. Interface de la aplicación El Sonido de la Vida Vegetal. a) Introducción a la aplicación. b) Instrucciones para mejorar la experiencia. c) Menú informativo, los cinco primeros botones llevan a una ventana nueva con una descripción (d) sobre el tema: resumen, A. thaliana, ciclo de vida, los genes y sonificación. El sexto botón que es redondo lleva a la ventana de escuchar (f) d) descripción del tema seleccionado. e) Segundas instrucciones para mejorar la experiencia en el espacio. f) Ventana en donde se detona la experiencia El Sonido de la Vida Vegetal. La flecha apunta a la primera etapa del ciclo: germinación. Una vez el usuario se encuentre adentro del área definida el candado se abre y el sonido emerge, conforme el paso del tiempo se transita de un estadio a otro. Escuchar la sonificación El Sonido de la Vida Vegetal en le siguiente enlace: [Audio 62](#).
Descargar la aplicación desde el Play Store.*

El código de la aplicación se puede descargar del siguiente enlace de GitHub:



IV

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Data was loaded, parameters were selected, the algorithm set going, and some time later the sound emerged.

-Hunt & Hermann, 2011

En este apartado se evaluaron y discutieron los alcances y limitaciones que se alcanzaron respecto a los objetivos planteados tanto para la dimensión ecológica-social como para la dimensión técnica-metodológica. Recordando un poco, el primer objetivo tiene que ver con invitar al usuario a espacios naturales y de educación ambiental con la finalidad de fomentar estrategias de conservación. El segundo objetivo involucra el desarrollo de la sonificación (desde acotar y sistematizar la información hasta la programación en el software) y el modo de presentación que concluyó en el desarrollo de una aplicación que lleva por nombre *El Sonido de la Vida Vegetal*.

De acuerdo a la parte ecológica y social cabe mencionar que quedó incompleta, debido al tiempo insuficiente para poder llevar a cabo una evaluación del sistema como estrategia de conservación alcanzando una sensibilización hacia el mundo natural. A pesar de esto, se realizó una prueba piloto para probar la funcionalidad de la aplicación, al menos de manera técnica, donde los voluntarios (*Lorena Perales, Arturo Spinola, Adelina Amparán, Ezequiel Mendez, Juan. J. Valerio, Juan Carlos Denicia y Jéssica Juárez*) probaron si la aplicación funcionaba en algunos jardines botánicos (en Morelos, Puebla y Tlaxcala) informando sobre el funcionamiento del algoritmo *point in polygon* de Darel Rex, quienes notificaron que en algunos espacios no se activaba el sonido, había faltas de ortografía en los paneles o simplemente no se podía descargar debido a las restricciones en algunos celulares, por lo que fue necesario subirlo a la *Play Store* para su descarga directa. Al corregir los errores y ser notificados de su funcionalidad suponemos que funciona para el resto de los jardines.

De acuerdo al segundo objetivo, el que refiere a la parte de desarrollo tecnológico, reclamó mayor esfuerzo debido a la existencia de una limitante de comunicación entre tutor-alumno y no por el hecho de tener una mala relación sino por las barreras en el conocimiento entre la biología, la programación y el sonido, las cuales no permitían el flujo de la información de un lado al otro y por lo tanto una conceptualización integra del proyecto. Afortunadamente el interés de mi tutor hacia la biología así como el mío hacia la programación y el sonido permitió que la sonificación se lograra y se generara un dialogo y una integración de ambos contextos. Y de ahí que surgieran las preguntas de investigación: ¿de que manera se puede generar un modelo óptimo y coherente de sonificación que mantenga las relaciones del sistema biológico vegetal? y ¿de qué manera se presentarán los resultados sonoros? En relación a nuestras preguntas de investigación podemos decir que de acuerdo al modelo óptimo y coherente de sonificación es valido en cuanto a mantener el objetivo ecológico-social a partir de un enfoque de la complejidad ya que el sonido es estructurado a partir de la información bioquímica, biomolecular y del desarrollo de la planta modelo *A. thaliana*, la cual en su representación sonora señala las interacciones entre los diversos elementos que componen a las estructuras del sistema genético (cromosomas, genes y proteínas) que dicta el desarrollo. En otras palabras, la complejización de la vida es gracias a las interacciones que se dan entre dichos elementos. Por lo tanto, al mantener esas características de interacción de elementos (ondas simples) el sonido de igual modo se complejiza.

Respecto a la complejización del sonido generada a partir de seguir las relaciones biológicas del desarrollo vegetal podemos señalar que la sonificación de elementos unitarios como son las bases nitrógenadas o los genes no presentan diferencias sonoras entre uno y otro, lo que quiere decir que difícilmente podemos distinguirlos. Las diferencias sonoras radica en la interacción y superposición de estos elementos, lo cual se relaciona con lo que plantea Morín, donde indica que la realidad desde la complejidad implica simultáneas dimensiones complementarias las cuales nos ayudan a comprender de manera más amplia los diversos fenómenos. Así, la diferencias sonoras son percibidas hasta la superposición de las ondas simples que fueron sintetizadas a partir de la información biológica vegetal.

Tal resultado sonoro es completamente viable como una representación de los fenómenos vegetales. A esta representación sonora la hemos llamado *El Sonido de la Vida Vegetal* y es por lo tanto una analogía que puede funcionar como estrategia para fomentar una conciencia ecológica.

Por lo anterior, es necesario discutir algunos aspectos de gran importancia respecto a los parámetros genéticos que fueron seleccionados para modular parámetros sonoros, ya que tales parámetros genéticos se seleccionaron de acuerdo a lo que consideré importante (pero siempre en base a la literatura) al momento de querer transmitir la teoría de desarrollo desde un punto de vista biomolecular pero desde el sonido, y que desde luego la relación parámetro biológico -> parámetro sonoro fue una decisión muy personal, la cual surgió de hacer un par de pruebas de *ensayo y error* descartando las que se escuchaban “feo”. Recordando además, que para la sonificación no se hizo ningún tipo de experimentación sino que únicamente se ocupó información ya definida y almacenada en la base de datos NCBI. Esto quiere decir que, la sonificación desarrollada es gracias a trabajos de un gran grupo de científicos en el área de la biología vegetal, lo cual me parece es muy importante mencionarlo debido a la fuerte implicación que tiene el aumento exponencial de información; información útil en este tipo de trabajos que articulan a la ciencia, al arte y a la tecnología.

En conclusión, hasta este momento se logró la obtención de un producto tecnológico funcional el cual se ha difundido mediante charlas en diferentes espacios para que la gente lo conozca y en el mejor de los casos se impliquen en la experiencia. Sin embargo, existen limitaciones en su uso: solo funciona en sistema operativo *Android*, se requiere el uso de GPS y acceso a red, espacio en la memoria, audífonos y lo más importante tiempo para poder visitar algún jardín botánico. Por lo que se plantea en un futuro al menos la inclusión de otros sistemas operativos y otros espacios, sin olvidarnos del objetivo ecológico-social para poder ampliar el alcance y más gente pueda tener acceso. De acuerdo a la parte técnica metodológica es importante mencionar que los audios cargados en la aplicación son una pequeña fracción de los datos. La dimensión del genoma es enorme y de acuerdo al diseño de sonificación planteado en esta tesis la duración del resultado sonoro rebasa el año. Por tal motivo, es necesario optimizar el modelo del diseño de la sonificación a manera de abarcar mayor información en la menor cantidad de tiempo posible. De acuerdo a la interacción y lo que exige el SID sobre el bucle

de percepción-acción entre usuario y sonificación, la aplicación es imperfecta debido a que solo se requiere de un único estímulo que abra el candado y active el sonido previamente sintetizado. Por lo que quedan muchas tareas pendientes y muchos ánimos para seguir creciendo y mejorando la calidad de esta investigación artística.

V

GLOSARIO

A

ADN - Ácido desoxirribonucleico. Es un tipo de ácido nucleico el cual constituye el material genético de los organismos. El ADN funciona como el almacén de la información genética y se localiza en los cromosomas del núcleo y en los cloroplastos de las células vegetales (Salazar, *et al.* 2013).

Aminoácidos - Son los bloques constructivos para armar las moléculas de proteínas. Los aminoácidos se llaman así porque son derivados aminados de ácidos carboxílicos (Horton, *et al.* 2008).

Angiospermas - Plantas con flores clasificadas dentro de la división Magnoliophyta. Constituye el grupo de plantas más diverso de organismos en el reino Plantae, con alrededor de 260 000 especies (Márquez, 2013).

Anillos heterocíclicos – Anillo aromático que tiene sustituido al menos un carbono por un nitrógeno u oxígeno.

Arte sonoro - término genérico utilizado principalmente para las prácticas como diversas instalaciones sonoras, esculturas sonoras, *radio art*, poesías sonoras, *sound performances*, música por computadora o *auditive net art* (Carsten Seiffarth).

B

Bases nitrogenadas - Son moléculas formadas de átomos de carbono y nitrógeno que crean anillos heterocíclicos. Se conocen dos tipos de bases nitrogenadas: las purinas y las pirimidinas (Salazar, *et al.* 2013).

Batimentos - El batimiento es un fenómeno acústico que se genera al interferirse entre sí dos ondas sinusoidales con frecuencias ligeramente distintas.

C

Campo libre - El campo libre o “free field” se refiere a cualquier espacio aéreo en el que el sonido actúe como si estuviera en un campo libre teórico, considerando la distancia del usuario receptor y la fuente. Esto no es un problema al ser una instalación para audífonos (Everest & Pohlmann, 2009).

Celular - Disciplina académica que se encarga del estudio de las células en lo que respecta a las propiedades, estructura, funciones, orgánulos que contienen, su interacción con el ambiente y su ciclo vital (Wikipedia).

Células - Las células son las unidades funcionales de cualquier organismo vivo; esta formada por un

citoplasma y una membrana plasmática que la rodea. Las instrucciones necesarias para dirigir sus actividades están contenidas en los genes que se agrupan en los cromosomas que, en el caso de las células eucariotas, se localizan en el núcleo celular y son conocidas en su conjunto como información genética (Salazar, *et al.* 2013)

Codón/Codones - Agrupación de tres en tres unidades básicas del ADN.

Compilación - En informática es la traducción de un lenguaje a otro para ejecutar un programa.

Complejidad - La complejidad es relación y es inclusión; ni siquiera excluye la simplificación, sino que la integra como uno de los elementos del pensamiento complejo. Sin embargo, siendo multidimensional y englobadora, es abierta e inclausurable (complejidad es incompletud). La complejidad es incertidumbre y en ella priman las estrategias a los programas: a ello obedece La Méthode (el método para Morin, aunque puede contener segmentos programados –las estrategias que han tenido éxito–, es básicamente estrategias y ayuda a las estrategias del sujeto) (Soto, 1999).

Complejo proteico - Grupo de dos o más proteínas para llevar a cabo una función específica.

Cromosoma - Estructuras altamente organizadas formada por ADN y proteínas que contiene la mayor parte de la información genética de un ser vivo. También se puede encontrar información genética en estructuras como las mitocondrias, los cloroplastos y los plástidos.

D

Diferenciación celular - La diferenciación implica cambios cualitativos en la morfología y funcionamiento de las células, tejidos y órganos de las plantas. Es, en general, un proceso mediante el cual las células se especializan como resultado de la expresión diferencial del material genético (Márquez, 2013).

Duración - La duración corresponde al tiempo que se mantienen las vibraciones producidas por un sonido. Este parámetro está relacionado con el ritmo y se representa en los segundos que la onda contenga.

E

Embrión - Óvulo fecundado en las primeras etapas de su desarrollo.

Entorno - Desde un enfoque sistémico se denomina a la porción de realidad que puede afectar al sistema o ser afectada por éste (Lara-Rosano, *et.al.* 2017).

Envolvente - Constituye una manera de definir, en términos de parámetros globales (desde dos hasta más de cuatro), la evolución temporal en amplitud de cualquier sonido.

Estadios - Etapas en las que se divide el desarrollo de un organismos en su ciclo de vida.

Estado – Conjunto de variables necesarias para describir el status del sistema en un momento determinado (Glosario Servidor_Alicante).

Estratos - Capa o serie de capas en una cosa.

Espacialización - Es una herramienta para diseñar una narrativa sonora de manera que se crean, reconstruyen o se imitan entornos sonoros, estimulando en el oyente una experiencia sonora multidireccional.

Espacio - es una región cuya dimensiones son las variables de estado, constituido por todos los estados factibles que puede ocupar un sistema (Lara-Rosano, *et.al.* 2017).

Espectro audible - El espectro se refiere al rango de frecuencias que se encuentran dentro de los límites perceptivos del oído humano 20Hz a 20KHz. Existen sonidos que son demasiado bajos (infra-sonidos) y sonidos que son demasiado altos (ultrasonidos) en frecuencia para que podamos percibirlos auditivamente (Everest & Pohlmann, 2009).

Esporofito - Fase diploide pluricelular propia de las plantas.

Expresión genética - proceso de activación de genes que engloba los procesos de *transcripción* y *traducción*.

F

Factores abióticos - son los factores que no tienen vida, entre los más importantes podemos encontrar: el agua, la temperatura, la luz, el pH, el suelo, la humedad, el oxígeno y los nutrientes (Wikipedia).

Factores bióticos - son los organismos vivos que influyen la forma de un ecosistema. Pueden referirse a la flora y la fauna de un lugar y sus interacciones (Wikipedia).

Fenotipo - Conjunto de caracteres visibles que un individuo presenta como resultado de la interacción entre su genotipo y el medio.

Frecuencia - es la primera dimensión del sonido y se refiere al número de ciclos por segundo de una onda periódica la cual confiere el tono (Cottle, 2006).

G

Gametofito - Fase haploide de un vegetal destinada a producir gametos; es propio de las plantas de generación alternante, sexual y asexual.

Gen - Porción de material genético que, junto con otras, se halla dispuesta en un orden fijo a lo largo de un cromosoma, y que determina la aparición de los caracteres hereditarios en los seres vivos.

Genética - es el área de estudio de la biología que busca comprender y explicar cómo se transmite la herencia biológica de generación en generación mediante el ADN.

Genoma - El genoma se define como el conjunto de pares de bases contenidas en el ADN de cada organismo (Salazar, *et al.* 2013).

Genotipo - Conjunto de los genes que existen en el núcleo celular de cada individuo.

GitHub - es una forja (plataforma de desarrollo colaborativo) para alojar proyectos utilizando el sistema de control de versiones Git. Se utiliza principalmente para la creación de código fuente de programas de computadora.

H

Histología - rama de la biología que estudia la composición, la estructura y las características de los tejidos orgánicos de los seres vivos (Wikipedia).

I

Identidad del sonido - Característica de carácter biológico que no puede ser entendida sin un receptor que distinga la percepción del espectro del sonido, del timbre, de sus características de temporalidad y de su ubicación en el espacio de la fuente emisora (Simon Carlile, 2011).

Información - Desde la teoría de la comunicación se trata de la transmisión de un mensaje, desde la cibernética lleva consigo un sentido organizacional, desde la biología constituye un mensaje hereditario. Considerada así, a la información como organizacional, como memoria, como mensaje, como programa o como todo eso a la vez.

Instalación sonora - Nueva percepción de un lugar/ espacio gracias al sonido (Max Neuhaus).

Investigación artística - La investigación artística o investigación-creación emerge como una nueva categoría debido a la evolución de los medios contemporáneos de análisis, de creación y reproducción, los cuales permean los modos de conocimiento cambiando así las prácticas tanto artísticas como de investigación. Estas prácticas se caracterizan por la integración a la investigación de procesos creativos, componentes estéticos

experimentales o el desarrollo de obras artísticas (Chapman & Sawchuk, 2012).

J

K

L

Localización binaural - Característica que nos ayuda a ubicar la procedencia del sonido (derecha o izquierda) (Everest & Pohlmann, 2009).

M

MADS - es una familia de factores de transcripción basada en la similitud de las secuencias de sus genes (Wikipedia).

Meristemo - Masa de células caracterizadas por ser no diferenciadas y totipotenciales, o también conocido como **Meristemo vegetativo**.

Meristemo apical - El meristemo apical primero es vegetativo y luego es de floración. Explicarlo mejor. Masa de células responsables de la formación del cuerpo primario de la planta. Se encuentran en los ápices de raíces y tallos, principales y laterales.

Meristemo floral - Masa de células que inician el desarrollo de los diferentes verticilos de la flor.

Molécula - Agrupación definida y ordenada de átomos.

Molecular - Rama de la biología que tiene como objetivo el estudio de los procesos que se desarrollan en los seres vivos desde un punto de vista molecular (ADN y proteínas) (Wikipedia).

Multimodal - Experiencia en la que convergencia de dos o más sentidos.

N

Nucleótidos - Compuesto químico orgánico fundamental de los ácidos nucleicos, constituido por una base nitrogenada, un azúcar y una molécula de ácido fosfórico.

Ñ

O

Onda sinusoidal de sonido - Ondas mas simples de sonido que se pueden sintetizar a partir de una abstracción matemática. Estas ondas sonoras no existen en la naturaleza.

Orgánico - El estudio de lo orgánico en biología se refiere a la rama de la química que estudia una clase numerosa de moléculas que en su gran mayoría contienen carbono formando enlaces covalentes: carbono-carbono o carbono-hidrógeno y otros heteroátomos, también conocidos como compuestos orgánicos (Wikipedia).

Organísmico - Propio o relacionado con los órganos que conforman a un organismos y su constitución.

Organización - disposición de relaciones entre componentes o individuos que producen una unidad o sistema complejo, dotada de cualidades desconocidas al nivel de componentes o individuos. Organización por lo tanto transforma, produce, une y mantiene.

Osciladores digitales - son objetos que generan una oscilación, es decir, la onda generada debe de hacer un recorrido pasando por los mismos puntos cada vez.

P

Paneo - técnica para enviar una señal de sonido en un medio estéreo o multicanal. La distribución de esta señal de sonido se hace a través de un nuevo campo de sonido estéreo o multicanal determinado por un ajuste de control panorámico.

Pirimidinas - molécula de cuatro átomos de carbono (C) y dos de nitrógeno (N). (Horton, *et al.*, 2008)

Plántula - estadio del desarrollo del esporófito que comienza cuando la semilla rompe su dormancia y germina, y termina cuando el esporofito desarrolla sus primeras hojas no cotiledonares maduras, es decir funcionales (EcuRed).

Psicoacústica - rama de la acústica que estudia la relación existente entre el estímulo de carácter físico y la respuesta de carácter psicológico que el mismo provoca. Estudia la relación entre las propiedades físicas del sonido y la interpretación que hace de ellas el cerebro.

Puentes de hidrogeno - Son una clase de interacción electrostática que existe en muchas macromoléculas y se encuentran entre las fuerzas no covalentes mayores en los sistemas biológicos. Estas fuerzas son las que existen entre las bases de ADN para formar la estructura de doble hélice del ADN (Horton, *et al.*, 2008).

Purinas - sistema de anillos fundidos de pirimidina y de imidazol. (Horton, *et al.*, 2008)

Q

R

Regiones codificantes de un gen - Regiones de un gen denominadas exones que codifican a proteínas.

S

Semilla - La semilla es la unidad estructural de reproducción, propagación y diseminación de las gimnospermas (semillas desnudas) y Angiospermas (semillas encerradas en un fruto) (biología de las angiospermas). Una semilla generalmente es un óvulo fecundado que posee un embrión, un tejido de reserva y una cubierta seminal protectora.

Sésiles - se refiere a la característica de ciertos organismos, sésiles, que no poseen algún medio de auto-locomoción y son normalmente inmóviles o sedentarios (Wikipedia).

Simbiosis - forma en la que individuos de diferentes especies se relacionan entre sí, obteniendo el beneficio de al menos uno de los dos.

Síntesis de sonido - La síntesis de sonido consiste en obtener sonidos a partir de medios no acústicos; variaciones de voltaje en el caso de la síntesis analógica, o por medio de programas de computadora en el caso de la síntesis digital que hace referencia a la analógica (Wikipedia).

Sintetizador digital - es un instrumento musical electrónico diseñado para producir sonido generado artificialmente, usando técnicas como síntesis aditiva, síntesis sustractiva, síntesis por modulación de frecuencia, síntesis por modelado físico o por modulación de fase, para crear sonidos.

Sistema - Conjunto de elementos que interaccionan entre sí y con el entorno, una especie de campo en el que se desarrollan su actividad con grados variables de complejidad. Sistema y entorno fluyen acoplándose recíprocamente (Lara-Rosano, 1990).

Sistema complejo - Un sistema complejo es una estructura de individuos -o partes- interrelacionados a varios niveles. Las interacciones a todos los niveles son no lineales, dinámicas -que cambian con el tiempo- y muchas veces circulares, llamadas retroalimentaciones. Un sistema complejo tiene sus componentes interactuando activamente con su entorno, manifestando procesos de intercambio continuo de energía e información entre los mismos componentes y con el entorno. Cada integrante, a su vez, puede ser un sistema complejo en sí, con capacidades de cambiarlo y adaptarse,

interactivamente, tanto con los otros elementos como con el entorno (Gallardo, 2017).

Sonificación - representación de la información usando el sonido sin voz, para facilitar la comprensión de los datos o los procesos de información mediante su escucha. También puede entenderse como la transformación de las relaciones entre los datos, en relaciones que se perciben en una señal acústica a los efectos de facilitar la comunicación o la interpretación de éstos.

Site specific - Se refiere a obras de arte creadas para existir en un lugar determinado. Generalmente, el artista toma en cuenta la ubicación al planificar y crear su obra (Wikipedia).

T

Traducción - codificación de proteínas a partir de ARNm que opera de acuerdo al código de codones.

Transdisciplina - *La transdisciplinariedad concierne, como el prefijo “trans” lo indica, lo que *está* a la vez *entre* las disciplinas, *a través* de las diferentes disciplinas y *más allá* de toda disciplina. Su finalidad es la comprensión del mundo presente en el cual uno de los imperativos es la unidad del conocimiento (Nicolescu, 1994).*

Transcripción - primer proceso de la expresión genética, mediante el cual se transfiere la información contenida en la secuencia del ADN hacia la secuencia de proteína utilizando diversos ARN como intermediarios.

U

Umbral de percepción - es la cantidad mínima de señal que ha de estar presente para ser registrada por un sistema.

V

Variables - propiedades que describen un sistema y que varían con el tiempo. El estado de un sistema está caracterizado por un cierto número de parámetros llamados variables de estado. Estas son magnitudes medibles. Estas variables pueden ser de entrada o salida. Una variable de estado es precisamente la que representa el estado actual del sistema, el cual, si es función del tiempo, varía en cada instante de tiempo. Estas variables interactúan con las variables exógenas y endógenas del sistema, llamadas también factores o convertidores de acuerdo con las relaciones funcionales dispuestas. El valor que toma durante un periodo particular de tiempo puede depender no sólo de una o más variables exógenas en determinado periodo precedente, sino además del valor de ciertas variables endógenas de periodos anteriores (Lara-Rosano, 2016).

Variables de estado - Conjunto de propiedades que caracterizan a un individuo, en un momento dado y en un contexto determinado, constituyendo su estado (Lara-Rosano, *et al.*, 2017).

Vida autótrofa - seres vivos que se alimentan por sí mismos y que producen en su interior su propio alimento, lo cual quiere decir que no necesitan buscarlo en el exterior.

Vida heterótrofa - —en contraste con la nutrición autótrofa— es aquella en la cual la materia orgánica es transformada en nutrientes y en energía.

Volumen - La *amplitud* es la segunda dimensión del sonido que se refiere al volumen (Cottle, 2006). El volumen es la percepción sonora que el ser humano tiene de la potencia de un determinado sonido.

W

X

Y

Z

VI

ANEXOS




Tabla 1		
GEN	LOCUS TAG	FUNCIÓN
<i>FLC</i> (<i>FLOWERING LOCUS C</i>)	AT5G10140	Represor en la transición floral; germinación; transición de juvenil a adulto; iniciación de la floración; desarrollo del órgano floral.
<i>XAL1</i> (<i>XAANTAL1</i>)	At1g71692	Regulación del ciclo celular en el desarrollo de la raíz; activador en la transición floral.
<i>AGL16</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 16</i>)	At3g57230	Numero y distribución de los estomas.
<i>SHP1, 2</i> (<i>SHATTERPROOF 1, 2</i>)	At3g58780, At2g42830	Desarrollo de carpelos, ovulo y fruto dehiscente; formación periódica de la raíz lateral.
<i>STK</i> (<i>SEEDSTICK</i>)	At4g09960	Desarrollo del carpelo y ovulo; formación periódica de la raíz lateral.
<i>ANR1</i> (<i>ARABIDOPSIS NITRATE REGULATED 1</i>)	At2g14210	Desarrollo de la raíz; respuesta a nutrientes.
<i>AGL6</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 6</i>)	At2g45650	Activador en la transición a la floración; desarrollo de órganos laterales.

<i>AGL42 (FYF)</i> <i>AGAMOUS-LIKE 42</i> <i>(FOREVER YOUNG FLOWER)</i>	At5g62165	Activador de la transición a la floración; senescencia del órgano floral y abscisión; desarrollo de la raíz.
<i>SOC1</i> <i>(SUPPRESSOR OF OVEREXPRESSION OF CONSTANS 1)</i>	At2g45660	Activador de la transición a la floración; formación periódica de la raíz lateral.
<i>FUL</i> <i>(FRUITFULL)</i>	At5g60910	Especificación de la identidad del meristemo; regulador en el ciclo de vida anual con SOC1; desarrollo del fruto; crecimiento de la hoja caulinar.
<i>CAL</i> <i>(CAULIFLOWER)</i>	At1g26310	Especificación de la identidad del meristemo.
<i>AGL24</i> <i>(AGAMOUS-LIKE 24)</i>	At4g24540	Activador de la transición a la floración.
<i>SVP</i> <i>(SHORT VEGETATIVE PHASE)</i>	At2g22540	Represor de la transición a la floración.
<i>AGL15</i> <i>(AGAMOUS-LIKE 15)</i>	At5g13790	Embriogénesis; Represión de la transición a la floración junto con <i>AGL18</i> ; Longevidad en los sépalos y pétalos; maduración del fruto.
<i>AGL18</i> <i>(AGAMOUS-LIKE 18)</i>	At3g57390	Represor de la transición a la floración junto con <i>AGL15</i> .
<i>AGL17</i> <i>(AGAMOUS-LIKE 17)</i>	At2g22630	Activador en la transición a la floración.

<i>MAF1-4</i> (<i>MADS AFFECTING FLOWERING 1-4</i>)	At1g77080, At5g65050, At5g65060, At5g65070	Represores en la transición a la floración
<i>MAF5</i> (<i>MADS AFFECTING FLOWERING 5</i>)	At5g65080	Activador en la transición a la floración.
<i>AGL19</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 19</i>)	At4g22950	Activador de la transición a la floración.
<i>AGL71,72</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 71, 72</i>)	At5g51870, At5g51860	Activador de la transición a la floración junto con <i>AGL42</i> .
<i>API</i> (<i>APETALAI</i>)	At1g69120	Especificación de la identidad del meristemo; gen homeótico de clase A
<i>AGL28</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 28</i>)	At1g01530	Activador de la transición a la floración
<i>AGL65, 66, 104</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 65, 104</i>)	At1g18750, At1g77980, At1g22130	Maduración del polen y crecimiento del tubo polínico
<i>AG</i> (<i>AGAMOUS</i>)	At4g18960	Especificación de los carpelos y estambres; gen homeótico de clase C.
<i>AP3</i> (<i>APETALA3</i>)	At3g54340	Especificación de pétalos y estambres; gen homeótico de clase B.
<i>PI</i> (<i>PISTILLATA</i>)	At5g20240	Especificación de pétalos y estambres; gen homeótico de clase B.



<i>SEPI-4 (AGL2, AGL3, AGL4 y AGL9)</i> (<i>SEPALLATA1-4</i>)	At5g15800, At2g03710, At1g24260, At3g02310	Especificación de sépalos, pétalos, estambres y carpelos; Genes homeóticos de clase E.
<i>AGL23</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 23</i>)	At1g65360	Desarrollo del saco embrionario.
<i>DIA (AGL61)</i> <i>DIANA (AGAMOUS-LIKE 61)</i>	At2g24840	Desarrollo de la célula central y endospermo.
<i>AGL62</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 62</i>)	At5g60440	Desarrollo de la célula central.
<i>AGL80</i> (<i>AGAMOUS-LIKE 80</i>)	At5g48670	Desarrollo de la célula central y endospermo.
<i>ABS (AGL32)</i> (<i>ARABIDOPSIS BSISTER</i>) (<i>AGAMOUS-LIKE 32</i>)	At5g23260	Pigmentación de la semilla y desarrollo del endotelio.
<i>GOA (AGL63)</i> (<i>GORDITA</i>) (<i>AGAMOUS-LIKE 63</i>)	At1g31140	Desarrollo del fruto.
<i>PHE1 (AGL37)</i> <i>PHERESI (AGAMOUS-LIKE 37)</i>	At1g65330	Desarrollo de la semilla.




Tabla 5

Jardín botánico	Latitud y Longitud (DD)	Mapa (Capturas de pantalla de <i>Google Maps</i>)
<p><i>Rey Netzahualcóyotl</i> <i>UAA,</i> <i>Aguascalientes, Ags.</i></p>	<p>Punto 1: 21.91318, -102.32076</p>	
	<p>Punto 2: 21.91122, -102.32053</p>	
	<p>Punto 3: 21.91163, -102.31822</p>	
	<p>Punto 4: 21.91217, -102.31840</p>	
<p><i>Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR),</i> <i>Cd. del Carmen,</i> <i>Campeche.</i></p>	<p>Punto 1: 18.63735, -91.78681</p>	
	<p>Punto 2: . 18.63448, -91.78435</p>	
	<p>Punto 3: 18.63567, -91.77759</p>	
	<p>Punto 4: . 18.63726, -91.77852</p>	
<p><i>Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. de México.</i></p>	<p>Punto 1: 19.31400, -99.19964</p>	
	<p>Punto 2: 19.31031, -99.18710</p>	
	<p>Punto 3: 19.32276, -99.18975</p>	
	<p>Punto 4: 19.32256, -99.19467</p>	




<p><i>Benjamin Francis Johnston, Los Mochis, Sinaloa.</i></p>	Punto 1: 25.79180, -109.00491	
	Punto 2: 25.78871, -109.00139	
	Punto 3: 25.78637, -109.00638	
	Punto 4: 25.78741, -109.00814	
<p><i>Tizatlán, Santa María Ixtulco, Tlaxcala.</i></p>	Punto 1: 19.33036, -98.21996	
	Punto 2: 19.32893, -98.21769	
	Punto 3: 19.33099, -98.21468	
	Punto 4: 19.33260, -98.21376	
<p><i>Universidad Autónoma de Tlaxcala (UATx), . 515625Tlaxcala de Xicohténcatl, Tlaxcala.</i></p>	Punto 1: 19.30253, -98.24345	
	Punto 2: 19.30170, -98.24522	
	Punto 3: 19.30018, -98.24346	
	Punto 4: 19.30150, -98.24278	

<p><i>Etnobotánico de Oaxaca, Oaxaca de Juárez, Oaxaca.</i></p>	<p>Punto 1: 17.06754, -96.72334</p>	
	<p>Punto 2: 17.06723, -96.72155</p>	
	<p>Punto 3: 17.06551, -96.72195</p>	
	<p>Punto 4: 17.06690, -96.72345</p>	
<p><i>Regional de Cadereyta, Queretaro, Cadereyta de Montes, Queretaro.</i></p>	<p>Punto 1: 20.68858, -99.80699</p>	
	<p>Punto 2: 20.68634, -99.80529</p>	
	<p>Punto 3: 20.68453, -99.80336</p>	
	<p>Punto 4: 20.68665, -99.80321</p>	
<p><i>Dr. Alfredo Barrera Marín, Puerto Morelos, Quinta Roo.</i></p>	<p>Punto 1: 20.84882, -86.90138</p>	
	<p>Punto 2: 20.84841, -86.89816</p>	
	<p>Punto 3: 20.84030, -86.90344</p>	
	<p>Punto 4: 20.83786, -86.90972</p>	

<p><i>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Puebla, Puebla.</i></p>	Punto 1: 19.00173, -98.19996	
	Punto 2: 19.00001, -98.19462	
	Punto 3: 18.99832, -98.19558	
	Punto 4: 19.00064, -98.20080	
<p><i>Etnobotánico Francisco Peláez Roldan, Cholula, Puebla.</i></p>	Punto 1: 19.04270, -98.30156	
	Punto 2: 19.04299, -98.30136	
	Punto 3: 19.04233, -98.30027	
	Punto 4: 19.04203, -98.30048	
<p><i>Helia Bravo Hollis, Zapotitlán Salinas, Puebla.</i></p>	Punto 1: 18.33391, -97.45968	
	Punto 2: 18.33007, -97.45912	
	Punto 3: 18.33047, -97.45549	
	Punto 4: 18.33413, -97.45841	

<p><i>Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG), Zapopan, Jalisco.</i></p>	<p>Punto 1: 20.69250, -103.41919</p>	
	<p>Punto 2: 20.69130, -103.41933</p>	
	<p>Punto 3: 20.69015, -103.41740</p>	
	<p>Punto 4: 20.69186, -103.41631</p>	
<p><i>Vallarta, Cabo Corrientes, Jalisco.</i></p>	<p>Punto 1: 20.46534, -105.29341</p>	
	<p>Punto 2: 20.46669, -105.29276</p>	
	<p>Punto 3: 20.46561, -105.29185</p>	
	<p>Punto 4: 20.46668, -105.29268</p>	
<p><i>Etnobótico La Casa del Olindo, Cuernavaca, Morelos.</i></p>	<p>Punto 1: 18.90919, -99.22487</p>	
	<p>Punto 2: 18.90907, -99.22366</p>	
	<p>Punto 3: 18.90779, -99.22515</p>	
	<p>Punto 4: 18.90753, -99.22365</p>	

<p><i>Bosque de Chapultepec, Cd. de México</i></p>	<p>Punto 1: 19.42157, -99.18414</p>	
	<p>Punto 2: 19.42441, -99.18472</p>	
	<p>Punto 3: 19.42377, -99.18056</p>	
	<p>Punto 4: 19.42210, -99.18075</p>	
<p><i>Dr. Faustino Miranda, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.</i></p>	<p>Punto 1: 16.75829, -93.10943</p>	
	<p>Punto 2: 16.75720, -93.10717</p>	
	<p>Punto 3: 16.75964, -93.10610</p>	
	<p>Punto 4: 16.75770, -93.10602</p>	
<p><i>Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro), Chilpancingo de los Bravo, Guerrero.</i></p>	<p>Punto 1: 17.53669, -99.49450</p>	
	<p>Punto 2: 17.53791, -99.49633</p>	
	<p>Punto 3: 17.53834, -99.49431</p>	
	<p>Punto 4: 17.53761, -99.49320</p>	

<p><i>Arqueo-Botánico Anikabil, Merida, Yucatán.</i></p>	<p>Punto 1: 20.99108, -89.69039</p>	
	<p>Punto 2: 20.98885, -89.68232</p>	
	<p>Punto 3: 20.98626, -89.68402</p>	
	<p>Punto 4: 20.98856, -89.68905</p>	
<p><i>De Acanceh y X ka'ansajil, Acanceh, Yucatán.</i></p>	<p>Punto 1: 20.82306, -89.47191</p>	
	<p>Punto 2: 20.82299, -89.46912</p>	
	<p>Punto 3: 20.82023, -89.47004</p>	
	<p>Punto 4: 20.82050, -89.47121</p>	
<p><i>Regional Roger Orellana CICY</i></p>	<p>Punto 1: 21.02984, -89.63857</p>	
	<p>Punto 2: 21.02985, -89.63968</p>	
	<p>Punto 3: 21.02819, -89.63990</p>	
	<p>Punto 4: 21.02811, -89.63871</p>	

<i>Jardín Botánico Cosmovitral</i>	Punto 1: 19.29381, -99.65442	
	Punto 2: 19.29384, -99.65308	
	Punto 3: 19.29332, -99.65304	
	Punto 4: 19.293295, -99.65441	

VII

BIBLIOGRAFÍA

- Athey, J., Alexaki, A., Osipova, E., Rostovtsev, A., Santana-Quintero, L. V., Katneni, U., Simonyan V. & Kimchi-Sarfaty, C. (2017). A new and updated resource for codon usage tables. **BMC Bioinformatics**. 18:391.
- Avery, D., MacLeod, C. & McCarthy, M. (1944). Studies on the chemical nature of the substance inducing transformation of pneumococcal types. Induction of transformation by a deoxyribonucleic acid fraction isolated from pneumococcus type III. **J. Exp.Med.** 79:137-157.
- Bernardini, N. & De Poli, G. (2007). The sound and music computing field: present and future. **Journal of New Music Research**: 36(3), 143 – 148.
- Berry, MD. (2011). **The Philosophy of Software. Code and Mediation in the Digital Age**. London, UK: palgrave macmillan.
- Caballero, J. (2012). **Jardines Botánicos - contribución a la conservación vegetal de México**. [Eds.]. México: impresora apolo, S.A. de C.V.
- Carlile, S. (2011). **Psychoacoustics**. En: T. Hermann, A. Hunt & J. G. Neuhoff, The Handbook Sonification, [Eds.]. Berlin: Logos Verlag.
- Chapman, O. & Sawchuk, K. (2012). Research-Creation: Intervention, Analysis and “Family Resemblances”. **Canadian Journal of Communication**, 37: 5-26.
- Hermann, T. & Hunt, A. (2011). **Interactive Sonification**. En: T. Hermann, A. Hunt & J. G. Neuhoff, The Handbook Sonification, [Eds.]. Berlin: Logos Verlag.
- Hermann, T., Hunt, A. & Neuhoff, J. G. (2011). **The sonification handbook**. [Eds.]. Berlin, Logos Verlag.
- Horton, H. R., Moran, L. A., Scrimgeour, K. G., Perry, M. D. & Rawn, J. D. (2008). **Principios de bioquímica**. [4° Ed.]. México: Pearson Educación.
- Krygier, J. (1994). **Sound and Geographic Visualization**. En Visualization in modern cartography, por A. M. MacEachren & D. R. F. Taylor. Oxford, U.K., New York: Pergamon.

- Lara, R. F. (2017). **Aplicaciones de las ciencias de la complejidad al diagnóstico e intervención en problemas sociales**. [1° Ed.]. México. Colofón Ediciones Académicas.
- Lara, R. F., Gallardo, A. & Almaza, S.I. (2017). **Teorías, métodos y modelos para la complejidad social**. [1° Ed.]. México. Colofón Ediciones Académicas.
- Maldonado C. & Gómez N. (2010). **El mundo de las ciencias de la complejidad**. Bogotá D. C.: Universidad del Rosario.
- Márquez, J., Collazo, M., Martínez, M., Orozco, A. & Vázquez, S. (2013). **Biología de angiospermas**. [1° Ed.]. México: UNAM, Facultad de Ciencias: Coordinación de la Investigación Científica.
- Morín, E. (1977). **El método I**. [6° Ed.] España: Cátedra, Teorema.
- Neuhoff, J. G. (2011). **Perception, Cognition and Action in Auditory Displays**. En: T. Hermann, A. Hunt & J. G. Neuhoff, *The Handbook Sonification*, [Eds.]. Berlin: Logos Verlag.
- Niculescu, B. (2006). **Heisenberg and the levels of reality**. *Eur. J. Sci. Theol.*
- Ohno, S. & Ohno, M. (1986). The All Pervasive Principle of Repetitious Recurrence Governs Not Only Coding Sequence Construction But Also Human Endeavor in Musical Composition. **Immunogenetics**, 24: 71-78.
- Roads, C. (1995). **The Computer Music Tutorial**. [Eds.]. USA: MIT Press Cambridge.
- Rutherford, E. & Geiger, H. (1908). **An electrical method of counting the number of α -particles from radioactive substances**. University of Manchester.
- Salazar, A., Liu, B., Doughty, P., Lewis, RA., Ghosh, S., Parsy, ML., Simpson, PJ., O'Dwyer, K., Matthews, SJ. & Paget MS. (2013) The actinobacterial transcription factor RbpA binds to the principal sigma subunit of RNA polymerase. **Nucleic Acids Res**, 41: 5679–5691.
- Sánchez, S., Baquero, F., & Nombela, C. (2005). The making of the Genoma Music. **Rev Iberoam Micol**, 22: 242-248.
- Serafin, S., Franinovic, K., Hermann, T., Lemaitre, G., Rinott, M. and Rocchesso, D. (2011). **Sonic Interaction Design**. En: T. Hermann, A. Hunt & J. G. Neuhoff, *The Handbook Sonification*, [Eds.]. Berlin: Logos Verlag.
- Smaczniak, C., Immink, R. G. H., Angenent, G. C. & Kaufmann, K. (2012). Developmental and evolutionary diversity of plant MADS- domain factors: insights from recent studies. **Development**, 139: 3081–3098.

Takahashi, R. & Miller, J. (2007). Conversion of amino-acid sequence in proteins to classical music: search for auditory patterns. **Genome Biology**. 8: 405.

Temple, M. D. (2017). An auditory display tool for DNA sequence analysis. **BMC Bioinformatics**. 18: 221.

Thulin, S. (2016) Sound Maps Matter: Expanding Cartophony. **Social & Cultural Geography**: 19(2): 192-210.

Widmer, G., Rocchesso, D., Välimäki, V., Erkut, C., Gouyon, F., Pressnitzer, D. & Volpe, G. (2007). Sound and music computing: Research trends and some key issues. **Journal of New Music Research**. 36(3): 169-184.

Yu, C. H., Qin, Z., Martin-Martinez, F. J. & Buehler, M. J. (2019). A Self-Consistent Sonification Method to Translate Amino Acid Sequences into Musical Compositions and Application in Protein Design using Artificial Intelligence. **ACS Nano**. 13(7):7471-7482.

Páginas Web

“**Pulsu(m) Plantae**”, disponible en: <http://lessnullvoid.cc/pulsum/>

“*trees: Pinus sylvestris*”, disponible en: <https://www.researchcatalogue.net/view/215961/215962>

Conference on Auditory Display. (1997). **Sonification Report: Status of the Field and Research Agenda**, disponible en: <http://www.icad.org/websiteV2.0/References/nsf.html>

Estudio Biopus, disponible en: <http://www.estudiobiopus.com.ar/estudio/>

Estudio Kual, disponible en: <https://www.kualistudio.com.mx/>

Foro Sonifyer, disponible en: <http://www.sonifyer.org/>

Miebach, N. (2011). **Art Made of storms**. Charla TED-talk, disponible en: https://www.ted.com/talks/nathalie_miebach

National Center for Biotechnology Information, disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>

Neely, A. (2017). **Loop - New horizons in Music: Polyrhythms**. Charla TED-talk, disponible en: <https://youtu.be/JiNKlhspdKg>

Rex D. F. (1998). **Point-In-Polygon Algorithm**, disponible en: <http://alienryderflex.com/polygon/>

GenScript, disponible en: <https://www.genscript.com/tools/codon-frequency-table>