Landscape Design Methodology: Pattern Formation Through the Use of Cellular Automata

SERGI ABELLÁN SANFÉLIX
MARCEL BILURBINA CAMPS
MARILENA CHRISTODOULOU
AE Land

KEYWORDS
Cellular Automaton, Digital Landscape Architecture,
Algorithmic Design, Community Dynamics, Digital
Ecosystem.

HOW TO CITE
Abellán Sanfélix, Sergi, Marcel Bilurbina Camps and
Marilena Christodoulou. 2019. “Landscape Design
Methodology: Pattern formation through the use of
Cellular Automatas”. *Temes de Disseny* 35: 26-41.

The purpose of this study is to develop a landscape design methodology based on the use of a Cellular Automaton (CA) algorithm in order to introduce the plant-plant interaction factor in the plantating design of a site. This design methodology introduces the relationships between neighboring individuals of different species as parameters for the project. These parameters are codified in order to define the Cellular Automaton rules. Parameters related to the growth and morphologic characteristics of the species as well as programmatic and aesthetic parameters of the project may be introduced as rules that influence the behavior of the CA algorithm.

The algorithm developed is called NNB-CA (Natural Neighbouring Behaviour Cellular Automata) and it is based on John Conway’s original “Game of Life” CA. The design methodology takes in account site conditions and is developed in two phases. In the first one, starting with a list of species, a preselection of species is done taking into account the site’s parameters and it defines which species are able to populate on each area of the discretized site. In the second phase, the CA algorithm is run applying the relational rules with the selected species. This iterative process is applied until it reaches an equilibrium state.

Rules related to the competition between species according to their growing characteristics are studied comparing an analog/natural evolutive process using rapidly developing plants and the corresponding digital process that simulates the analog one.

1 INTRODUCTION

Plants, and living organisms in general, can be thought of as systems that can obtain their complex forms and patterns of behavior by interacting in space and time within their individual components (Weinstock 2010). Complex systems, like plants, are driven by the laws of self-organization. The agents of these systems, by following simple local rules, interact with each other and with their collective behavior; they are able to adapt to the environment and evolve (Johnson 2002). Evidently, the growth of these systems and, in this case, the growth of the plants, depends on different factors. The first one, of course, is the climate, although no less important is the substrate on which they will develop, the availability of nutrients, or, in the case of gardens or parks, irrigation.

However, another crucial factor is competition between the different specimens or between different species. For example, shade projected by a large tree will prevent many species from developing, absent which, taking into account the other factors, they could live there. At the same

time, a plant that has been growing in one place for a while may end up being displaced by another, either due to the latter’s faster development or because it alters the conditions of the habitat, competing more aggressively for resources or directly suffocating the former with its growth.

When planning the planting of a green space, the aforementioned factors are taken into account, even though the role of competition between species is vaguely addressed. An approximate future development diameter is established for the trees, some zones are planted with shrubs, perennials, or caespitose plants. This zoning is done randomly, based on design criteria that avoid considering the way that different species interact with each other and that are based on the assumption that each species will remain in place.

The design methodology proposed aims to solve the arrangement of the species by considering the relationship each individual has with its closest neighbors. The relationship between each species and the others is established, parameterized, and codified comparing its growth and morphologic characteristics. After that, an iterative process runs that starts defining a matrix of cells/individuals occupying the area to plant and associating one species to each cell/individual randomly.

Once the first population is defined, the number of each cell’s immediate neighbors is recursively calculated and replaced by a new species depending on its neighbors. This iterative process is applied until it reaches an equilibrium, and the state/species of each cell becomes stable. The algorithm applied is an implementation of the “Game of Life” Cellular Automaton (CA) defined by John Horton Conway in which rules are based on the Natural Neighbouring Behaviour (NNB-CA) of the species.

2
NATURAL NEIGHBOURING BEHAVIOUR CELLULAR
AUTOMATON – DESIGN METHODOLOGY

The design methodology uses Processing, an open source graphical library and an IDE that uses Java language, as the main engine to run the Cellular Automaton, as well as CAD and GIS software to extract data from the site.

2.1 Steps of the design process
2.1.1 Initial selection of species and evaluation according to the site evaluation parameters:
A list with the desired species to work with is defined and each species is evaluated according to the different parameters of the site analyzed (Fig. 1).
The site parameters analyzed may vary in terms of topography (altitude, slope, orientation, curvature, etc.), climate (sun radiation, wind, etc.), soil characteristics, geometry (proximity to certain places, etc.), or any other data that can be parameterized.
An .XLS file is created introducing the evaluation/characteristics of each species related to each of the parameters analyzed. This file is imported as an XML (Extensible Mark-up Language) file in order to have access to this data. Data from site is acquired using CAD/GIS software and it starts with the discretization of the site. The site is divided into an array of square Cells (the size of the cells is the same for the entire design process). Each Cell is then evaluated according to the same analyzed parameter and a numerical value is associated to each cell for each parameter (Fig. 2). The numer-

Fig. 1. Initial species selection and codification. More species were analyzed.

ical values related to one parameter are called “layers of information”. An .XML file is created for each layer of information.

2.1.2 Preselection of species according to the parameters analyzed:
The site is imported to Processing in SVG file format and subdivided into square Cells, with the same resolution as the analyzed site files.
The layers of data analysis is imported to Processing, parsing the different XML files.

Cells are populated with species using the following process:
› For each Cell and for each layer of information: check which species satisfies the values of all analyzed parameters (Fig. 3).
› Populate each Cell with a list of the species that satisfies the analyzed parameters.
› The resulting matrix is an array of species lists, with one list per cell, in which each cell has a dimension that corresponds to the number of species that satisfies all analyzed parameters.

2.1.3 CA rules definition
CAs are algorithmic models that use computation to iterate with very simple rules. While iterating, these simple rules can create complex, emerging phenomena through the interaction between agents as they evolve over time. The NNB-CA is based on Conway's “Game of Life” CA algorithm.
The main goal of NNB-CA implementation in design methodology is to introduce the relationship between neighboring individuals as a project strategy. The relationship between each species and the others is established, parameterized, and codified according to different relational parameters, defining the behavior rules of the CA (Fig. 4).

Features of the Natural Neighbouring Behaviour CA vs “Game of Life” CA.

	GOL-CA	NNB-CA
Discretization:	square cells	square cells
Neighbours:	8	8
States:	2	As many as pre-selected species
Values:	0 (dead) / 1 (alive)	ID corresponding to the species

Fig. 2. Example: Site evaluation. Layer of information

Position 4,5:

ID	Sun Exp.	Wind	Altitude	...
0	⊗	⊗	⊗	
1	⊗	⊗	⊗	
2		⊗	⊗	
3	⊗	⊗	⊗	
4	⊗	⊗		
5		⊗	⊗	
6		⊗	⊗	
7	⊗	⊗	⊗	
8	⊗		⊗	
9				
...				

Fig. 3. Example: Preselection of species

Relational parameters implemented in the NNB-CA refer to growth characteristics and species competition, aesthetical criteria, and programmatic project needs.
Rules based on competition between individuals are established. For example, the height of the species and their horizontal development are evaluated because some species extend as ground covers until they encounter a taller species or another competing creeping species that limits their development. Another example is large groups of certain species that may be more prone to plagues caused by overcrowding than small groups. Therefore, a limit to the number of individuals in each group is established to avoid such problems.
Rules based on programmatic or aesthetic criteria may also be applied, for example if it is preferable to have an aromatic species close to a path or if two species do not fit together side by side in a color scheme but match if there is another species between them.
Other rules based on the relative position between species may be defined following the same logic in order to introduce the effect of shade between species, depending on their height and orientation.
2.1.4 CA implementation
Initial random population. Having the site divided in cells and a list of possible species per each cell according to the pre-selection, an initial random population is created. Each cell has one only random species associated.
Iterative process. The following procedure runs, following the next steps:
› Calculate the number of immediate neighbours of each species each cell has.
› Rules application. Each cell is evaluated according to the immediate neighbours following the defined rules. After this evaluation Cells may vary their state or not.
› Generations. Each evaluation process for the whole array of cells corresponds to a new generation and its executed iteratively.
› Iteration condition. This iterative process is applied until it reaches to an equilibrium state, and the state/species of each cell doesn't change.
Equilibrium state. When the iterative process becomes invariant all the conditions established by the substitution rules are true. The equilibrium state corresponds to the most efficient organization in terms of plant-plant interaction.

2.1.5 Output result
The final distribution of species fulfils all the defined conditions in both parts of the design process, when it fits with the analyzed conditions of the site, when the relation between species is stable according to its natural behavior and when it fits to the aesthetics and the introduced programmatic neighbouring rules.

The study of the codification of the relationship between species according to their growth characteristics is carried out by comparing an analog/natural evolutive process using rapidly developing plants and the corresponding digital process that simulates the analog one.

By studying the growth of three floating water plants the aim is to prove that the interaction of the three species generates a recognizable pattern (Camazine, De-neubourg, Franks, Sneyd, Theraula and Bonabeau 2001), that the difference of the growth characteristics between species can be codified and parameterized digitally, and that the pattern of the plants that has been generated naturally coincides with the digital simulation implemented using the Cellular Automaton algorithm.

The analog/digital comparison seeks to demonstrate if it is possible to establish a digital model that is similar to the development of a series of species. To evaluate this, we propose using three species (Fig. 5) of rapidly developing floating plants, and the establishment in parallel of a digital model with a series of simple rules in the plant-plant and plant-environment relationship (Higgins and Richardson, 1996).

The conditional rules in the CA are established in relation to the competition for space and the manner in which these species develop, bearing in mind that all three present a similar growth rate that is primarily influenced by the available space and their capacity or inability to replace the specimens that are around each individual. The three species used are *Lemna minor*, *Azolla cristata*, and *Spirodela polyrrhiza*, all three with a size ranging from 0.5 to 1 cm per specimen. The installation is formed by three containers with the same characteristics: square containers 40x40 cm in size (Fig. 6). The density of the population is 100% from the beginning of the experiment to enable the relationships between the species to be directly assessed in terms of inter and intraspecific competition. The initial proportion of individuals of each species is 1/3 and they are introduced randomly, just as the digital model starts from a random arrangement. The culture conditions for the three containers are identical. As such, the results obtained from the three samples are equally representative.

The digital model was implemented with Processing after their behavior was observed. For example, *Azolla cristata* tends to form large carpets of individuals that remain attached among themselves as the plant grows and multiplies in a dichotomous manner. *Lemna minor* multiplies by dividing into separate individuals, therefore having the tendency to be loose and also leading to the possibility of the plant to fill in the spaces between the other species. *Spirodela polyrrhiza* also multiplies through division, but the individuals, apart from being larger, are more sessile than *Lemna* (Bown, 2000).

Relationships between the three species were taken into account in order to define the rules. *Azolla* tends to dominate *Lemna* and occupy its space. Also, when *Azolla* grows forming large groups, intraspecific competition, par-

Fig. 5. The three species from the analog experiment: *Azolla cristata*, *Lemna minor*, *Spirodela polyrrhiza*

ticularly in environments with scarce phosphorus like used in this experiment, tends to leave empty spaces that can be occupied by other species, especially by *Lemna*. *Spirodela* is relatively unaffected by the development of *Azolla*, and even less so from *Lemna*, but requires more nutrients than the others, particularly *Azolla* which can get nitrogen fixation from the atmosphere thanks to its symbiosis with *Anabaena*. Therefore, the population of *Spirodela* is also limited by intraspecific competition. *Lemna* is the most ubiquitous species. As such, it can occupy large patches and is less affected than the others by intraspecific competition.

The relationship between species has been codified, defining the following rules:

- › If *Azolla* has more than 6 neighbors *Azolla* » *Azolla* becomes *Lemna*, else stays *Azolla*.
- › If *Spirodela* has more than 4 neighbors *Spirodela* » *Spirodela* becomes *Lemna*, else stays *Lemna*.
- › If *Spirodela* has more than 5 neighbors *Azolla* » *Spirodela* becomes *Azolla*, else stays *Spirodela*.

Fig. 4. NNB-CA. Evolution in a site with 11x11 cells with three states (species).
↖ Generation = t
↗ Generation = t+1
← Generation = t+2
→ Generation = t+3
↘ Generation = t+4

Fig. 6. Image of the analog experiment

In order to obtain conclusions from the analog experiment the images have been digitally processed, grouping the different species and enabling the comparison with the digital model (Figs. 7 and 8)

4
NNB-CA CASE STUDY

The following case study shows the implementation of the design methodology in which the Natural Neighbouring Behaviour CA was implemented. Only relational rules have been introduced, considering that the site parameters are the same for all the individuals. Pre-existing species have been loaded in the SVG site file and are colored in light and dark green in the Processing interface. Both species interact with the new species but do not change because the goal it is to get the ideal new planting adapted to the pre-existing species.

In this habitat there are two principal species, rosemary and juniper. The objectives of the new planting are mainly to preserve the existing vegetation and to include new species that do not outcompete them but are useful in adding interest to the garden and a covering for the altered soil. Also, apart from these premises, some existing species, like juniper, are very slow growers and difficult to settle after planting.

The planting consists of five species, well adapted to growing in these conditions. These species show a faster growth rate than the existing species but also have some characteristics to be taken into account. The proposed species are prostrate rosemary, westringia, pistacia, artemisia, and sage. Artemisia and sage, for example, are plants that lose a lot of leaves in winter and need to be pruned to a low height leaving empty spaces in the garden. Therefore, in order to maintain year-round interest in the garden, it is preferable to avoid using these species side by side.

On the other hand, sage competes heavily with and can outgrow pre-existing rosemary and it is not advisable to plant sage nearby. *Artemisia* grows in the summer to such an extent that it can compete with the juniper. As such, it is also inadvisable to plant artemisia near existing juniper.

The preexisting species (Fig. 9) are *Rosmarinus officinalis* (colored in light green in the Processing interface) and *Juniperus phoenicea* (colored in dark green in the Processing interface).

The new planting species (Figs. 10 and 11) are prostrate rosemary (*Rosmarinus officinalis prostratus*), westrin-

gia (*Westringia fruticosa*), pistacia (*Pistacia lentiscus*), sage (*Salvia officinalis*), and artemisia (*Artemisia* "Powis Castle").

The relationship between species has been codified defining some rules. For example, next to pre-existing *Rosmarinus officinalis*, only *Artemisia* plants can be planted. Next to pre-existing *Juniperus phoenicea*, only *Salvia* plants can be planted. *Artemisia* and *Salvia* cannot be planted side by side. The rest of the species have a relationship of simple dominance between them: one species is substituted by a second one if the latter's number of neighbors is bigger than the former's number of neighbors.

5
CONCLUSIONS

By starting the analog experiment with three different random initial situations with the same environmental conditions, we were able to verify the formation of the same pattern in the three containers. Growing them under the

Fig. 7. Image from the analog experiment series, the upper images are from the beginning of the experiment, the bottom images are the groups formed two months later.

Fig. 8. Digital simulation (Processing Java). From left to right: 1st random generation, 2nd generation, and 30th generation.

		Fig. 09	Fig. 10	Fig. 11
Total population		8252	8252	8252
Generations		1	2	15
Evolving Species		5	5	5
Preexisting species		2	2	2
Individuals	- Rosmarinus officinalis prostratus - Westringia fruticosa - Pistacia lentiscus - Salvia officinalis - Artemisia 'Powis Castle' - Rosmarinus officinalis - Juniperus phoenicea	1981 1590 1751 869 827 preexisting preexisting	2211 1751 1902 599 533 preexisting preexisting	2404 1855 1951 404 293 preexisting preexisting

↑↑↑ Table 1. Figs. 9, 10 and 11 legend.
↑↑ Fig. 9. Natural Neighbouring Behaviour CA
↑ Fig. 10. NNB-CA. Processing implementation. 2nd generation
← Fig. 11. NNB-CA. Processing implementation. 15th generation

El objetivo de este estudio consiste en desarrollar una metodología de di-
seño de paisaje utilizando un algoritmo de autómatas celular que permita
introducir el factor de interacción planta-planta en el diseño de una plan-
tación. Esa metodología de diseño introduce las relaciones entre individuos
contiguos o especies diferentes contiguas como parámetros del proyecto.
Dichos parámetros se codifican para definir las reglas del autómata celular.
Los parámetros relativos al crecimiento y las características morfológicas
de las especies así como los parámetros programáticos y estéticos del pro-
yecto pueden ser reglas que influyen en el comportamiento del algoritmo
del autómata celular.

El algoritmo desarrollado se denomina autómata celular de com-
portamiento natural de vecindad (Natural Neighbouring Behaviour Cellu-
lar Automata, NNB-CA) y se basa en el autómata celular llamado ‘Juego
de la Vida’, original de John Conway. Esta metodología de diseño tiene en
cuenta las condiciones del lugar y se aplica en dos fases. En la primera,
que empieza con una lista de especies, se lleva a cabo una preselección de
especies en función de los parámetros del lugar. A continuación se deter-
mina qué especies pueden poblar cada parte de la zona discretizada. En
la segunda fase se ejecuta el algoritmo del autómata celular aplicando las
reglas relacionales a las especies seleccionadas. Este proceso iterativo se
aplica hasta que se logra un equilibrio.

Las reglas relacionadas con la competencia entre especies en
función de sus características de crecimiento se estudian comparando un
proceso evolutivo analógico/natural mediante plantas de desarrollo rápido
y el correspondiente proceso digital que simula el analógico.

Se puede considerar a las plantas, y a los organismos vivos en general, como
sistemas que pueden obtener sus formas y patrones complejos interactuan-
do en el espacio y el tiempo en el ámbito de sus componentes individuales
(Weinstock 2010). Los sistemas complejos, como las plantas, se rigen por
las leyes de la autoorganización. Los agentes de estos sistemas, siguien-
do sencillas reglas locales, interactúan entre sí y con su comportamiento
colectivo pueden adaptarse al entorno y evolucionar (Johnson 2002). Evi-

dentemente, el crecimiento de estos sistemas y, en este caso, el crecimiento
de las plantas, depende de varios factores. El primero, por supuesto, es el
clima, aunque no menos importante es el sustrato en el que crecen, la dis-
ponibilidad de nutrientes o, en el caso de jardines y parques, la irrigación.

Sin embargo, otro factor crucial es la competencia entre distin-
tos especímenes o entre distintas especies. Por ejemplo, la sombra de un
árbol grande impide que crezcan muchas especies que, de no estar allí
el árbol, y teniendo en cuenta los demás factores, podrían prosperar. Al
mismo tiempo, una planta que haya estado creciendo en un lugar durante
un tiempo puede terminar viéndose desplazada por otra, bien porque esta
se desarrolla más rápidamente, bien porque modifica las condiciones del
hábitat, compitiendo más agresivamente por los recursos o directamente
ahogando a aquella con su crecimiento.

La planificación de la siembra de un espacio verde tiene en cuenta
los factores anteriores, aunque se presta poca atención al papel que tiene
la competencia entre especies. Se fija un diámetro de futuro crecimiento
aproximado para los árboles, mientras que en algunas zonas se plantan
arbustos, árboles perennes o plantas cespitosas. Esta zonificación se hace
de manera aleatoria, en función de criterios de diseño que no tienen en
cuenta cómo interactúan entre sí las distintas especies y que se basan en
la idea de que cada especie permanecerá allí donde la colocan.

La metodología de diseño que proponemos quiere ofrecer una so-
lución a la disposición de las especies teniendo en cuenta las relaciones
que tiene cada espécimen con sus vecinos más cercanos. Para lograrlo
se determina, parametriza y codifica la relación entre cada especie y las
demás, comparando su crecimiento y sus características morfológicas. A
continuación, se aplica un proceso iterativo que empieza definiendo una
matriz de celdas/individuos que ocupan el área que se va a plantar y aso-
ciando una especie a cada celda/individuo aleatoriamente.

Cuando ya se ha definido la primera población, se calcula recursi-
vamente el número de los vecinos inmediatos de cada celda y se sustituye
por una nueva especie en función de sus vecinos.

Este proceso iterativo se aplica hasta que se logra un equilibrio y
el estado/especie de cada celda permanece estable. El algoritmo aplicado
es una implementación del autómata celular ‘Juego de la vida’ ideado por
John Horton Conway, en el que las reglas se basan en el comportamiento
natural de vecindad (NNB-CA) de las especies.

Esta metodología de diseño utiliza Processing, una biblioteca gráfica de
código abierto, y un IDE que utiliza lenguaje Java para ejecutar el autóma-
ta celular, así como CAD y un programa de SIG (sistema de información
geográfica) para extraer datos del emplazamiento..

2.1 Pasos del proceso de diseño

2.1.1 Selección inicial de especies y evaluación según los parámetros de evaluación del emplazamiento

Se crea una lista con las especies con las que se quiere trabajar y se evalúa
cada especie en función de los distintos parámetros del emplaza-
miento analizado (Fig. 1).

Los parámetros del emplazamiento analizado pueden variar en aspectos de
topografía (altitud, pendiente, orientación, curvatura, etc.), clima
(radiación solar, viento, etc.), características del suelo, geometría
(proximidad a determinados lugares, etc.) o cualquier otro dato
que se pueda parametrizar.

Se crea un archivo XLS con las evaluaciones/características de cada es-
pecie en relación a cada uno de los parámetros analizados. Este
se importa como archivo xml para poder acceder a los datos. Los
datos del emplazamiento se obtienen con programas de CAD/SIG
y empieza la discretización del emplazamiento. El emplazamiento
se divide en una matriz de celdas cuadradas (el tamaño de la celda
es el mismo a lo largo de todo el proceso de diseño). Cada celda se
evalúa en función del mismo parámetro analizado y se asocia un
valor numérico a cada celda para cada parámetro (Fig. 2). Los
valores numéricos relacionados con un parámetro se denominan
capas de información. Se crea un archivo xml para cada capa de
información.

2.1.2 Preselección de especies según los parámetros analizados

El emplazamiento se importa a Processing en formato svg y se divide en
celdas cuadradas, con la misma resolución que los archivos de
emplazamiento analizados.

Las capas de análisis de datos se importan a Processing, que compila los
distintos archivos xml.

Se ocupan las celdas con especies según el proceso siguiente:

› En cada celda y en cada capa de información: comprobar qué especies
cumplen los valores de todos los parámetros analizados (Fig. 3).

› Ocupar cada celda con una lista de las especies que cumplen los pará-
metros analizados.

› La matriz resultante es un conjunto de listas de especies, con una lista
por celda, y cada celda tiene una dimensión que se corresponde
con el número de especies que cumplen los parámetros analiza-
dos.

2.1.3 Definición de reglas del autómata celular

Los autómatas celulares son modelos de algoritmos que utilizan la com-
putación para hacer iteraciones de reglas muy simples. En el pro-
ceso de iteración, estas simples reglas pueden crear fenómenos
complejos por la interacción entre agentes a medida que evolucio-
nan con el paso del tiempo. El NNB-CA se basa en el algoritmo de
autómata celular del ‘Juego de la vida’ de Conway.

El principal objetivo que se persigue implementando NNB-CA a la meto-
dología de diseño es presentar la relación entre individuos con-
tiguos como una estrategia de proyecto. Para lograrlo se deter-
mina, parametriza y codifica la relación entre cada especie y las
demás, en función de distintos parámetros relacionales, y se de-
finen las reglas de comportamiento del autómata celular (Fig. 4).

Comparativa de características del autómata celular de comportamiento
natural de vecindad (NNB-CA) y del autómata del ‘Juego de la
vida’ (GOL-CA).

	GOL-CA	NNB-CA
Discretización:	celdas cuadradas	celdas cuadradas
Vecinos:	8	8
Estados:	2	Tantos como especies preseleccionadas
Valores:	0 (muerto)/1 (vivo)	ID correspondiente a la especie

Los parámetros relacionales aplicados al NNB-CA hacen referencia a las
características de crecimiento, a la competencia entre especies,
a criterios estéticos y a necesidades programáticas del proyecto.

Se establecen reglas basadas en la competencia entre individuos. Por
ejemplo, se evalúa la altura de las especies y su desarrollo hori-
zontal porque algunas especies se extienden cubriendo el suelo
hasta que encuentran especies más altas u otra especie rastrera
competidora que frena su desarrollo. Otro ejemplo son los grupos
grandes de ciertas especies que pueden ser más propensos a las
plagas provocadas por la superpoblación que los grupos peque-
ños. Para evitar dichos problemas se establece un límite de indi-
viduos en cada grupo.

También se pueden aplicar reglas basadas en criterios programáticos o
estéticos. Por ejemplo, si es preferible poner especies aromáticas
cerca de un camino o si los colores de dos especies no combinan
bien juntos pero sí encajan con otra especie en medio.

Siguiendo la misma lógica se pueden definir otras reglas basadas en la
posición relativa entre especies para introducir sombras entre
especies, en función de su altura y orientación.

2.1.4 Implementación del autómata celular

Población aleatoria inicial. Una vez dividido el emplazamiento en celdas y
elaborada una lista de posibles especies para cada celda en fun-
ción de la preselección, se crea una población aleatoria inicial.
Cada celda tiene solo una especie aleatoria asociada.

Proceso iterativo. Se ejecuta el procedimiento siguiente aplicando los pa-
sos que figuran a continuación:

Iterative process. The following procedure runs, following the next steps:

› Calcular el número de vecinos inmediatos de cada especie que tiene
cada celda.

› Aplicación de las reglas. Cada celda se evalúa en función de los vecinos
inmediatos siguiendo las reglas definidas. Tras la evaluación, el
estado de las celdas puede variar o no.

› Generaciones. Cada proceso de evaluación de todo el conjunto de celdas
corresponde a una nueva generación y se ejecuta iterativamente.

› Condición de iteración. Este proceso iterativo se aplica hasta que se lo-
gra un estado de equilibrio y el estado/especie de cada celda no
cambia.

Estado de equilibrio. Cuando el proceso iterativo deja de provocar variacio-
nes, todas las condiciones provocadas por las reglas de sustitución
son ciertas. El estado de equilibrio corresponde a la organización
más eficaz en cuanto a interacción planta-planta.

2.1.5 Resultado obtenido

La distribución final de las especies cumple todas las condiciones definidas
en ambas partes del proceso de diseño cuando satisface las condi-
ciones analizadas del emplazamiento, cuando las relaciones entre
especies son estables basándose en su comportamiento natural y
cuando satisface las reglas de vecindad programática introducidas
y las reglas estéticas.

El estudio de la codificación de las relaciones entre especies en función de
sus características de crecimiento se lleva a cabo comparando un proce-
so evolutivo analógico/natural mediante plantas de desarrollo rápido y el
correspondiente proceso digital que simula el analógico.

El estudio del crecimiento de tres plantas flotantes quiere demos-
trar que la interacción de las tres especies genera un patrón reconocible
(Camazine, Deneubourg, Franks, Sneyd, Theraula y Bonabeau 2001), que
las diferencias en el crecimiento entre especies se pueden codificar y pa-
rametrizar digitalmente y que el patrón de plantas que se ha generado
coincide de manera natural con la simulación digital creada con el algo-
ritmo del autómata celular.

La comparación entre analógico y digital quiere mostrar si es po-
sible crear un modelo digital que sea parecido al desarrollo de una serie de
especies. Para comprobarlo proponemos utilizar tres especies (Fig. 5) de
plantas flotantes de rápida evolución, y crear en paralelo un modelo digital
con una serie de reglas simples de relaciones planta-planta y planta-entor-
no (Higgins y Richardson 1996).

Las reglas condicionales del autómata celular se determinan en re-
lación a la competencia por el espacio y a la manera en la que se desarrollan
las especies, teniendo en cuenta que las tres presentan un índice de cre-
cimiento similar que se ve básicamente influido por el espacio disponible
y por su capacidad o incapacidad de sustituir a los especímenes que hay
alrededor de cada individuo. Las tres especies utilizadas son *Lemna minor*,
Azolla cristata y *Spirodela polyrrhiza*, todas con un tamaño que está entre
0,5 y 1 cm por espécimen. La instalación está compuesta por tres contene-
dores con las mismas características: forma cuadrada de 40x40 cm (Fig.
6). La densidad de población es 100% desde el inicio del experimento para
poder registrar el grado de competición interespecífica e intraespecífica
de las relaciones entre especies. La proporción inicial de individuos de
cada especie es 1/3 y se introducen aleatoriamente, del mismo modo que
el modelo digital empieza con una disposición aleatoria. Las condiciones de
cultivo de los tres contenedores son idénticas. De ese modo los resultados
obtenidos con las tres muestras son igualmente representativos.

El modelo digital se implementó con *Processing* tras observar su
comportamiento. Por ejemplo, la *Azolla cristata* tiende a formar extensas
alfombras de individuos que permanecen unidos entre sí a medida que
la planta crece y se multiplica de manera dicotómica. La *Lemna minor* se
multiplica dividiéndose en individuos independientes, y por tanto tiene ten-
dencia a implantarse de manera aislada. Eso le permite llenar los espacios
que hay entre otras especies. La *Spirodela polyrrhiza* también se multiplica
dividiéndose, pero los individuos, a parte de ser de mayor tamaño, son más
sésiles que la *Lemna* (Bown 2000).

En la definición de las reglas se tuvieron en cuenta las relaciones
entre las tres especies. La *Azolla* tiende a dominar a la *Lemna* y ocupar su
espacio. Por otra parte, cuando la *Azolla* crece formando grandes agrupa-
ciones, competencia intraespecífica, especialmente en entornos con esca-
sez de fósforo como el de este experimento, tiende a dejar espacios vacíos
que pueden ocupar otras especies, especialmente la *Lemna*. La *Spirodela* es
relativamente inmune al desarrollo de la *Azolla*, y aún más al de la *Lemna*,

pero necesita más nutrientes que aquellas, especialmente que la *Azolla*, que puede obtener nitrógeno por la fijación de la atmósfera gracias a su simbiosis con la *Anabaena*. Por tanto, la población de *Spirodela* también se ve limitada por la competencia intraespecífica. La *Lemna* es la especie más extendida. Como tal, puede ocupar grandes espacios y se ve menos afectada que las demás por la competencia intraespecífica.

Las relaciones entre especies se han codificado y han definido las siguientes reglas:

- › Si la *Azolla* tiene más de 6 vecinos, *Azolla* » *Azolla* pasa a ser *Lemna*. De lo contrario, sigue siendo *Azolla*.
- › Si la *Spirodela* tiene más de 4 vecinos, *Spirodela* » *Spirodela* pasa a ser *Lemna*. De lo contrario, sigue siendo *Lemna*.
- › Si la *Spirodela* tiene más de 5 vecinos, *Azolla* » *Spirodela* pasa a ser *Azolla*. De lo contrario, sigue siendo *Spirodela*.

Para sacar conclusiones del experimento analógico se han procesa-do digitalmente las imágenes, agrupando las distintas especies y haciendo la comparación con el modelo digital (Figs. 7 y 8).

4 ESTUDIO DE CASO DEL NNB-CA

El siguiente estudio de caso muestra la implementación de la metodología de diseño en la que se aplicó el autómata celular de comportamiento natu-ral de vecindad. Teniendo en cuenta que los parámetros del emplazamiento son los mismos para todos los individuos, solo se han introducido las reglas relacionales. Las especies que ya había anteriormente se han cargado en el archivo svg del emplazamiento y se han marcado en color verde claro y oscuro en la interfaz de *Processing*. Ambas especies interactúan con las nuevas, pero no cambian porque el objetivo es lograr que la nueva planta-ción ideal se adapte a las especies preexistentes.

En este hábitat hay dos especies principales: el romero y el enebro. Los objetivos de la nueva plantación son mantener la vegetación existen-te e introducir nuevas especies que no la desplacen sino que sirvan para aumentar el interés del jardín y como cobertura del suelo modificado. Además, a parte de estas premisas, algunas especies ya presentes, como el enebro, crecen muy lentamente y tienen problemas para arraigar tras ser plantadas.

La plantación se hizo con cinco especies, todas bien adaptadas al crecimiento en aquellas condiciones. Dichas especies tienen una velocidad de crecimiento mayor que las especies ya presentes pero también tienen otras características que hay que tener en cuenta. Las especies propuestas son el romero rastrero, el romerino, el lentisco, la artemisia y la salvia. La artemisia y la salvia, por ejemplo, son plantas que pierden muchas hojas en invierno y necesitan una poda a baja altura, de manera que dejan es-pacios vacíos en el jardín. Por tanto, para que el jardín no pierda interés a lo largo de todo el año, es preferible evitar el uso de dichas especies una junto a otra.

Por otra parte, la salvia compite duramente con el romero exis-tente ya anteriormente, al que puede ahogar. Por eso no es aconsejable plantar salvia cerca del romero. En verano la artemisia crece tanto que puede competir con el enebro. Por consiguiente, se desaconseja plantar artemisia cerca del enebro ya existente. Las especies ya existentes (Fig. 9) son el *Rosmarinus officinalis* (marcado en verde claro en la interfaz de *Processing*) y el *Juniperus phoenicea* (marcado en verde oscuro en la interfaz de *Processing*). Las nuevas especies de la plantación (Figs. 10 y 11) son el romero rastre-ro (*Rosmarinus officinalis prostratus*), el romerino (*Westringia fruticosa*), el lentisco (*Pistacia lentiscus*), la salvia (*Salvia officinalis*) y la artemisia (*Artemisia Powis Castle*). Se han codificado las relaciones entre especies y se han definido las siguien-tes reglas: por ejemplo, cerca de *Rosmarinus officinalis* ya existente solo se puede plantar *Artemisia*. Cerca de *Juniperus phoenicea* ya existente solo se puede plantar *Salvia*. *Artemisia* y *Salvia* no se pueden plantar juntas. El resto de especies tienen una relación de simple dominación entre ellas: una especie se sustituye por una segunda si el número de vecinos de esta es mayor que el número de vecinos de aquella.

5 CONCLUSIONES

Empezando el experimento analógico con tres situaciones iniciales alea-torias distintas con las mismas condiciones medioambientales pudimos comprobar la información del mismo patrón en los tres contenedores. De-jarlos crecer en las mismas condiciones medioambientales nos permitió determinar una relación de competencia.

Del mismo modo, el modelo digital puede reproducir un patrón similar al generado en el modelo análogo. Teniendo en cuenta que el de-sarrollo de las distintas especies depende básicamente de los nutrientes disponibles, una planta que no puede crecer no puede competir con las otras especies. En el experimento, se priva a especies muy competitivas como la *Azolla* del fósforo para controlar su desarrollo (Ranker y Haufler 2008), y para asegurar una relación competitiva equilibrada con las otras especies. La parametrización de la competitividad entre especies depende, en gran medida, de los requisitos de cada una. Sin embargo, aunque dichos requisitos son diferentes entre especies, se puede parametrizar esta com-petitividad cuando los requisitos son proporcionados y, por consiguiente, cuantificables. Por otra parte, en el ámbito del diseño, se pueden comparar las necesidades de especies de un mismo hábitat o que originalmente for-maban parte de hábitats análogos con clima, insolación y condiciones del suelo similares. Así pues, se podría establecer una relación de igual a igual entre especies dejando solo parámetros competitivos (o estéticos) como factor determinante para definir qué especies encajan mejor en cada lugar. Así la parametrización de la relación entre especies utilizando el método NNB-CA sirve para definir proyectos de plantación teniendo en cuenta las especies que son más adecuadas para las variadas condiciones de un determinado lugar, utilizando los datos analizados para el emplazamiento y aplicando parámetros competitivos y/o estéticos.

Además, se refuerza la sostenibilidad porque la colocación de las especies se define mediante parámetros controlados que se basan en el lugar más favorable para cada especie y la relación entre ellas. Se puede mejorar aún más la sostenibilidad en función de la posición relativa entre especies. De ese modo se pueden tener en cuenta efectos como la sombra prevista que hacen los árboles a los arbustos para conseguir reducir la irrigación y el mantenimiento.

BIOGRAFÍAS

Sergi Abellán Sanfélix
AE Land

Ingeniero agrícola especializado en Hortofructicultura y Jardinería; Diploma en Jardi-nería y Paisajismo (Universitat Politècnica de Catalunya). Beca del Centro Tecnológico Forestal de Cataluña. Máster universitario en Paisajismo de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ETSAB, Universitat Politècnica de Catalunya) En su carrera profesional, que impulsa desde 1977 en colaboración con varios arqui-TECTOS y urbanistas, ha creado proyectos de paisajismo y ha trabajado en la evaluación medioambiental de planes y proyectos. En 2014 entró en la empresa AE Land, donde ha desarrollado mayoritariamente proyectos de plantaciones.

Marcel Bilurbina Camps
AE Land

Grado de Arquitectura de la ETSAB UPC (Barcelona) y máster universitario en Arte Digital de la UPF (Universitat Pompeu Fabra, Barcelona). Marcel reside en Barcelona y lleva diez años dedicándose al diseño paisajístico en el estudio AE Land. Adquirió una sólida experiencia en el ámbito del diseño arquitectónico o de paisaje co-laborando con distintos estudios, como el Arata Isozaki and Associates (Barcelona y Tokio, 2001-2006). Combina su trabajo de diseño arquitectónico o de paisaje con la creación de arte gene-rativo e instalaciones audiovisuales. Se ha centrado principalmente en crear y aplicar algoritmos generativos al paisajismo, la arquitectura, el diseño y la iluminación. Ha sido profesor del máster en Diseño Avanzado y Arquitectura Digital (Elisava, Barcelo-na, 2012-2016), del máster en Arte Digital (Universitat Pompeu Fabra, Barcelona, 2015-2016) y del máster en Diseño Relacional (Accademia Abbadir, Catania, 2014-actualidad). Su obra GenDesign. Interactive design tool based on the use of genetic algorithms se ha expuesto en el Centre d'Arts Santa Mònica (Barcelona, 2011) y en la exposición "Desig-ning Fabrication", dentro del London Design Festival (2009).

Marilena Christodoulou
AE Land

Graduada en Arquitectura por la Universidad Aristóteles de Tesalónica (Escuela de Ar-quitectura, A.U.Th.). En 2012 se trasladó a Barcelona donde continuó sus estudios en ELISAVA (UPF, Universitat Pompeu Fabra) con un máster universitario en Diseño Avanza-do y Arquitectura Digital y un posgraduado con mención en Research. Desde septiembre de 2016 ha estado trabajando en su tesis doctoral en la ETSAB UPC. En 2013 entró en el estudio AE Land, donde sigue trabajando actualmente. Ha sido profesora del máster en Diseño Avanzado y Arquitectura Digital (Elisava, Bar-celona, 2013-2017) y del máster en Diseño Paramétrico en Arquitectura (ETSAV, UPC) (2018-2019). Su trabajo se centra principalmente en estudiar el diseño paramétrico y en buscarle apli-caciones en el diseño arquitectónico, de paisaje e industrial. En julio de 2018 su proyecto "On Pointe" recibió el premio Gold de los Elisava Professional Edition Awards.

REFERENCIAS

Ver listado completo de referencias en la página 34.