

## Benefits from visualization of environmental factor gradients: a case study in a protected area in central Russia

## Beneficios de la visualización de gradientes de factores ambientales: un caso de estudio en un área protegida en Rusia central

Anatoliy A. Khapugin

Tyumen State University. Lenina str. 25, 625000 Tyumen, Russia.

Joint Directorate of the Mordovia State Nature Reserve and National Park "Smolny". Dachnyi Lane, 4, Saransk, Republic of Mordovia, 430011, Russia. Email: hapugin88@yandex.ru, Phone: +79510574935.

### Abstract

**Introduction:** Ecological scales include plant species, which are responsive to changes in habitat conditions. Such plants act as phytoindicators that integrate many environmental factors.

**Objective:** To identify suitable habitats for searched-for plant species based on phytoindication data.

**Materials and methods:** Altogether, 47 square plots (100 m<sup>2</sup>) were established within a selected forest area of the Mordovia State Nature Reserve. In each plot, species composition was recorded for further analysis, and the mean values of four environmental factors (shading, soil moisture, soil nitrogen, and soil pH) were calculated using the Tsyganov ecological scale. To visualize changes in factor values, contour maps were created for each factor. To reveal differences between species composition in study plots, Jaccard's similarity index was calculated.

**Results and discussion:** All study plots have been arranged mainly along gradients of three soil parameters, namely pH, nitrogen availability and moisture, while habitat shading has not acted as strongly. Gradient maps obtained of four selected environmental factors demonstrated remarkable similarity. This suggestion is confirmed by the distinguishing of three areas because of overlapping of these maps. Similarity between values of environmental factors and plant distribution was determined. The use of phytoindication methods allows showing changes in the values of environmental factors in a forest area, and being combined with a species similarity index, it is possible to predict habitat suitability for threatened plants.

**Conclusions:** The possibility of indicating and finding an area suitable for inhabitation of plants based on the phytoindication ecological scale approach was determined. As threatened plants have a narrower range of environmental conditions, this method is especially suitable for these investigations.

### Resumen

**Introducción:** Las escalas ecológicas incluyen especies vegetales que responden ante cambios en las condiciones del hábitat. Estas plantas actúan como fitoindicadores que integran factores ambientales.

**Objetivo:** Identificar hábitats adecuados para las especies vegetales a partir de datos de fitoindicaciones.

**Materiales y métodos:** Se establecieron 47 parcelas (100 m<sup>2</sup>) en un área forestal de la Reserva Natural Estatal de Mordovia. En cada parcela se registró la composición de especies y se calcularon los valores medios de cuatro factores ambientales (sombreado, humedad, nitrógeno y pH del suelo), utilizando la escala ecológica de Tsyganov. Los cambios en los valores de los factores se visualizaron con mapas de contorno para cada factor. Las diferencias entre la composición de especies se determinaron a través del índice de similitud de Jaccard.

**Resultados y discusión:** Las parcelas se han dispuesto principalmente a lo largo de gradientes de pH, disponibilidad de nitrógeno y humedad del suelo, mientras que el sombreado del hábitat no ha sido tan influyente. Los mapas de gradiente demostraron similitud notable entre los factores ambientales y la distribución vegetativa, la cual se confirmó por la identificación de tres áreas superpuestas en estos mapas. Los métodos de fitoindicación permiten mostrar cambios en los valores de los factores ambientales en un área forestal, y en combinación con un índice de similitud de especies es posible predecir la idoneidad del hábitat para plantas amenazadas.

**Conclusiones:** Es posible indicar y encontrar un área adecuada para el establecimiento de plantas sobre la base del enfoque de la escala ecológica de fitoindicación. Dado que las plantas amenazadas tienen requerimientos ambientales más rigurosos, este método es especialmente adecuado para tales investigaciones.

**Keywords:** ecological scale; phytoindication; plant species; threatened species.

**Palabras clave:** Escala ecológica; fitoindicación; especies vegetales; especies amenazadas.

## Introduction

Plant communities are distributed along the landscape depending on the gradients of various environmental factors (Pottier et al., 2013). Depending on the values of environmental factors, their significance, study area location, and structure and floristic composition of plant communities, species abundance can differ significantly (John et al., 2007; Khapugin, Vargot, & Chugunov, 2016; Lennon, Beale, Reid, Kent, & Pakeman, 2011; Popov & Makukha, 2019). Climatic and edaphic conditions of a habitat are often recognized as the strongest factors influencing the vegetation cover in a certain area (Dubuis et al., 2013; Gebremedihin, Birhane, Tadesse, & Gbrewahid, 2018; Khan, Khan, Ahmad, Ahmad, & Page, 2016; Pajunen, Kaarlejärvi, Forbes, & Virtanen, 2010). At the same time, the influence of climatic factors on vegetation is most noticeable at the regional or global scales (Jarema, Samson, McGill, & Humphries, 2009), while edaphic and topographic properties play a critical role in plant distribution at the local scale (Cui, Zhai, Dong, Chen, & Liu, 2009; John et al., 2007; Potts, Ashton, Kaufman, & Plotkin, 2002; Seregin, 2014).

Being based on environmental and phytogeographical gradients, most vegetation classifications are operated at various ecological scales (Landolt et al., 2010; Ramenskiy, Tsatsenkin, Chijikov, & Antipin, 1956; Tsyganov, 1983). Gradients associated with small-scale landscape heterogeneity, light availability and soil properties (pH, moisture, nitrogen availability) are well suited for the local scale. Nevertheless, climatic gradients and differences in the histories of local floras are also important at the regional or global level (Smirnova, Lugovaya, & Prokazina, 2013).

Ecological scales include plant species, which are responsive to changes in habitat conditions. Due to this fact, these plants act as phytoindicators that integrate many environmental factors. This is a very appropriate tool for understanding the environmental conditions of a habitat (e. g., climatic, edaphic, light conditions) when direct measurements are difficult (Gusev, 2009; Khapugin, 2017). Plant species can be used to indicate environmental conditions of habitats based on presence and/or abundance in the site (Goebel et al., 2001). The set of plant species contributes to distinguishing and mapping the conditions of landscape ecosystems based on the phytoindication approach. This could be especially important for searching for new locations for threatened plants, which have a narrower range of environmental conditions. In addition, in the study region (Republic of Mordovia) many of these species are Critically Endangered (e. g., *Najas tenuissima* [A. Braun ex Magnus] Magnus, *Corallorhiza trifida* Châtel., *Huperzia selago* [L.] Bernh. ex Schrank & Mart.) or Endangered (e. g., *Cyripedium calceolus* L., *Pyrola media* Sw., *Scheuchzeria*

## Introducción

Las comunidades vegetales están distribuidas a lo largo del paisaje dependiendo de los gradientes de varios factores ambientales (Pottier et al., 2013). La abundancia de las especies puede diferir significativamente dependiendo de los valores de los factores ambientales, importancia, ubicación del área de estudio, y estructura y composición florística de las comunidades vegetales (John et al., 2007; Khapugin, Vargot, & Chugunov, 2016; Lennon, Beale, Reid, Kent, & Pakeman, 2011; Popov & Makukha, 2019). Las condiciones climáticas y edáficas de un hábitat son frecuentemente reconocidas como los factores más influyentes sobre la cubierta vegetal de un área determinada (Dubuis et al., 2013; Gebremedihin, Birhane, Tadesse, & Gbrewahid, 2018; Khan, Khan, Ahmad, Ahmad, & Page, 2016; Pajunen, Kaarlejärvi, Forbes, & Virtanen, 2010). Al mismo tiempo, la influencia de los factores climáticos sobre la vegetación es más notable a escala regional o mundial (Jarema, Samson, McGill, & Humphries, 2009), mientras que las propiedades edáficas y topográficas desempeñan un papel fundamental en la distribución vegetativa a escala local (Cui, Zhai, Dong, Chen, & Liu, 2009; John et al., 2007; Potts, Ashton, Kaufman, & Plotkin, 2002; Seregin, 2014).

Al estar basadas en gradientes ambientales y fitogeográficos, la mayoría de las clasificaciones de vegetación operan bajo diversas escalas ecológicas (Landolt et al., 2010; Ramenskiy, Tsatsenkin, Chijikov, & Antipin, 1956; Tsyganov, 1983). Los gradientes asociados con la heterogeneidad del paisaje a pequeña escala, la disponibilidad de luz y las propiedades del suelo (pH, humedad y disponibilidad de nitrógeno) son importantes a escala local; sin embargo, los gradientes climáticos y las diferencias en los antecedentes de las floras locales también son importantes a nivel regional o mundial (Smirnova, Lugovaya, & Prokazina, 2013).

Las escalas ecológicas incluyen especies vegetales que responden a cambios en las condiciones del hábitat. Debido a ello, estas plantas actúan como fitoindicadores que integran muchos factores ambientales. Esta es una herramienta muy apropiada para comprender las condiciones ambientales de un hábitat (climáticas, edáficas y lumínicas) cuando las mediciones directas son difíciles (Gusev, 2009; Khapugin, 2017). Las especies vegetales pueden usarse para indicar las condiciones ambientales de los hábitats en función de la presencia y abundancia en el sitio (Goebel et al., 2001). El conjunto de especies vegetales contribuye a distinguir y cartografiar las condiciones de los ecosistemas del paisaje con base en el enfoque de fitoindicación. Esto podría ser de especial importancia para buscar nuevas ubicaciones de plantas amenazadas que tengan requerimientos ambientales más rigurosos. En la República de Mordovia (región de estudio) muchas

*palustris* L.) (Khapugin et al., 2017). Populations of some of them have not been re-discovered for a long time (e. g., *Neotinea ustulata* [L.] R. M. Bateman, Pridgeon & M. W. Chase – since 1888, *Dactylorhiza viridis* [L.] R. M. Bateman, Pridgeon & M. W. Chase – since 1980, *Pedicularis dasystachys* Schrenk – since 1985).

There are many studies devoted to distinguishing and characterizing the forest ecosystems (Goebel et al., 2001; Khan et al., 2016; Konollová & Chytrý, 2004; Pripulina, Zubkova, Shanin, Smirnov, & Komarov, 2014) and/or succession processes (Budzáková, Galvanek, Littera, & Sibik, 2013; Khapugin et al., 2016; Pripulina, Zubkova, & Komarov, 2015) in them in relation to different environmental factors. Fewer studies have been devoted to the mapping of the distribution of ecological factor gradients in forest systems (Bednova, 2014).

In this study, the approach of visualizing environmental factor gradients is presented for a certain area in the southern boundary of the taiga zone – within the Mordovia State Nature Reserve (Central Russia). The objective of this study was to determine an opportunity to identify suitable habitats for searched-for plant species based on phytoindication data.

## Materials and methods

### Study site

The study was carried out in the Mordovia State Nature Reserve (Figure 1), situated at the southern boundary of the taiga zone (54° 42' – 54° 56' N; 43° 04' – 43° 36' E; up to 190 m) in Central Russia. Total area of the Mordovia Reserve is 321.62 km<sup>2</sup>. Soils are classified as predominantly sand in varying degrees of podzolization. These lie on ancient alluvial sands (Kuznetsov, 2014). The mean annual precipitation in this area varies from 406.6 to 681.3 mm and the mean annual air temperature is 4.7 °C. Maximal temperature values are recorded in July, and minimal ones in February (Bayanov, 2015). Forest communities cover 89.3 % of the total reserve area. Pine (*Pinus sylvestris* L.) is the main forest-forming wood species. Birch (*Betula pendula* Roth) ranks second in the area covered by forest in the reserve. Lime (*Tilia cordata* Mill.) forests are encountered in the northern part of the reserve, whereas oak (*Quercus robur* L.) forests cover a relatively small area in the western section. Spruce (*Picea abies* L.) forests are located predominantly in the floodplains of rivers and streams and cover small areas (Tereshkin & Tereshkina, 2006).

### Field sampling

The selected forest compartment (№ 396) is located in the south of the Mordovia State Nature Reserve. The Protected Area covers an area of 1.17 km<sup>2</sup>. This

de estas especies están en peligro crítico de extinción (v. g., *Najas tenuissima* [A. Braun ex Magnus] Magnus, *Corallorhiza trifida* Châtel. y *Huperzia selago* [L.] Bernh. ex Schrank & Mart.) o en peligro de extinción (por ejemplo, *Cypripedium calceolus* L., *Pyrola media* Sw. y *Scheuchzeria palustris* L.) (Khapugin et al., 2017). Las poblaciones de algunas de ellas no han sido redescubiertas durante mucho tiempo (v. g., *Neotinea ustulata* [L.] R. M. Bateman, Pridgeon & M. W. Chase, desde 1888; *Dactylorhiza viridis* [L.] R. M. Bateman, Pridgeon & M. W. Chase, desde 1980; y *Pedicularis dasystachys* Schrenk, desde 1985).

Existen muchos estudios dedicados a la distinción y caracterización de los ecosistemas forestales (Goebel et al., 2001; Khan et al., 2016; Konollová & Chytrý, 2004; Pripulina, Zubkova, Shanin, Smirnov, & Komarov, 2014) y sus procesos de sucesión (Budzáková, Galvanek, Littera, & Sibik, 2013; Khapugin et al., 2016; Pripulina, Zubkova, & Komarov, 2015) en relación con los factores ambientales. En contraste, se han dedicado menos estudios a la cartografía de la distribución de los gradientes de factores ecológicos en los sistemas forestales (Bednova, 2014).

En este estudio se presenta el enfoque de visualización de gradientes de factores ambientales para un área determinada en la frontera sur de la zona de la taiga, dentro de la Reserva Natural Estatal de Mordovia (Rusia Central). El objetivo de este estudio fue determinar una oportunidad para identificar hábitats adecuados para las especies de plantas con base en datos de fitoindicaciones.

## Materiales y métodos

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Reserva Natural Estatal de Mordovia (Figura 1), situada en el límite sur de la zona de la taiga (54° 42' – 54° 56' N; 43° 04' – 43° 36' E; hasta 190 m) en Rusia Central. El área total de la Reserva de Mordovia es de 321.62 km<sup>2</sup>. Los suelos se clasifican como predominantemente arenosos en diferentes grados de podzolización y yacen en arenas aluviales ancestrales (Kuznetsov, 2014). La precipitación media anual en esta zona varía de 406.6 a 681.3 mm y la temperatura media anual del aire es de 4.7 °C. Los valores máximos de temperatura se registran en julio y los mínimos en febrero (Bayanov, 2015). Las comunidades forestales cubren 89.3 % de la superficie total de la reserva. El pino (*Pinus sylvestris* L.) es la principal especie maderable conformando el bosque en la reserva, mientras que el abedul (*Betula pendula* Roth) ocupa el segundo lugar en el área cubierta de bosque. Los bosques de tilo (*Tilia cordata* Mill.) se ubican en la parte norte de la reserva, mientras que los bosques de roble (*Quercus robur* L.) cubren una superficie relativamente pequeña en la parte occidental. Los bosques de píceas (*Picea abies* L.) cubren



particular forest compartment was selected because: (1) the forest road, being evidence of human activity, passes through it from south to north; (2) it contains the oligotrophic bog in the northwest of the study area. In June 2017, 47 100-m<sup>2</sup> square plots were randomly established within this area (Figure 1). Among them, three plots (45, 46, 47) were 2 × 50 m in size. They were established along the forest road. In each plot, plant species composition was recorded for further analysis. According to a vegetation map of the reserve, *P. sylvestris* is the predominant forest-forming species, with other trees being *B. pendula* and *T. cordata*.

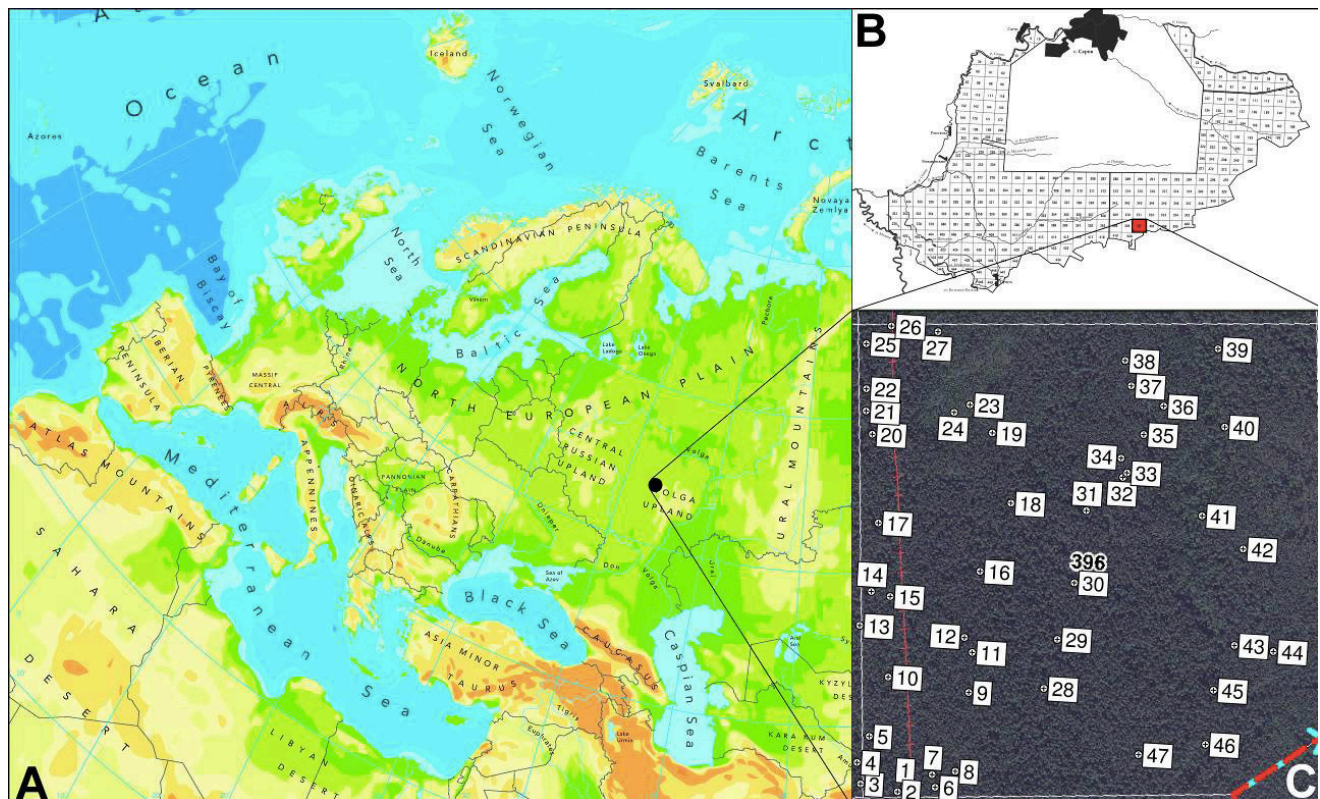
### Data analysis and visualization

To find the mean values (in scores) of the environmental factors in each plot, the Tsyganov (1983) ecological scale was used because it was specifically developed for the coniferous-deciduous forest subzone where the reserve is situated. Each environmental factor of the scale is represented by scores (gradations) depending on plant survival. It means that for a certain plant species the range of its existence in relation to a certain factor (for

áreas pequeñas y se localizan predominantemente en las llanuras aluviales de los ríos y arroyos (Tereshkin & Tereshkina, 2006).

### Muestreo de campo

La sección forestal seleccionada (núm. 396) se encuentra en el sur de la Reserva Natural Estatal de Mordovia. El área protegida tiene una superficie de 1.17 km<sup>2</sup>. Esta sección forestal en particular fue seleccionada debido a que: (1) el camino forestal, como evidencia de la actividad humana, atraviesa de sur a norte; y (2) contiene la ciénaga oligotrófica en el noroeste del área de estudio. En junio de 2017 se establecieron aleatoriamente 47 parcelas cuadradas de 100 m<sup>2</sup> dentro de dicha área (Figura 1). Entre ellas, tres parcelas (45, 46, 47) con dimensiones de 2 × 50 m se establecieron a lo largo del camino forestal. En cada parcela se registró la composición por especies de plantas para su análisis posterior. De acuerdo con un mapa de vegetación de la reserva, *P. sylvestris* es la especie predominante en la conformación del bosque, junto con otros árboles como *B. pendula* y *T. cordata*.



**Figure 1.** The location of 47 study plots in Europe (A), the Mordovia State Nature Reserve (B) and the selected forest compartment (C). Map of Europe with modifications (<http://www.eea.europa.eu/legal/copyright>).  
**Figura 1.** Ubicación de las 47 parcelas de estudio en Europa (A), la Reserva Natural Estatal de Mordovia (B) y los tramos forestales seleccionados (C). Mapa de Europa con modificaciones (<http://www.eea.europa.eu/legal/copyright>).

instance, soil nitrogen, moisture, etc.) can be identified. Since the study was carried out at the local scale, the edaphic and topographic environmental factors of the Tsyganov scale (1983) were selected: shading (LC), soil moisture (HD), soil nitrogen (NT), and soil pH (RC). The mean value of an environmental factor per each study plot was calculated as a mean of the entire set of species recorded there. It was calculated according to the following formula:

$$mEFV = \frac{(x_1^{\min} + x_2^{\min} + \dots + x_n^{\min}) + (x_1^{\max} + x_2^{\max} + \dots + x_n^{\max})}{2n}$$

where,

mEFV = mean environmental factor values (e. g., shading)

$x_n^{\min}$  = the minimal score value of a factor in the Tsyganov scale (1983) for a plant species

$x_n^{\max}$  = the maximal score value of a factor in the Tsyganov scale (1983) for a plant species

n = number of plant species in the floristical list in a study plot.

The distribution visualization of selected environmental factor gradients was performed using the relevant contour maps as background images using “Surfer” v. 11 software (Golden Software Inc., 2012). Interpolated contour maps were obtained by kriging using a default linear variogram. Calculated mean values of each environmental factor were used as the variables Z.

To reveal differences between plant species compositions in different study plots, Jaccard’s similarity index  $JS = 100 \times C/(A + B - C)$  was calculated, where A = number of species in locality A; B = number of species in locality B; C = number of species shared between two (A and B) localities (Jaccard, 1901). Results of the calculation were processed using Statistica 8 software (StatSoft, 2007).

Statistical analysis was performed in MS Excel and PAST 3.15 (Hammer, Harper, & Ryan, 2001). The ordination techniques, the principal component analysis (PCA), were used to define the major gradients in the spatial arrangement of study plots of the analyzed dataset. For ecological interpretation of the ordination axes, mean values (in scores) of environmental factors for established plots were plotted onto a PCA ordination diagram as supplementary environmental data.

## Results

Based on the calculated mean values of the environmental factors (shading, soil moisture, soil nitrogen, and soil pH) in each study plot, contour maps of selected environmental factor gradients were prepared. Figure 2 shows notable differences

## Análisis de datos y visualización

Para encontrar los valores medios (en puntajes) de los factores ambientales en cada parcela, se utilizó la escala ecológica de Tsyganov (1983), debido a que fue desarrollada específicamente para la subzona de bosque conífero-caducifolio donde se ubica la reserva. Cada factor ambiental de la escala está representado por puntuaciones (gradaciones) en función de la supervivencia vegetativa. Esto significa que para una determinada especie vegetal puede identificarse el rango de su existencia en relación con un factor determinado (por ejemplo, el nitrógeno del suelo y la humedad). Dado que el estudio se llevó a cabo a escala local, se seleccionaron los siguientes factores ambientales edáficos y topográficos de la escala de Tsyganov (1983): sombreado (LC), humedad del suelo (HD), nitrógeno del suelo (NT) y pH del suelo (RC). El valor medio de un factor ambiental por cada parcela bajo estudio se calculó como la media de todo el conjunto de especies registradas en ella, según la siguiente fórmula:

$$mEFV = \frac{(x_1^{\min} + x_2^{\min} + \dots + x_n^{\min}) + (x_1^{\max} + x_2^{\max} + \dots + x_n^{\max})}{2n}$$

donde,

mEFV = valores medios de los factores ambientales (v. g. sombreado)

$x_n^{\min}$  = valor mínimo de la puntuación de un factor en la escala de Tsyganov (1983) para una especie vegetal

$x_n^{\max}$  = valor máximo de la puntuación de un factor en la escala de Tsyganov (1983) para una especie vegetal

n = número de especies vegetales en la lista florística de una parcela bajo estudio.

La distribución de gradientes de los factores ambientales seleccionados se visualizó utilizando los mapas de contorno relevantes como imágenes de fondo utilizando el software «Surfer» v. 11 (Golden Software Inc., 2012). Los mapas de contorno interpolados se obtuvieron mediante el método *kriging* utilizando un variograma lineal predeterminado. Los valores medios calculados de cada factor ambiental se utilizaron como variables Z.

Para revelar las diferencias entre las composiciones de especies vegetales en las parcelas bajo estudio, se calculó el índice de similitud de Jaccard  $JS = 100 \times C/(A + B - C)$ , donde A = número de especies en la localización A; B = número de especies en la localización B; y C = número de especies compartidas entre ambas localidades (A y B) (Jaccard, 1901). Los resultados del cálculo se procesaron utilizando el software Statistica 8 (StatSoft, 2007).

El análisis estadístico se realizó en MS Excel y PAST 3.15 (Hammer, Harper, & Ryan, 2001). Se utilizaron las



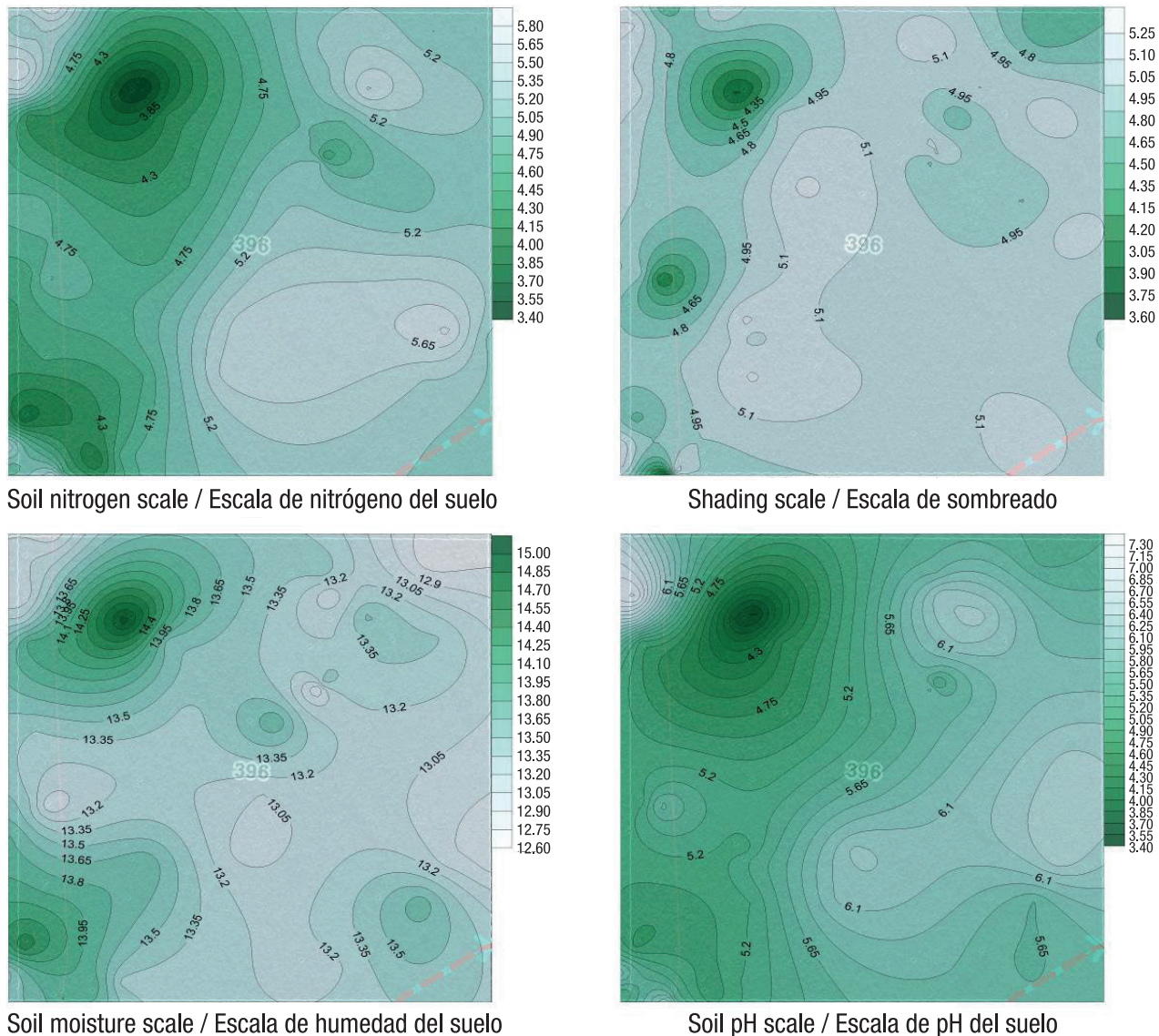
between the east and west parts of the selected forest compartment regarding all environmental factors. In addition, three study plots established along the forest road have not influenced the whole distribution of environmental factor gradients.

Four spatial distribution maps of selected environmental factor gradients were combined with a decline in the layers' visibility until 45 %-level. Hence, areas of the greatest overlap of all obtained maps were produced (Figure 3A). Then this map was combined with the scheme of the study plots within the selected forest compartment (Figure 1). As a result, three groups of study plots were obtained (Figure 3B). They are characterized by using maps from Figure 2. First group:

técnicas de ordenación y el análisis de componentes principales (ACP) para definir los principales gradientes en la disposición espacial de las parcelas bajo estudio del conjunto de datos analizado. Para la interpretación ecológica de los ejes de ordenación, los valores medios (en puntuaciones) de los factores ambientales de las parcelas establecidas se graficaron en un diagrama de ordenación de ACP como datos ambientales complementarios.

## Resultados

A partir de los valores medios de los factores ambientales seleccionados (sombreado, humedad, nitrógeno y pH del suelo) de cada parcela bajo estudio, se elaboraron



**Figure 2. Interpolated spatial distribution maps showing the gradients of four selected environmental factors in the Mordovia State Nature Reserve.**

**Figura 2. Mapas de distribución espacial interpolada mostrando los gradientes de cuatro factores ambientales seleccionados en la Reserva Natural Estatal de Mordovia.**

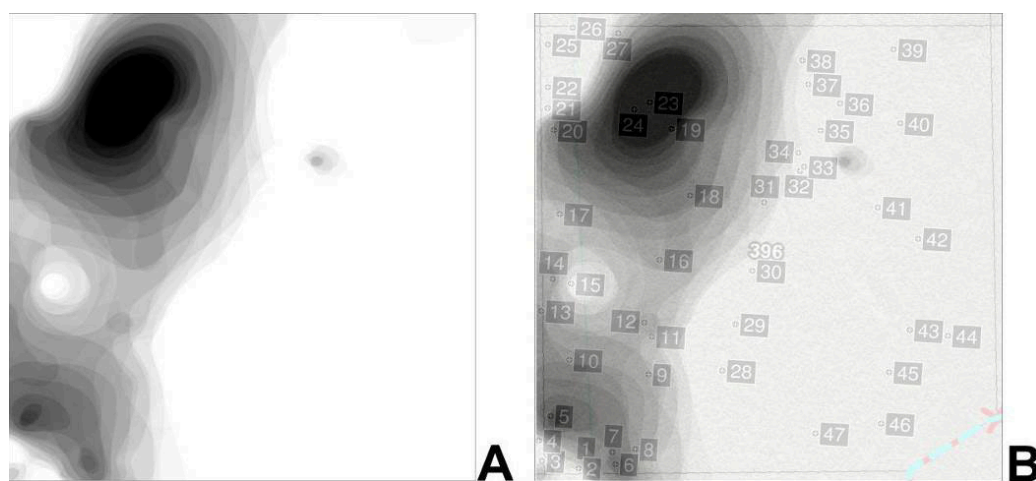
the darkest area contains the most illuminated and moistest study plots with extremely low levels of soil pH and soil nitrogen. Forest communities present other distinguishable groups. Second group: the lightest area in Figure 3 is located predominantly in the eastern part of the forest compartment with three loci in its central-western, northwestern and southwestern parts. These areas are covered by moderately shaded forest communities on the most nitrogen-rich and alkaline soils. Third group: light-gray to dark-gray areas indicate the most shaded plant communities located on moderately acidic soils with a low level of soil nitrogen. It should be noted that soil moisture did not differ significantly between the first and second groups.

In order to test and demonstrate more clearly this definition of study plots divided into three groups, PCA was performed on the values of four environmental factors for all study plots. All study plots have been arranged mainly along gradients of three soil parameters, namely pH, nitrogen availability and moisture (Figure 4), while habitat shading has not acted as strongly to the arrangement of most study plots. However, it is suggested that habitat shading and soil moisture should be considered as important factors determining vegetation structure formation in wider areas if these will include more various habitat types.

Ecological scales are based on plant species composition in a certain area. In the present study, each study plot was considered as such area. It was assumed that the use of any similarity indices should indicate the same distinguishing of study plots as demonstrated in Figure 4. In order to test that, plant species compositions of all study plots were compared using Jaccard's similarity index.

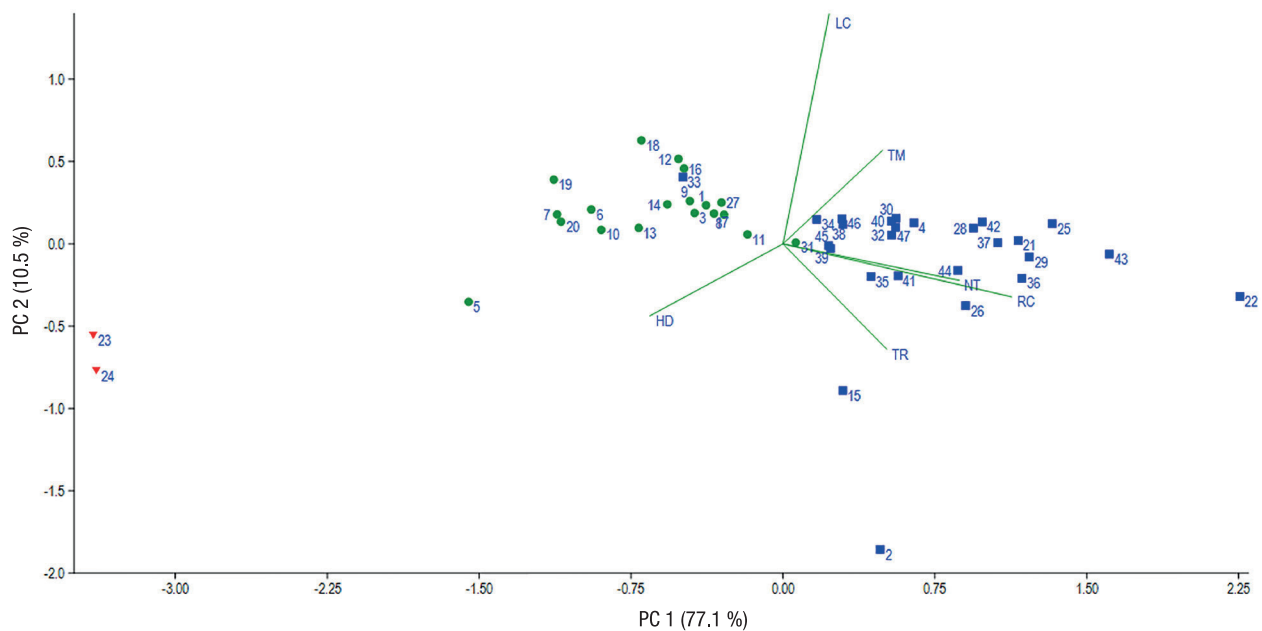
mapas de contorno de gradientes de dichos factores. La Figura 2 muestra diferencias considerables entre las partes este y oeste de la sección forestal seleccionada en relación con todos los factores ambientales. Además, tres parcelas de estudio establecidas a lo largo del camino forestal no han influido en la distribución total de los gradientes de los factores ambientales.

Se combinaron cuatro mapas de distribución espacial de gradientes de los factores ambientales seleccionados con una disminución de la visibilidad de las capas hasta el nivel de 45 %. De este modo, se obtuvieron las áreas de mayor superposición de todos los mapas obtenidos (Figura 3A). Posteriormente, este mapa se combinó con el diagrama de las parcelas bajo estudio dentro de la sección forestal seleccionada (Figura 1). Como resultado, se obtuvieron tres grupos de parcelas de estudio (Figura 3B), caracterizados por el uso de los mapas de la Figura 2. Primer grupo: la zona más oscura contiene las parcelas de estudio más iluminadas y húmedas con niveles extremadamente bajos de pH y nitrógeno en el suelo. Las comunidades forestales presentan otros grupos distintivos. Segundo grupo: el área más clara en la Figura 3 se localiza predominantemente en la parte oriental de la sección forestal, con tres locaciones en sus partes central-occidental, noroccidental y sudoccidental. Estas áreas están cubiertas por comunidades forestales moderadamente sombreadas sobre los suelos más ricos en nitrógeno y más alcalinos. Tercer grupo: las áreas de color gris claro a gris oscuro indican las comunidades vegetativas más sombreadas ubicadas en suelos moderadamente ácidos con un bajo nivel de nitrógeno en el suelo. Cabe señalar que la humedad del suelo no difirió significativamente entre el primer y el segundo grupo.



**Figure 3. The combination of four maps showing the distribution of mean environmental factor values (A) and the same in combination with the map of study plots in the selected forest compartment (B) of the Mordovia State Nature Reserve.**

**Figura 3. Combinación de cuatro mapas que muestran la distribución de los valores medios de los factores ambientales (A) y los mismos mapas en combinación con el mapa de las parcelas bajo estudio en la sección forestal seleccionada (B) de la Reserva Natural Estatal de Mordovia.**



**Figure 4.** Principal component analysis (PCA) ordination diagram of plots established in the selected forest compartment of the Mordovia State Nature Reserve. Symbols: red triangles – group 1, blue squares – group 2, green dots – group 3. Environmental factors: LC = shading, HD = soil moisture, NT = soil nitrogen, RC = soil pH. To reveal ecological gradients, mean values of environmental factors were plotted onto PCA ordination diagram as supplementary environmental variables.

**Figura 4.** Diagrama de ordenación del análisis de componentes principales (ACP) de las parcelas establecidas en la sección forestal seleccionada de la Reserva Natural Estatal de Mordovia. Símbolos: triángulos rojos – grupo 1, cuadros azules – grupo 2, puntos verdes – grupo 3. Factores ambientales: LC = sombreado, HD = humedad del suelo, NT = nitrógeno del suelo, RC = pH del suelo. Para revelar los gradientes ecológicos, los valores medios de los factores ambientales se trazaron en el diagrama de ordenación del ACP como variables ambientales complementarias.

A list was compiled of the plant species recorded in all study plots within the selected forest compartment. According to Khapugin and Astashkina (2018), there were 101 species of vascular plants from 43 families and four bryophytes in this area. Based on this list, Jaccard's similarity indices were calculated. Obtained results are presented using cluster analysis (Figure 5). They show separation of all study plots into four main clusters. Of these, three clusters correspond to three groups of areas distinguished in Figure 3 and Figure 4, while the fourth cluster includes study plots situated along the forest road. It is noteworthy that no one map of environmental factor gradients reflected the location of the forest road based on phytoindicators from three study plots (Figure 2).

As can be seen, most study plots of the “afforested” second and third groups are arranged into two individual clusters. Three study plots (2, 15, 26) distinguished earlier into group 2 were placed in the separate cluster being combined with plots of group 1. These three study plots were established along the forest road containing several ruderal and grassland species. The combination of group 1 and the “forest road” group is a result of the lower similarity of their

Para probar y demostrar con mayor claridad la definición de parcelas bajo estudio divididas en tres grupos, se realizó el ACP sobre los valores de cuatro factores ambientales. Todas las parcelas bajo estudio se han dispuesto principalmente a lo largo de gradientes de tres parámetros del suelo: el pH, la disponibilidad de nitrógeno y la humedad (Figura 4), mientras que el sombreado del hábitat no ha sido tan influyente sobre la disposición de la mayoría de las parcelas bajo estudio. No obstante, se sugiere que el sombreado del hábitat y la humedad del suelo deberían considerarse como factores importantes que determinan la formación de la estructura de la vegetación en áreas más amplias si estas incluyen varios tipos de hábitats más.

Las escalas ecológicas se basan en la composición de las especies vegetales en una zona determinada. En el presente estudio, cada parcela de estudio fue considerada como tal área y se asumió que el uso de cualquier índice de similitud debería indicar el mismo distintivo de las parcelas bajo estudio como se muestra en la Figura 4. Para probar esto, se compararon las composiciones de especies vegetales de todas las parcelas bajo estudio utilizando el índice de similitud de Jaccard.



Ward's method / Método de Ward  
Euclidean distances / Distancias euclidianas

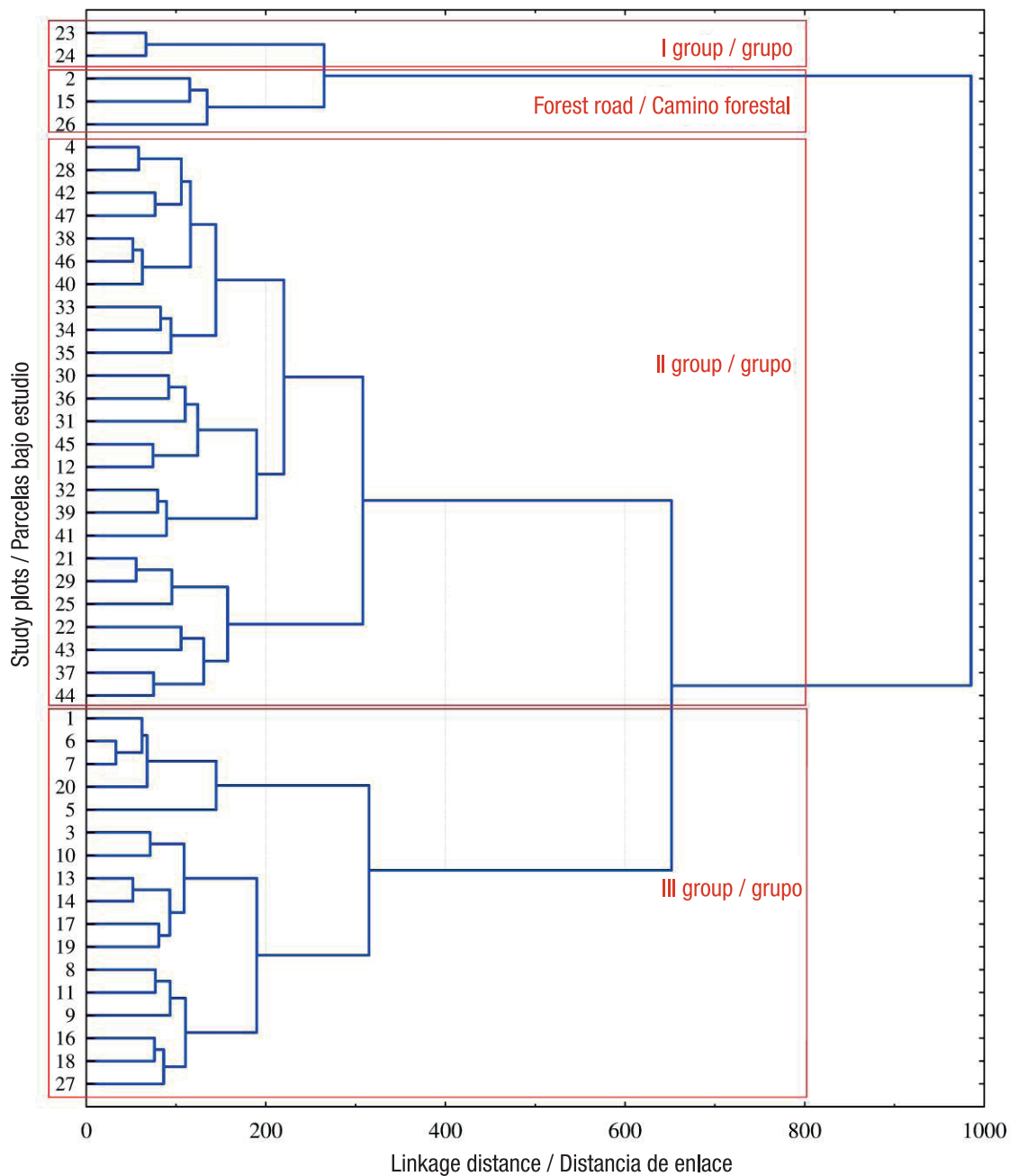


Figure 5. Cluster analysis dendrogram of plant species composition of 47 study plots in the selected forest compartment of the Mordovia State Nature Reserve, based on Jaccard's similarity indices.

Figura 5. Dendrograma de análisis de conglomerados de la composición de especies vegetales de 47 parcelas bajo estudio en la sección forestal seleccionada de la Reserva Natural Estatal de Mordovia, basado en los índices de similitud de Jaccard.

species composition with the species composition of the other two groups of study plots. Moreover, Jaccard's similarity indices between study plots of group 1 and the "forest road" plots are equal to null.

## Discussion

Gradient maps obtained of four selected environmental factors in the selected forest compartment demonstrated remarkable similarity. This suggestion is confirmed by the distinguishing of three areas because of overlapping of these maps. These areas are characterized by unique compositions of plant species. It is obvious that exactly these plant species determine most differences between three areas distinguished in Figure 3. Table 1 shows the lists of species unique to each distinguished group taking into account the "forest road" species forming a separate cluster in the dendrogram of Figure 5. Despite eight species recorded only along the forest road (plots 2, 15, 26), it did not affect the distribution of the gradients of selected environmental factors in the plant community (Figure 2). Obviously, the influence of these ruderal and meadow plants (*Alchemilla vulgaris* L., *Persicaria hydropiper* [L.] Delarbre, *Plantago major* L., *Poa annua* L.) on the gradients of selected environmental factors has been smoothed due to the dominance of species typical of the forest system (*Convallaria majalis* L., *Asarum europaeum* L., *Molinia caerulea* [L.] Moench, *Sorbus aucuparia* L.). Therefore, their influence on environmental factors in the study area can be considered as minimal.

At the same time, there is a problem in determining the locations of ruderal (occasional here) species using the method presented here. The important question is, can a location of a certain species be revealed using gradient maps of selected environmental factors? It can be said that it is partially possible. So, survival intervals of the Tsyganov (1983) ecological scale can be used to separate all species into specialists (species with narrow intervals) and generalists (species with wide intervals) (Begon, Townsend, & Harper, 2005; Komarov & Zubkova, 2012). As specialists live in narrow limits of environmental factors, it is possible to reduce the search area for a certain plant, having gradient maps of environmental factors and the list of specialist species presumably living here. For instance, all maps obtained in the present study have demonstrated a strong difference in the area in the northwestern part of the forest compartment (Figures 2 and 3). According to phytoindication data (Figures 2 and 4), this is the most illuminated and moistest area on poor-nitrogen and acidic soils that corresponded to oligotrophic bogs of Eurasia (Wheeler & Proctor, 2000). Such environmental conditions were revealed in the northwestern part of the study area containing plots of group 1. Indeed, the oligotrophic *Sphagnum-Eriophorum*-dominated bog

Se elaboró un listado de las especies vegetales registradas en todas las parcelas bajo estudio dentro de la sección forestal seleccionada. De acuerdo con Khapugin y Astashkina (2018), hay 101 especies de plantas vasculares de 43 familias y cuatro briofitas en esta área. Los índices de similitud de Jaccard fueron calculados sobre la base de esta lista. Los resultados obtenidos se presentan utilizando el análisis de conglomerados (Figura 5). Dichos resultados muestran la separación de todas las parcelas bajo estudio en cuatro grupos principales. De entre ellos, tres conjuntos corresponden a tres grupos de áreas identificadas en la Figura 3 y la Figura 4, mientras que el cuarto grupo incluye parcelas bajo estudio situadas a lo largo del camino forestal. Cabe destacar que ningún mapa de gradientes de factores ambientales reflejó la ubicación del camino forestal a partir de los fitoindicadores de tres parcelas bajo estudio (Figura 2).

Como se puede observar, la mayoría de las parcelas bajo estudio del segundo y tercer grupo «forestados» están dispuestas en dos grupos individuales. Tres parcelas de estudio (2, 15, 26) identificadas anteriormente en el grupo 2 fueron colocadas en el conjunto separado que está combinado con las parcelas del grupo 1. Estas tres parcelas de estudio se establecieron a lo largo del camino forestal que contiene varias especies ruderales y de pastizales. La combinación del grupo 1 y el grupo «camino forestal» es el resultado de menor similitud de su composición de especies con la composición de especies de los otros dos grupos de parcelas bajo estudio. Además, los índices de similitud de Jaccard entre las parcelas de estudio del grupo 1 y las parcelas de «camino forestal» son iguales a cero.

## Discusión

Los mapas de gradiente obtenidos de los cuatro factores ambientales seleccionados en la sección forestal de estudio demostraron una similitud notable, la cual se ve confirmada por la identificación de tres áreas debido a la superposición de estos mapas. Estas áreas se caracterizan por tener composiciones exclusivas de especies vegetales, las cuales determinan la mayoría de las diferencias entre las tres áreas identificadas en la Figura 3. El Cuadro 1 muestra las listas de especies exclusivas de cada grupo identificado teniendo en cuenta las especies de «caminos forestales» que forman un conjunto separado en el dendrograma de la Figura 5. A pesar de que solo se registraron ocho especies a lo largo del camino forestal (parcelas 2, 15, 26), no se afectó la distribución de los gradientes de los factores ambientales seleccionados en la comunidad vegetal (Figura 2). Obviamente, la influencia de estas plantas ruderales y de pradera (*Alchemilla vulgaris* L., *Persicaria hydropiper* [L.] Delarbre, *Plantago major* L. y *Poa annua* L.) sobre los gradientes de los factores

**Table 1. List of species unique to each group distinguished based on phytoindication data in the selected forest compartment of the Mordovia State Nature Reserve.**

**Cuadro 1. Listado de especies exclusivas de cada grupo identificado con base en datos de fitoindicación en la sección forestal seleccionada de la Reserva Natural Estatal de Mordovia.**

Groups of uniqueness (percents)/ Grupos de exclusividad (porcentajes)	Plant species /Especie vegetal
Species unique to group I (50.0 %)/ Especies exclusivas del grupo I (50.0 %)	<i>Betula pubescens</i> Ehrh., <i>Carex lasiocarpa</i> Ehrh. <sup>RC</sup> , <i>Eriophorum vaginatum</i> L. <sup>NT,LC</sup> , <i>Ledum palustre</i> L. <sup>NT,LC</sup> , <i>Sphagnum fallax</i> H. Klinggr. <sup>HD</sup> , <i>Vaccinium uliginosum</i> L.
Species unique to group II (57.4 %)/ Especies exclusivas del grupo II (57.4 %)	<i>Acer platanoides</i> L., <i>Aegopodium podagraria</i> L. <sup>NT,RC</sup> , <i>*Alchemilla vulgaris</i> L. <sup>NT,LC</sup> , <i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn., <i>Angelica sylvestris</i> L. <sup>HD,LC</sup> , <i>Antennaria dioica</i> (L.) Gaertn. <sup>HD,LC</sup> , <i>Anthoxanthum odoratum</i> L. <sup>RC,LC</sup> , <i>Asarum europaeum</i> L. <sup>HD,NT,RC</sup> , <i>Athyrium filix-femina</i> (L.) Roth <sup>NT,LC</sup> , <i>Carex elongata</i> L. <sup>HD,NT,RC</sup> , <i>*Carex leporina</i> L. <sup>NT</sup> , <i>Carex pallescens</i> L. <sup>NT,RC</sup> , <i>Chimaphila umbellata</i> (L.) Nutt. <sup>HD,RC</sup> , <i>Corylus avellana</i> L., <i>Daphne mezereum</i> L. <sup>HD,LC</sup> , <i>Epilobium angustifolium</i> L., <i>Equisetum sylvaticum</i> L. <sup>HD,NT</sup> , <i>*Festuca pratensis</i> Huds. <sup>NT,LC</sup> , <i>Galium mollugo</i> L., <i>Glechoma hederacea</i> L. <sup>LC</sup> , <i>Gymnocarpium dryopteris</i> (L.) Newman <sup>HD,RC</sup> , <i>Hieracium sylvularum</i> Jord. ex Boreau <sup>HD</sup> , <i>Hieracium umbellatum</i> L. <sup>NT,RC</sup> , <i>Juniperus communis</i> L., <i>Lathyrus vernus</i> (L.) Bernh. <sup>HD</sup> , <i>Lonicera xylosteum</i> L. <sup>HD</sup> , <i>Melampyrum nemorosum</i> L. <sup>HD,NT,RC</sup> , <i>Mercurialis perennis</i> L. <sup>HD,NT</sup> , <i>Orthilia secunda</i> (L.) House <sup>HD,NT</sup> , <i>Paris quadrifolia</i> L. <sup>HD,NT</sup> , <i>Pilosella officinarum</i> Vaill., <i>*Plantago major</i> L. <sup>LC</sup> , <i>Platanthera bifolia</i> (L.) Rich. <sup>HD,LC</sup> , <i>*Poa annua</i> L. <sup>NT,LC</sup> , <i>Poa nemoralis</i> L., <i>Poa pratensis</i> L. <sup>LC</sup> , <i>*Pericaria hydropiper</i> (L.) Delarbre <sup>LC</sup> , <i>*Prunella vulgaris</i> L., <i>Pulmonaria obscura</i> Dumort. <sup>HD,NT,RC</sup> , <i>Pyrola rotundifolia</i> L. <sup>HD</sup> , <i>Ribes nigrum</i> L., <i>*Rumex acetosella</i> L. <sup>NT,RC,LC</sup> , <i>Salix caprea</i> L., <i>Sambucus racemosa</i> L. <sup>HD</sup> , <i>Scirpus sylvaticus</i> L. <sup>RC</sup> , <i>Scrophularia nodosa</i> L., <i>Silene viscaria</i> (L.) Jess. <sup>NT</sup> , <i>Stellaria graminea</i> L., <i>Stellaria media</i> (L.) Vill., <i>Veronica chamaedrys</i> L., <i>Veronica officinalis</i> L., <i>Viburnum opulus</i> L. <sup>NT</sup> , <i>Vicia sylvatica</i> L. <sup>HD,RC</sup> , <i>Viola rupestris</i> F. W. Schmidt <sup>HD,NT,RC</sup>
Species unique to group III (19.1 %)/ Especies exclusivas del grupo III (19.1 %)	<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull <sup>NT,RC</sup> , <i>Carex brunnescens</i> (Pers.) Poir. <sup>HD</sup> , <i>Carex globularis</i> L. <sup>HD,LC</sup> , <i>Carex vesicaria</i> L. <sup>RC,LC</sup> , <i>Dryopteris cristata</i> (L.) A. Gray <sup>RC</sup> , <i>Juncus conglomeratus</i> L. <sup>RC,LC</sup> , <i>Limnaea borealis</i> L. <sup>NT,RC</sup> , <i>Lycopodium clavatum</i> L. <sup>NT,RC</sup> , <i>Sphagnum girgensohnii</i> Russow.

Numbers in brackets are proportions of unique species of all species in a group; species unique only to the forest road (Figure 5) are marked by an asterisk (\*). Superscripts designate specialist species relative to a certain factor: HD = soil moisture, RC = soil pH, NT = soil nitrogen, LC = habitat shading.

Los números entre paréntesis son proporciones de las especies exclusivas con respecto a todas las especies en un grupo; las especies exclusivas del camino forestal (Figura 5) están marcadas con un asterisco (\*). Los superíndices designan a las especies especialistas en relación con un determinado factor: HD = humedad del suelo, RC = pH del suelo, NT = nitrógeno del suelo y LC = sombra del hábitat.

(Vargot, Khapugin, Chugunov, & Grishutkin, 2016) is located there where *Vaccinium uliginosum* L., *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Eriophorum vaginatum* L., and *Ledum palustre* L. were recorded being specialist species in relation to certain environmental factors.

Practical benefits of environmental factor gradient visualization relate to forest system management and nature conservation tasks. The first benefit concerns an opportunity to establish the basic relations of selected environmental factors in a study area. It is especially important because understory plant species are considered as a sustainable indicator tool (Abella & Shelburne, 2004; Host & Pregitzer, 1991), generally retaining these properties after violation or destruction of an ecosystem (Khapugin et al., 2016; Sterk et al., 2016). Thus, the data received using the presented methodology will remain relevant for a long time.

The second benefit relates to the forecasting possibility of the locations for specialist plants (i.

ambientales seleccionados ha sido suavizada debido al predominio de especies típicas del sistema forestal (*Convallaria majalis* L., *Asarum europaeum* L., *Molinia caerulea* (L.) Moench y *Sorbus aucuparia* L.). Por lo tanto, la influencia de las plantas ruderales y de pradera sobre los factores ambientales en el área de estudio puede considerarse mínima.

Al mismo tiempo, existe un problema para determinar la ubicación de las especies ruderales (ocasionales en este caso) utilizando el método presentado aquí. La pregunta importante es: ¿puede revelarse la ubicación de una determinada especie utilizando mapas de gradiente de los factores ambientales seleccionados? Se puede decir que es parcialmente posible. Así, los intervalos de supervivencia de la escala ecológica de Tsyganov (1983) pueden utilizarse para separar todas las especies en especialistas (especies con intervalos estrechos) y generalistas (especies con intervalos amplios) (Begon, Townsend, & Harper, 2005; Komarov & Zubkova, 2012). Como las especialistas viven en



e. plants with narrow survival intervals) in a forest ecosystem. As shown above, a habitat with extreme environmental conditions could be identified based on phytoindication data and knowledge of the coenotical preferences of a species. Predicting suitable habitats of threatened (in particular locally rare [Crain & White, 2011]) plants is a high priority for biodiversity conservation tasks, especially since these species show on average significantly narrower habitat preferences in comparison with common species (Wamelink, Goedhart, & Frissel, 2014). For instance, *Daphne mezereum* L. has been included in the additional list of the Red Data Book of the Republic of Mordovia (Silaeva, 2017). In the Mordovia State Nature Reserve this species is known in the undergrowth layer of deciduous and mixed forests (Vargot et al., 2016), i.e. it inhabits forests with relatively high soil pH and nitrogen availability. Based on Figure 3, *D. mezereum* is more likely to be found in habitats defined in group 2, i.e. in both western and/or three small areas in the eastern parts of the selected forest compartment. Indeed, *D. mezereum* was found in study plots 22 and 42 (Figure 3). Thus, although it is not completely possible to indicate the concrete location of a plant, the search area can be limited. For instance, the search area for *D. mezereum* was limited to 58.1 % – from 1.17 km<sup>2</sup> (full area of the forest compartment) to 0.68 km<sup>2</sup> (area of the forest compartment related to group 2).

Finally, the third benefit of the presented methodology is an opportunity to use phytoindication data obtained from any ecological scale used in the world (Ellenberg, Weber, Düll, Wirth, & Werner, 2001; Landolt et al., 2010; Ramenskiy et al., 1956; Tsyganov, 1983). The main requirement is the need to identify the most suitable ecological scale for a certain study area.

Despite the benefits demonstrated in this case study, it should be noted that this methodology will be more accurate if more data on mean environmental factor values is obtained in a region. In addition, it is more suitable for specialist species which can grow in habitats with less variable environmental conditions or for narrowly-specialized groups of plants (aquatic habitats, oligotrophic wetlands, among others). The presented methodology is not able to reveal localities suitable for casual plant species (e. g., ruderal, alien plants) because they are unable to influence significant changes in the environmental conditions of an undisturbed habitat. Their presence could be determined only by using floristic similarity indices.

## Conclusions

The use of phytoindication methods allows constructing maps of environmental factor gradients for a certain forest area. A map creation is not a new method but

límites estrechos de los factores ambientales, es posible reducir el área de búsqueda de una determinada planta, teniendo mapas de gradiente de los factores ambientales y el listado de especies especialistas que presumiblemente viven ahí. Por ejemplo, todos los mapas obtenidos en el presente estudio han demostrado una fuerte diferencia en el área de la parte noroeste de la sección forestal (Figuras 2 y 3); de acuerdo con los datos de fitoindicación (Figuras 2 y 4), esta es la zona más iluminada y más húmeda sobre los suelos pobres en nitrógeno y ácidos que corresponden a las turberas oligotróficas de Eurasia (Wheeler & Proctor, 2000). Tales condiciones ambientales fueron reveladas en la parte noroeste del área de estudio que contiene parcelas del grupo 1. De hecho, la ciénaga oligotrófica dominada por *Sphagnum-Eriophorum* (Vargot, Khapugin, Chugunov, & Grishutkin, 2016) está localizada donde se registraron *Vaccinium uliginosum* L., *Carex lasiocarpa* Ehrh., *Eriophorum vaginatum* L., y *Ledum palustre* L., siendo especies especialistas en relación con ciertos factores ambientales.

Los beneficios prácticos de la visualización del gradiente de factores ambientales están relacionados con la gestión del sistema forestal y las tareas de conservación de la naturaleza. El primer beneficio se refiere a la oportunidad de establecer las relaciones básicas de los factores ambientales seleccionados en un área de estudio. Esto es especialmente importante porque las especies de plantas del sotobosque son consideradas como un instrumento indicador sostenible (Abella & Shelburne, 2004; Host & Pregitzer, 1991) y, generalmente, conservan tales propiedades después de la violación o destrucción de un ecosistema (Khapugin et al., 2016; Sterk et al., 2016). Así, los datos recibidos utilizando la metodología presentada seguirán siendo pertinentes durante mucho tiempo.

El segundo beneficio se relaciona con la posibilidad de pronosticar las localizaciones de las plantas especialistas (es decir, plantas con intervalos de supervivencia estrechos) en un ecosistema forestal. Como se mostró anteriormente, un hábitat con condiciones ambientales extremas podría ser identificado con base en datos de fitoindicaciones y conocimiento de las preferencias ecológicas de una especie. La predicción de hábitats adecuados de plantas amenazadas (en particular, plantas localmente raras [Crain & White, 2011]) es una alta prioridad para las tareas de conservación de la biodiversidad, especialmente porque estas especies muestran en promedio preferencias de hábitat significativamente más estrechas en comparación con las especies comunes (Wamelink, Goedhart, & Frissel, 2014). Por ejemplo, *Daphne mezereum* L. ha sido incluida en la lista adicional del Libro Rojo de Datos de la República de Mordovia (Silaeva, 2017). En la Reserva Natural Estatal de Mordovia, esta especie es conocida en

combined with species similarity indices it could be used for predicting habitat suitability for threatened plant species. It is especially important due to some threatened plants being able to lead an underground life under unfavorable conditions. Values of environmental factors can be used for map construction based on any existing ecological scales. First, the most appropriate ecological scale should be adequately determined for a certain study. Secondly, the fieldwork procedure should be accurately followed using an appropriate method depending on the selected ecological scale.

#### *End of English version*

### References / Referencias

- Abella, S. R., & Shelburne, V. B. (2004). Ecological species groups of South Carolina's Jocassee Gorges, southern Appalachian Mountains. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 131(3), 220–231. doi: 10.2307/4126952
- Bayanov, N. G. (2015). Climate changes of the northwest of Mordovia during the period of existence of the Mordovia Reserve according to the meteorological observations in Temnikov. *Proceedings of the Mordovia State Nature Reserve*, 14, 212–219. Retrieved from <https://elibrary.ru/item.asp?id=23032832>
- Bednova, O. V. (2014). Ecological standardization and indication technology of the forest ecosystems state in urban specially protected natural areas. *Forestry Bulletin*, 6, 36–52. Retrieved from <https://elibrary.ru/item.asp?id=22648766>
- Begon, M., Townsend, C. R., & Harper, J. L. (2005). *Ecology: From Individuals to Ecosystems*. Malden, MA, USA: Wiley-Blackwell.
- Budzáková, M., Galvanek, D., Littera, P., & Sibik, J. (2013). The wind and fire disturbance in Central European mountain spruce forests: the regeneration after four years. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 82(1), 13–24. doi: 10.5586/asbp.2013.002
- Crain, B. J., & White, J. W. (2011). Categorizing locally rare plant taxa for conservation status. *Biodiversity and Conservation*, 20(3), 451–463. doi: 10.1007/s10531-010-9929-3
- Cui, B. S., Zhai, H. J., Dong, S. K., Chen, B., & Liu, S. L. (2009). Multivariate analysis of the effects of edaphic and topographical factors on plant distribution in the Yilong lake basin of Yun-Gui Plateau, China. *Canadian Journal of Plant Science*, 89(1), 209–219. doi: 10.4141/CJPS08013
- Dubuis, A., Rossier, L., Pottier, J., Pellissier, L., Vittoz, P., & Guisan, A. (2013). Predicting current and future spatial community patterns of plant functional traits. *Ecography*, 36(11), 1158–1168. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.00237.x
- Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., Wirth, V., & Werner, W. (2001). Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa,

la capa de sotobosque de bosques caducifolios y mixtos (Vargot et al., 2016); es decir, habita en bosques con pH del suelo y disponibilidad de nitrógeno relativamente altos. Con base en la Figura 3, es más probable que *D. mezereum* se encuentre en hábitats definidos en el grupo 2, es decir, tanto en áreas occidentales como en tres áreas pequeñas en las partes orientales de la sección forestal seleccionada. De hecho, *D. mezereum* se encontró en las parcelas bajo estudio 22 y 42 (Figura 3). Así, aunque no es completamente posible indicar la ubicación concreta de una planta, el área de búsqueda puede limitarse. Por ejemplo, el área de búsqueda de *D. mezereum* se limitó 58.1 %, partiendo de 1.17 km<sup>2</sup> (área completa de la sección forestal) a 0.68 km<sup>2</sup> (área de la sección forestal relacionada con el grupo 2).

Finalmente, el tercer beneficio de la metodología presentada es la oportunidad de utilizar datos de fitoindicaciones obtenidos de cualquier escala ecológica utilizada en el mundo (Ellenberg, Weber, Düll, Wirth, & Werner, 2001; Landolt et al., 2010; Ramenskiy et al., 1956; Tsyganov, 1983). El principal requerimiento es la necesidad de identificar la escala ecológica más adecuada para un área de estudio determinada.

A pesar de los beneficios demostrados en este caso de estudio, cabe señalar que esta metodología será más precisa si se obtienen más datos sobre los valores medios de los factores ambientales en una región. Además, es más adecuada para especies especializadas que pueden crecer en hábitats con condiciones ambientales menos variables o para grupos de plantas altamente especializadas (hábitats acuáticos, humedales oligotróficos, entre otros). La metodología presentada no es capaz de indicar localidades adecuadas para especies de plantas introducidas (v. g. plantas ruderales y exóticas) porque no pueden influir en cambios significativos en las condiciones ambientales de un hábitat no perturbado. Su presencia solo podría determinarse utilizando índices de similitud florística

### Conclusiones

El uso de métodos de fitoindicación permite elaborar mapas de gradientes de factores ambientales para un área forestal determinada. La creación de un mapa no es un método nuevo, pero en combinación con índices de similitud de especies podría utilizarse para predecir la idoneidad del hábitat para especies vegetales amenazadas. Esto es de especial relevancia debido a que algunas plantas amenazadas pueden llevar una vida subterránea en condiciones desfavorables. Los valores de los factores ambientales pueden usarse para la elaboración de mapas basados en cualquier escala ecológica existente. Primero, la escala ecológica más apropiada debe determinarse adecuadamente para un estudio dado. En segundo lugar, el procedimiento

- 3., durch gesehene Aufl. *Scripta Geobotanica*, 18, 1–261. Retrieved from <http://www.ecology.uni-jena.de/ecologymedia/Zeigerwerte-p-2094.pdf>
- Gebremedihin, K. M., Birhane, E., Tadesse, T., & Gbrehahid, H. (2018). Restoration of degraded drylands through exclosures enhancing woody species diversity and soil nutrients in the highlands of Tigray, Northern Ethiopia. *Nature Conservation Research*, 3(1), 1–20. doi: 10.24189/ncr.2018.001
- Goebel, P. C., Palik, B. J., Kirkman, L. K., Drew, M. B., West, L., & Pederson, D. C. (2001). Forest ecosystems of a Lower Gulf Coastal Plain landscape: multifactor classification and analysis. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 128(1), 47–75. Retrieved from [https://www.ncrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2001/nc\\_2001\\_goebel\\_002.pdf](https://www.ncrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2001/nc_2001_goebel_002.pdf)
- Gusev, A. P. (2009). Specific features of early stages of progressive succession in an anthropogenic landscape: An example from southeastern Belarus. *Russian Journal of Ecology*, 40(3), 160–165. doi: 10.1134/S1067413609030035
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 9. Retrieved from [http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/past.pdf](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf)
- Host, G. E., & Pregitzer, K. S. (1991). Ecological species groups for upland forest ecosystems of northwestern Lower Michigan. *Forest Ecology and Management*, 43(1-2), 87–102. doi: 10.1016/0378-1127(91)90078-A
- Jaccard, P. (1901). Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et du Jura. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles*, 37, 547–549. Retrieved from [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e0/%C3%89tude\\_comparative\\_de\\_la\\_distribution\\_florale\\_dans\\_une\\_portion\\_des\\_Alpes\\_et\\_du\\_Jura.pdf](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e0/%C3%89tude_comparative_de_la_distribution_florale_dans_une_portion_des_Alpes_et_du_Jura.pdf)
- Jarema, S. I., Samson, J., McGill, B. J., & Humphries, M. M. (2009). Variation in abundance across a species' range predicts climate change responses in the range interior will exceed those at the edge: A case study with North American beaver. *Global Change Biology*, 15(2), 508–522. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01732.x
- John, R., Dalling, J. W., Harms, K. E., Yavitt, J. B., Stallard, R. F., Mirabello, M., Hubbell, S. P., ... Foster, R. B. (2007). Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(3), 864–869. doi: 10.1073/pnas.0604666104
- Khan, W., Khan, S. M., Ahmad, H., Ahmad, Z., & Page, S. (2016). Vegetation mapping and multivariate approach to indicator species of a forest ecosystem: A case study from the Thandiani sub Forests Division (TsFD) in the Western Himalayas. *Ecological Indicators*, 71, 336–351. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.06.059
- Khapugin, A. A., Vargot, E. V., & Chugunov, G. G. (2016). Vegetation recovery in fire-damaged forests: A case study at the southern boundary of the taiga zone. *Forestry Studies*, 64, 39–50. doi: 10.1515/fsmu-2016-0003
- de trabajo de campo debe seguirse con precisión utilizando un método apropiado dependiendo de la escala ecológica seleccionada.

### Fin de la versión en español

- Khapugin, A. A. (2017). *Hieracium sylvularum* (Asteraceae) in the Mordovia State Nature Reserve: invasive plant or historical heritage of the flora? *Nature Conservation Research*, 2(4), 40–52. doi: 10.24189/ncr.2017.013
- Khapugin, A. A., Silaeva, T. B., Vargot, E. V., Chugunov, G. G., Grishutkina, G. A., Grishutkin, O. G., ... Orlova, Ju. S. (2017). Estimation of taxa included in the first volume of the Red Data Book of the Republic of Mordovia (Russia) using the IUCN Red List Categories and Criteria. *Nature Conservation Research*, 2(1), 164–189. doi: 10.24189/ncr.2017.004
- Khapugin, A. A., & Astashkina, I. Yu. (2018). Towards inventory of the vegetation cover of the Mordovia State Nature Reserve. *Proceedings of the Mordovia State Nature Reserve*, 20, 203–216. Retrieved from <https://elibrary.ru/item.asp?id=32454013>
- Komarov, A. S., & Zubkova, E. V. (2012). Dynamics of a distribution of ecological niches in plant communities at succession. *Mathematical Biology and Bioinformatics*, 7(1), 152–161. Retrieved from <http://www.mathnet.ru/links/03853044ecf19b1ca6b299aaf24164ac/mbb95.pdf>
- Konollová, I., & Chytrý, M. (2004). Oak hornbeam forests of the Czech Republic: geographical and ecological approach to vegetation classification. *Preslia*, 76, 291–311. Retrieved from <http://www.preslia.cz/P044CKno.pdf>
- Kuznetsov, N. I. (2014). The conditions of existence and main features of the vegetation cover structure on the territory of Mordovia State Reserve. 1939 year. *Proceedings of the Mordovia State Nature Reserve*, 12, 79–195. Retrieved from <https://elibrary.ru/item.asp?id=21246904>
- Landolt, E., Bäumler, B., Erhardt, A., Hegg, O., Klötzli, F., Lämmler, W., ... Wohlgemuth, T. (2010). *Ecological indicator values and biological attributes of the flora of Switzerland and the Alps*. Bern, Switzerland: Haupt.
- Lennon, J. J., Beale, C. M., Reid, C. L., Kent, M. & Pakeman, R. J. (2011). Are richness patterns of common and rare species equally well explained by environmental variables? *Ecography*, 34(4), 529–539. doi: 10.1111/j.1600-0587.2010.06669.x
- Pajunen, A. M., Kaarlejärvi, E. M., Forbes, B. C., & Virtanen, R. (2010). Compositional differentiation, vegetation-environment relationships and classification of willow-characterized vegetation in the western Eurasian Arctic. *Journal of Vegetation Science*, 21(1), 107–119. doi: 10.1111/j.1654-1103.2009.01123.x



- Popov, S. Y., & Makukha, Y. A. (2019). Distribution patterns of *Ptilium crista-castrensis* (Bryophyta, Hypnaceae) in the East European Plain and Eastern Fennoscandia. *Nature Conservation Research*, 4(1), 93–98. doi: 10.24189/ncr.2019.007
- Pottier, J., Dubuis, A., Pellissier, L., Maiorano, L., Rossier, L., Randin, C. F., ...Guisan, A. (2013). The accuracy of plant assemblage prediction from species distribution models varies along environmental gradients. *Global Ecology and Biogeography*, 22(1), 52–63. doi: 10.1111/j.1466-8238.2012.00790.x
- Potts, M. D., Ashton, P. S., Kaufman, L. S., & Plotkin, J. B. (2002). Habitat patterns in tropical rain forests: a comparison of 105 plots in northwest Borneo. *Ecology*, 83, 2782–2797. doi: 10.1890/0012-9658(2002)083[2782:HPITRF]2.0.CO;2
- Priputina, I., Zubkova, E., Shanin, V., Smirnov, V., & Komarov, A. (2014). Evidence of plant biodiversity changes as a result of nitrogen deposition in permanent pine forest plots in central Russia. *Ecoscience*, 21(3–4), 286–300. doi: 10.2980/21-(3-4)-3681
- Priputina, I. V., Zubkova, E. V., & Komarov, A. S. (2015). Retrospective assessment of the dynamics of nitrogen availability in pine forests of the Near-Moscow Region based on the data of phytointication. *Contemporary Problems of Ecology*, 8(7), 916–924. doi: 10.1134/S1995425515070112
- Ramenskiy, L. G., Tsatsenkin, I. A., Chijikov, O. N., & Antipin, N. A. (1956). *Ecological evaluation of natural grasslands by the use of vegetation cover*. Moscow: Selkhozgiz. Retrieved from [http://sinref.ru/000\\_uchebniki/04800selskoe/039\\_ekologicheskaiia\\_ocenka\\_kormovih\\_ugodii\\_ramenski\\_1956/000.htm](http://sinref.ru/000_uchebniki/04800selskoe/039_ekologicheskaiia_ocenka_kormovih_ugodii_ramenski_1956/000.htm)
- Seregin, A. P. (2014). Further east: eutrophication as a major threat to the flora of Vladimir Oblast, Russia. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(22), 12883–12897. doi: 10.1007/s11356-014-3152-9
- Silaeva, T. B. (2017). *Red data book of the Republic of Mordovia. Vol. 1: Rare plants and fungi* (2<sup>nd</sup> ed.). Saransk: Publisher of the Mordovia State University. Retrieved from <http://nature-mordovia.ru/index.php/krasnaya-kniga?id=654>
- Smirnova, O. V., Lugovaya, D. V., & Prokazina, T. S. (2013). Model reconstruction of restored taiga forest cover. *Biology Bulletin Reviews*, 3(6), 493–504. doi: 10.1134/S207908641306008X
- StatSoft, Inc. (2007). STATISTICA for Windows. Data Analysis Software System, version 8.0. Tulsa, OK, USA: Author.
- Sterk, M., Gort, G., De Lange, H., Ozinga, W., Sanders, M., Van Looy, K., & Van Teeffelen, A. (2016). Plant trait composition as an indicator for the ecological memory of rehabilitated floodplains. *Basic and Applied Ecology*, 17(6), 479–488. doi: 10.1016/j.baae.2016.05.002
- Golden Software Inc. (2012). Surfer mapping system. v. 11.1.719 software. USA Author. Retrieved from <http://www.goldensoftware.com/products/surfer/>
- Tereshkin, I. S., & Tereshkina, L. V. (2006). Vegetation of the Mordovia Reserve. Successive series of the successions. *Proceedings of the Mordovia State Nature Reserve*, 7, 186–287. Retrieved from [http://zapoved-mordovia.ru/biblio/trudy\\_mgpz\\_VII\\_2006.djvu](http://zapoved-mordovia.ru/biblio/trudy_mgpz_VII_2006.djvu)
- Tsyganov, D. N. (1983). *Phytoindication of ecological regimes in the mixed coniferous-broad-leaved forest subzone*. Moscow: Nauka.
- Vargot, E. V., Khapugin, A. A., Chugunov, G. G., & Grishutkin, O. G. (2016). *Vascular plants of the Mordovia State Nature Reserve (an annotated species list)*. Moscow: Commission of RAS on biodiversity conservation; IPEE RAS. Retrieved from [http://zapoved-mordovia.ru/uploads/images/nauchnaia-rabota/izdania-zapovednika/1%20Flora\\_Combine.pdf](http://zapoved-mordovia.ru/uploads/images/nauchnaia-rabota/izdania-zapovednika/1%20Flora_Combine.pdf)
- Wamelink, G. W. W., Goedhart, P. W., & Frissel, J. Y. (2014). Why some plant species are rare. *PLoS ONE*, 9(7), e102674. doi: 10.1371/journal.pone.0102674
- Wheeler, B. D., & Proctor, M. C. F. (2000). Ecological gradients, subdivisions and terminology of north-west European mires. *Journal of Ecology*, 88(2), 187–203. doi: 10.1046/j.1365-2745.2000.00455.x