



Kartografické modelování

Multikriteriální analýza

jaro 2023

Petr Kubíček

kubicek@geogr.muni.cz

**Laboratory on Geoinformatics and Cartography (LGC)
Institute of Geography
Masaryk University
Czech Republic**

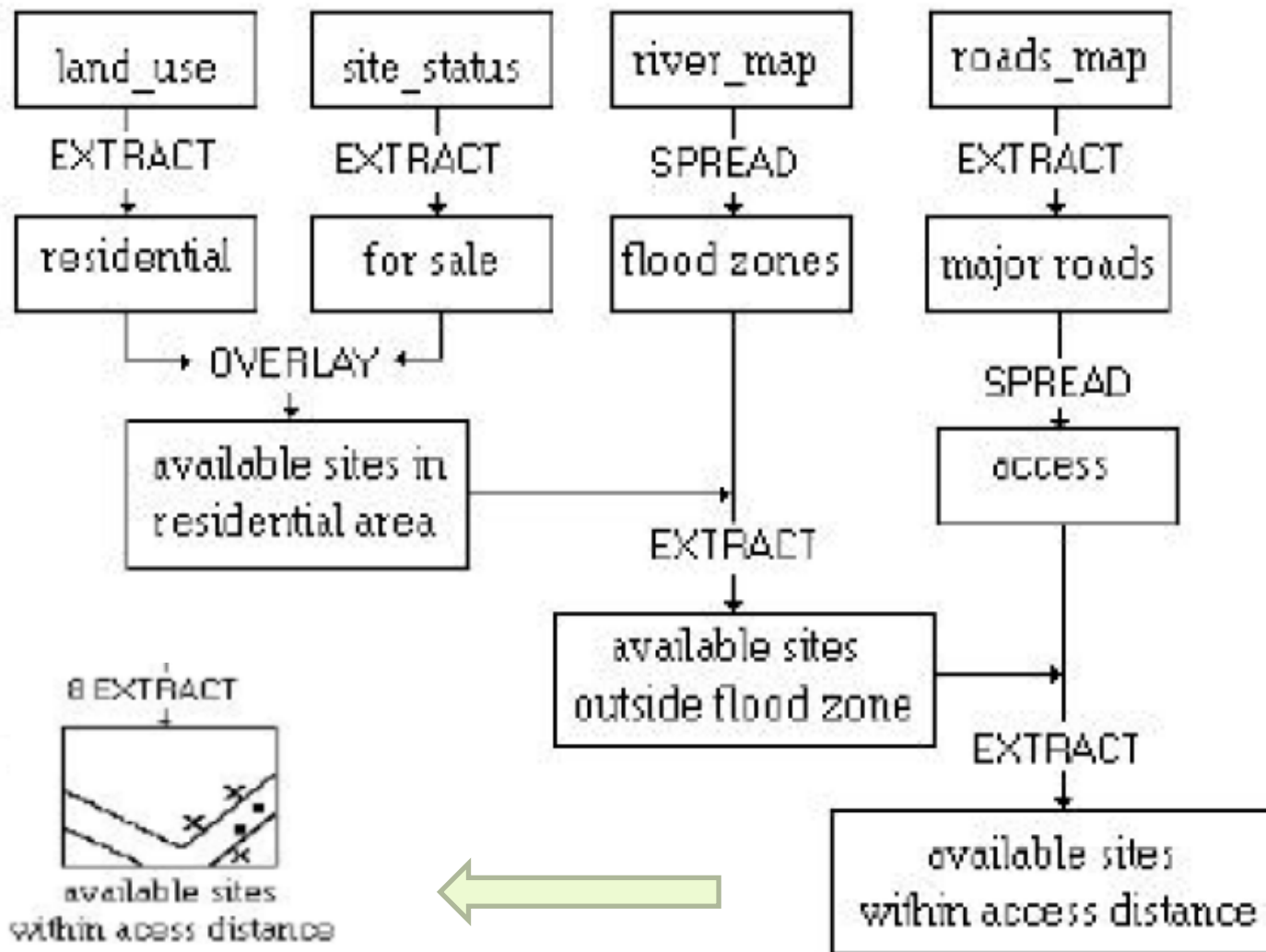
Motivace

- GIS pomáhá rozhodování – geoDSS
- Vstupní přednáška do **multikriteriálního** hodnocení pomocí příkladů.
- Využití **multikriteriálního** hodnocení při rozhodování.
- Doposud jsme se zabývali možnostmi analytických nástrojů GIS z pohledu prostorových analýz:
 - Popis datových sad a jejich analýzy
 - Návrhy (predikce) do budoucna.
 - Zjištění vhodnosti vybraných lokalit (*site suitability*).
- Při analýze byly brány do úvahy určitá kritéria (přednáška č. 1)



Výběr vhodného místa pro obchodní středisko

Table 2 presents four of the equations it would be necessary to solve as part of the process of finding a suitable site for the supermarket.





Multikriteriální hodnocení

- Náš příklad identifikoval **VŠECHNY** oblasti, které splňovaly zadaná kritéria.
- Neřekl nám, která z oblastí je **nejvhodnější** pro postavení obchodního centra.
- Multikriteriální hodnocení - **Multi-criteria evaluation (MCE)** je způsob hodnocení **celkové vhodnosti lokalit** splňujících zadaná kritéria a vybraných pomocí standardní GIS overlay analýzy.
- Carver, 1991 (Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems)

Co je to MCE?

- MCE je **sada technik** používaných ke kompromisnímu výběru alternativních lokalit.
- Cílem MCE je identifikovat **lokalitu nejlépe vyhovující požadavkům** (minimální kompromis) a splňující zadaná kritéria.
- **Techniky MCE byly vytvořeny původně v environmentální ekonomice a tedy použity neprostorovým způsobem.**
- Následně byly adaptovány pro využití v GIS, aby poskytly **formální základ pro pomoc při rozhodování.**



Základní požadavky MCE

- „prozkoumat více možností výběru lokalit ve světle rozlišných kritérií a s konfliktními požadavky“...
- **Cíl:** „... tvrzení o požadovaném stavu výsledného prostorového systému“.
- **Kritérium:** „...pravidlo pro určení vhodnosti pro alternativní rozhodnutí“.
- **Atribut:** „... vlastnost prvků reálného světa či GIS“.
- **Malczewski (1999) - GIS and Multicriteria decision making.**

Co to má znamenat?

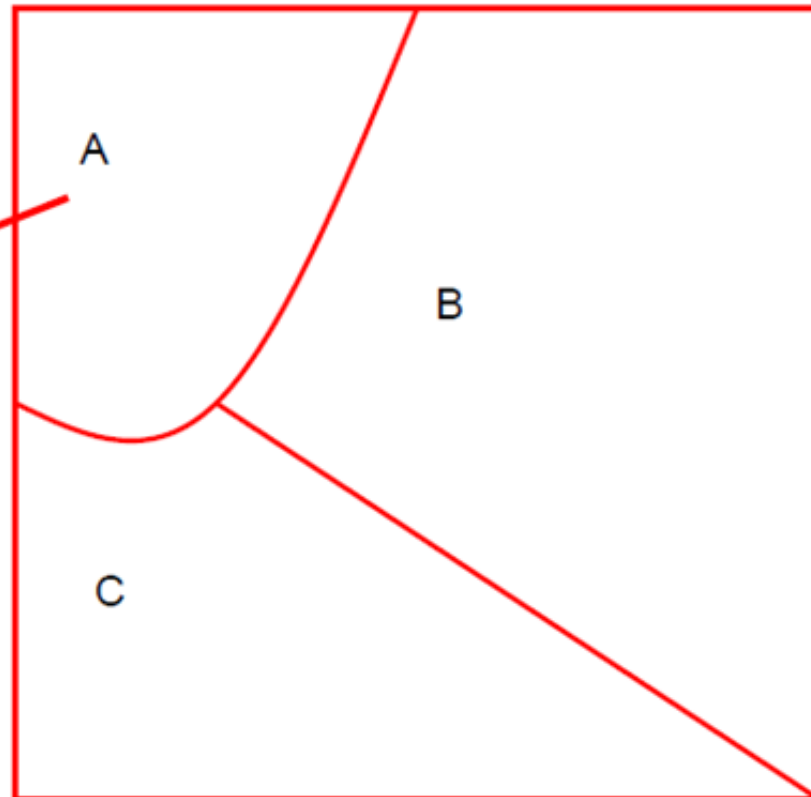
- **MCE používá kritéria k identifikaci lokalit (popsaných atributy), které nejlépe vyhovují cílům.**
- **Například:**
 - **Cíl:** „... potřebuji lokalitu pro výstavbu obytných domů (jsem developer)“.
 - **Kritérium:** „...Domy musí být **blízko** kina, **daleko** od hlavních silnic a **blízko** veřejné dopravě“.
 - **Atribut:** Data, potřebná pro popis výše uvedených kritérií.
- **Zjevný konflikt – daleko od hlavní silnice x blízko hromadné dopravě.**

Modelová situace

- Všechny následující příklad používají zjednodušená data – tři potenciální oblasti popsané pomocí **atributů vzdáleností od kina, veřejné dopravy a hlavní silnice.**

Které z míst je nejvhodnější?

Lokalita A
Blízko kina
Blízko autobusu
Daleko od silnice



Boolean overlay

- **Kritérium** – lokalita je vhodná nebo ne – např. musí být do 1 km od kina.
- **Výsledek** – lokalita, která splňuje všechna kritéria.
- Pravidlo **dominance** (viz přednáška Overlay).
- **Je výhodné, pokud máme hodně lokalit pro prvotní analýzu a odstraní nám lokality zcela nevhodné.**

MODELOVÝ PŘÍKLAD:

- *Budovy musí být **méně než 2km** od kina a **více než 300m** od silnice a **do vzdálenosti 200m** od veřejné dopravy.*



Příklad Boolean overlay

Distance from
cinema (km)



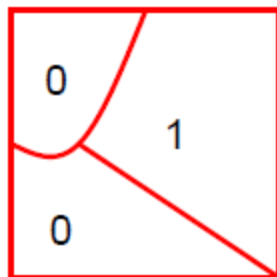
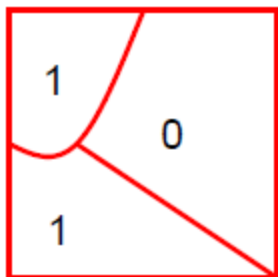
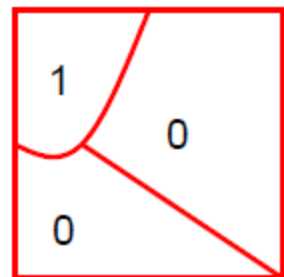
Distance from
road (km)



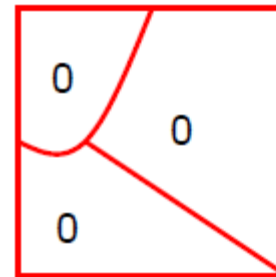
Distance from
public transport (km)



Houses must be **less than 2km** from cinema and **more than 300m** from road and **within 200m** of public transport



Boolean
layers



Intersection

Kartografické modelování

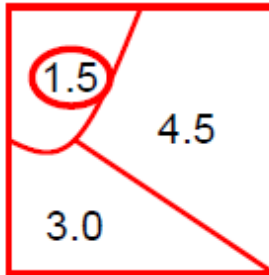
Konjunktivní X disjunktivní



Vážená lineární kombinace

- Jednotlivé hodnoty proměnných jsou **standardizovány** (nejvyšší hodnota je ta nejvhodnější).
- Kritériím jsou přiřazeny **váhy** podle předpokládané důležitosti.
- Pro jednotlivé datové vrstvy jsou připraveny **mapy nominální vhodnosti**.
- Lokality s nejvyšším výsledkem (**součtem**) jsou nejvíce vhodné.
- Předpokládáme, že **vhodnost je lineární** v celé škále a **proměnné jsou nezávislé**.

Distance from cinema



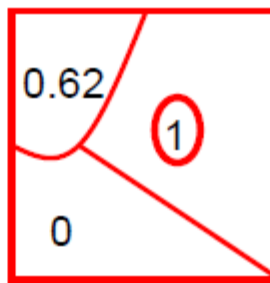
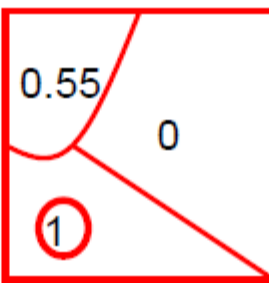
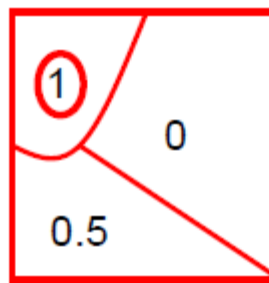
Distance from road



Distance from public transport

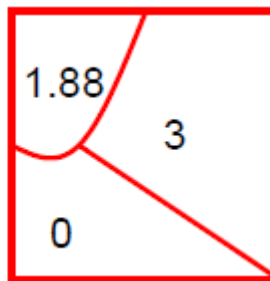
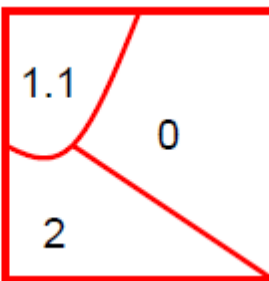
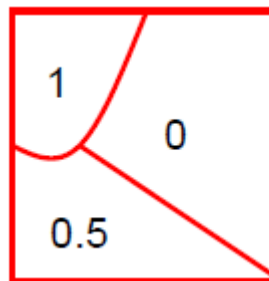


Layers have values between 0 and 1, 1 is most suitable, 0 least

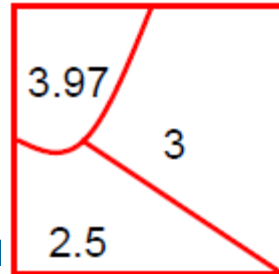


Standardised layers

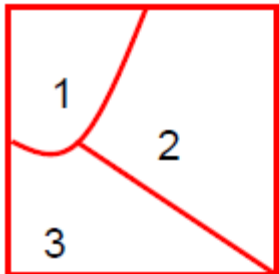
Weights are 1 for cinema, 2 for roads and 3 for public transport



Weighted



Sum of layers



Ranking



Analytická hierarchie (AHP)

- Poskytuje formální bázi pro přiřazení vah – pracuje s hodnotami **relativní důležitosti** v rozsahu 1 – 9.
- 1 = proměnná má malou důležitost, 9 = nejvyšší důležitost.
- Reciproční vztah pro méně důležité proměnné.
- **Váha = 1 / suma sloupce a celkový součet = 1**
- **Veřejná doprava má absolutní důležitost.**

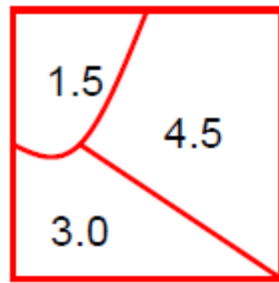
	Cinema	Road	Public transport
Cinema	1	1/2	1/9
Roads	2	1	1/3
Public transport	9	3	1

Pouze tuto část potřebujeme

Weights	
Cinema	0.083 (i.e. $1/(1 + 2 + 9)$)
Roads	0.222
Public transport	0.692



Distance from cinema



Distance from road



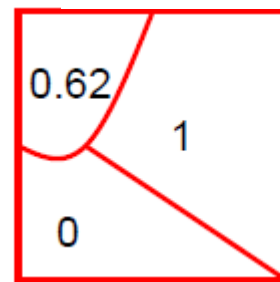
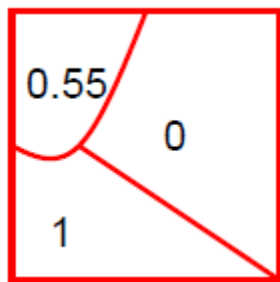
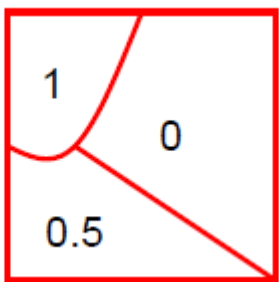
Distance from public transport



Weights

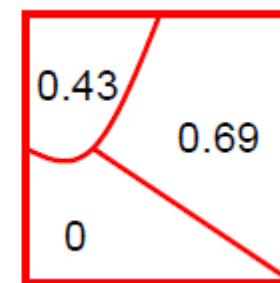
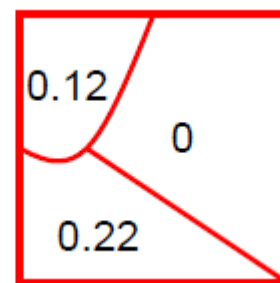
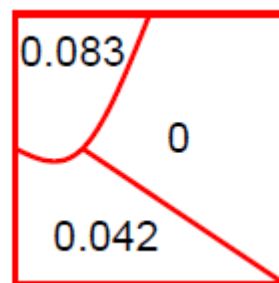
Cinema 0.083 (i.e. $1/(1 + 2 + 9)$)
 Roads 0.222
 Public transport 0.692

Layers have values between 0 and 1, 1 is most suitable, 0 least



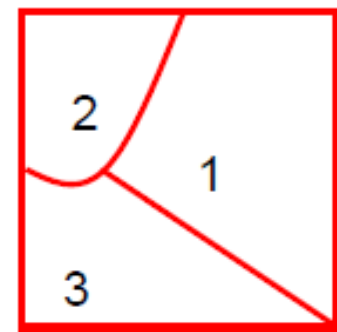
Standardised layers

Weights are as calculated on last slide



Weighted

Sum of layers



Ranking

Metoda ideálních bodů

- Bere do úvahy **vzdálenost** vybraného řešení od ideálního řešení.
- Musíme stanovit ideální řešení a vypočítat vzdálenost naší alternativy pomocí **metriky měření vzdáleností** (jaké metriky na měření vzdáleností můžeme použít v GIS?).

$$s_{i+} = \left[\sum_j w_j^p (v_{ij} - v_{+j})^p \right]^{1/p}$$

where s_{i+} is the separation of the i th alternative from the ideal point

w_j^p is the weight of attribute j

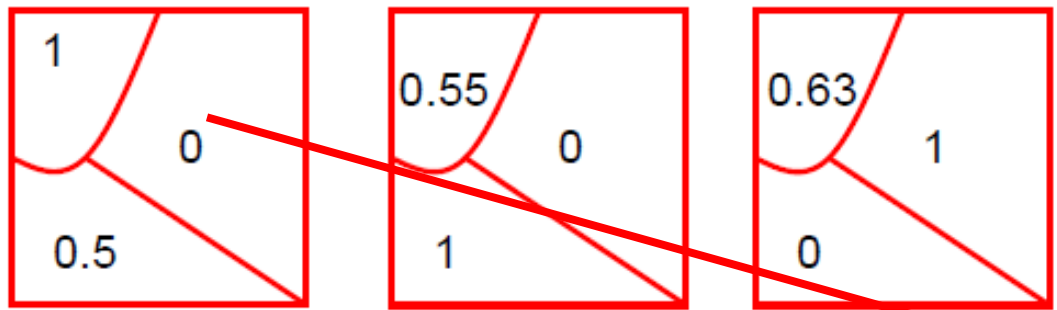
v_{ij} is the standardised value of attribute j for site i

v_{+j} is the ideal value of attribute j

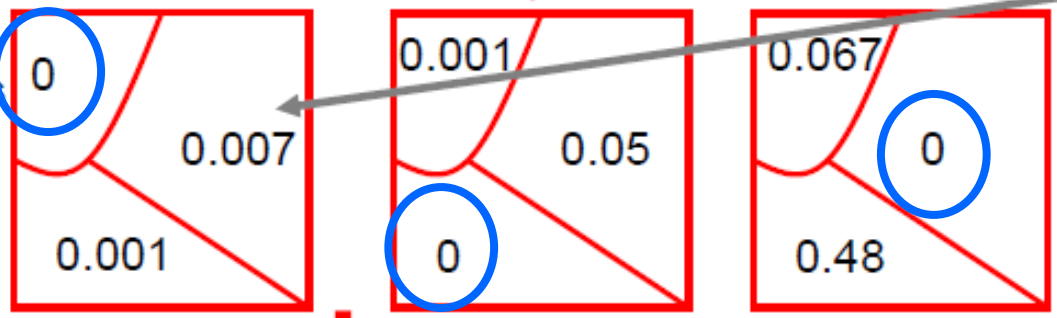
p is a power parameter between 1 and ∞

Popis proměnných

- Parametr síly **P** určuje **metodu pro měření vzdáleností** – $p=1$ (Manhattan), $p=2$ (Euklides).
- S narůstajícím P roste důležitost malých rozdílů.
- Několik způsobů **implementace** (Malczewski, 1999; Quin, 2013).
- Možnost využít standardizovaných vrstev a přijmout tvrzení, že **ideální řešení je rovno maximální hodnotě (1)**.
- Nejlepší řešení je potom takové, které je nejbližší v **m-rozměrném prostoru**, kde $m =$ počet atributů).

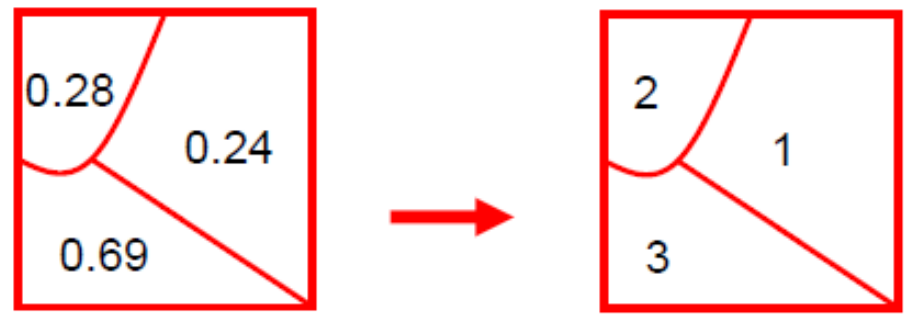


Standardised values (Here 1 is the ideal value)



Weights as in AHP

$(0.083)^2 \times (0 - 1)^2 = 0.007$
 $S_{i+} = w^p (v_{ij} - v_{+j})^p$
 p=2 here



$$\sqrt{\sum S_{i+}}$$

$$s_{i+} = \left[\sum_j w_j^p (v_{ij} - v_{+j})^p \right]^{1/p}$$

Ranking

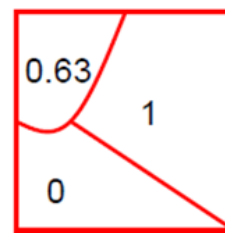
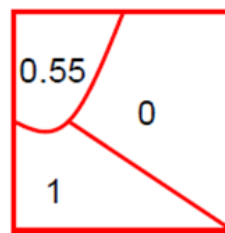
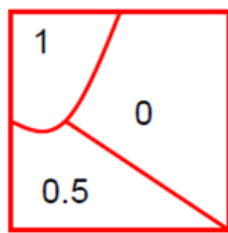
	Weights
Cinema	0.083 (i.e. $1/(1 + 2 + 9)$)
Roads	0.222
Public transport	0.692

Metoda shody

- Metoda řadí jednotlivé lokality podle shody dvojic jednotlivých alternativ.
- Každé kritérium je srovnáno pro dvojici lokalit (např. je lokalita A blíže ke kinu, než lokalita B?).
- Výstup je uložen do konkordanční **matice** v podobě sumy **vah těch kritérií, která jsou lepší** (použity váhy z AHP).
- Výsledná matice je použita k výpočtu celkového pořadí lokalit (může být částečné, některé lokality se mohou rovnat.)

Příklad výpočtu

Weights
 Cinema 0.083 (i.e. $1/(1 + 2 + 9)$)
 Roads 0.22
 Public transport 0.69



Cinema

Roads

Public transport

Site A	1	0.55	0.63
Site B	0	0	1
Site C	0.5	1	0
Weights	0.083	0.222	0.692

These values are the raw values for the layers

	Site A	Site B	Site C	Sum	Ranking
Site A	-	0.305	0.775	1	2
Site B	0.692	-	0.692	1.384	1
Site C	0.222	0.305	-	0.527	3

Site A is better than Site B for cinema and roads – so value is $0.083+0.222$

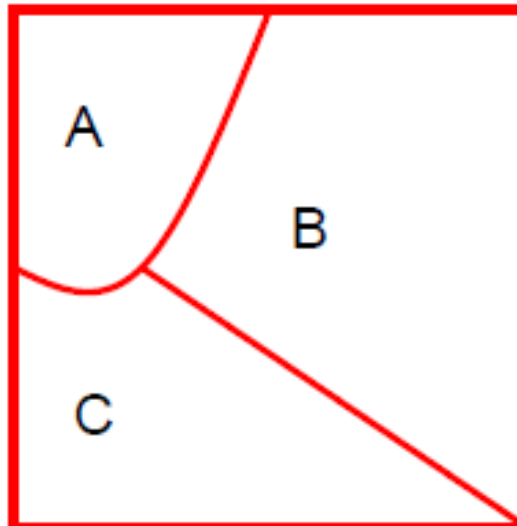
Site A is better than Site C for cinema and public transport – so value is $0.083+0.692$

Site B is better than Site A for public transport – so value is 0.692



Srovnání výsledků metod

Method	Site A	Site B	Site C	
Boolean	0	0	0	} <i>Site rankings, 1 is best...</i>
Weighted	1	2	3	
AHP	2	1	3	
Ideal point	2	1	3	
Concordance	2	1	3	



Kartografické modelov.

Proti:

- Dynamické problémy jsou zjednodušené, lineární model.
- Statické, postrádá časový rozměr.
- Kontroverzní – příliš subjektivní?

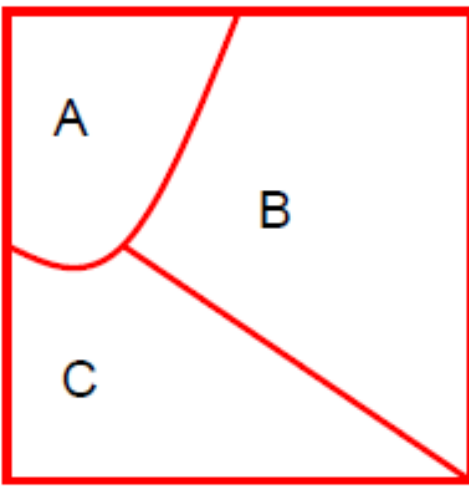
MCE – pro a proti

Pro:

- Strukturovatelná a opakovatelná analýza.
- Možnost užití různých hodnotících faktorů a zdůvodnit jejich užití.
- Schopnost zpracovat velké množství informací.
- Funguje!

Dobrá kritéria, správná data, analýza citlivosti

Srovnání výsledků metod



- Různé metody multikriteriální analýzy dávají odlišné výsledky.

Method	Site A	Site B	Site C	
Boolean	0	0	0	} <i>Site rankings, 1 is best...</i>
Weighted	1	2	3	
AHP	2	1	3	
Ideal point	2	1	3	
Concordance	2	1	3	



Příklad MCE (Estoque, Murayama, 2010)

Analýza vhodnosti lokalit pro pěstování včel v oblasti La union, Philippines,

- Cíl:
 - **přípravit mapu ukazující lokality vhodné pro pěstování včel.**

- Kritéria:

Faktory

- *Kategorická data*
 - **Land use/cover – hodnoty vhodnosti (0-255) přiřazené jednotlivým kategoriím na základě toho, zda daná kategorie poskytuje nektar a pyl.**
- *Souvislá data – pravidla standardizace (?)*
 - **Vzdálenost k vodnímu toku – standardizováno to 0-255 : vhodnost klesá se vzdáleností od řeky.**
 - **Vzdálenost od silnice – standardizováno to 0-255 : vhodnost klesá se vzdáleností (počínaje hodnotou obálky 25 m).**
 - **Nadmořská výška – standardizováno to 0-255 : vhodnost klesá s rostoucí nadmořskou výškou.**

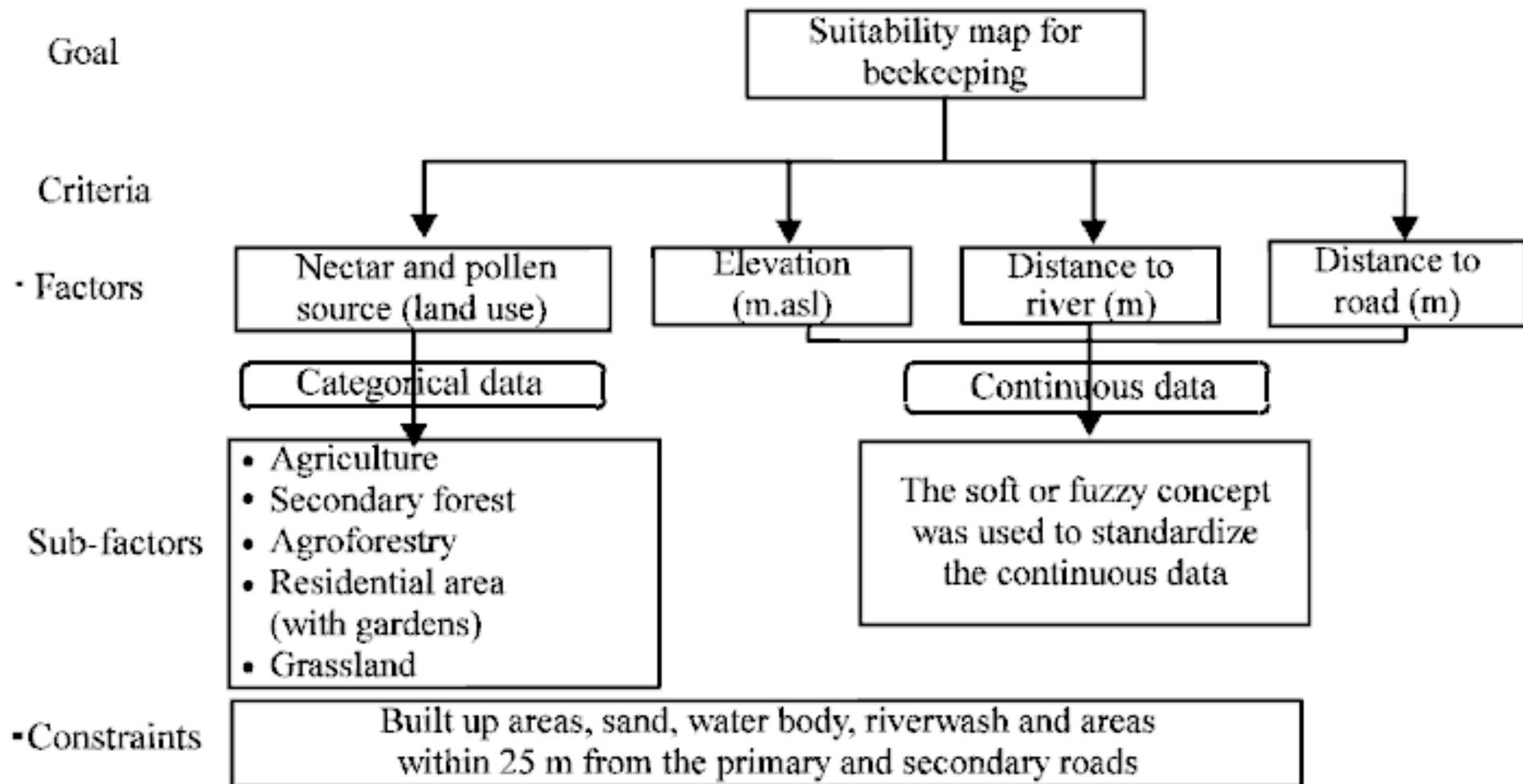
Omezení

- Zastavěné oblasti, písek, vodní plochy mokřady a oblasti do 25 metrů od silnice.

Kartografické modelování

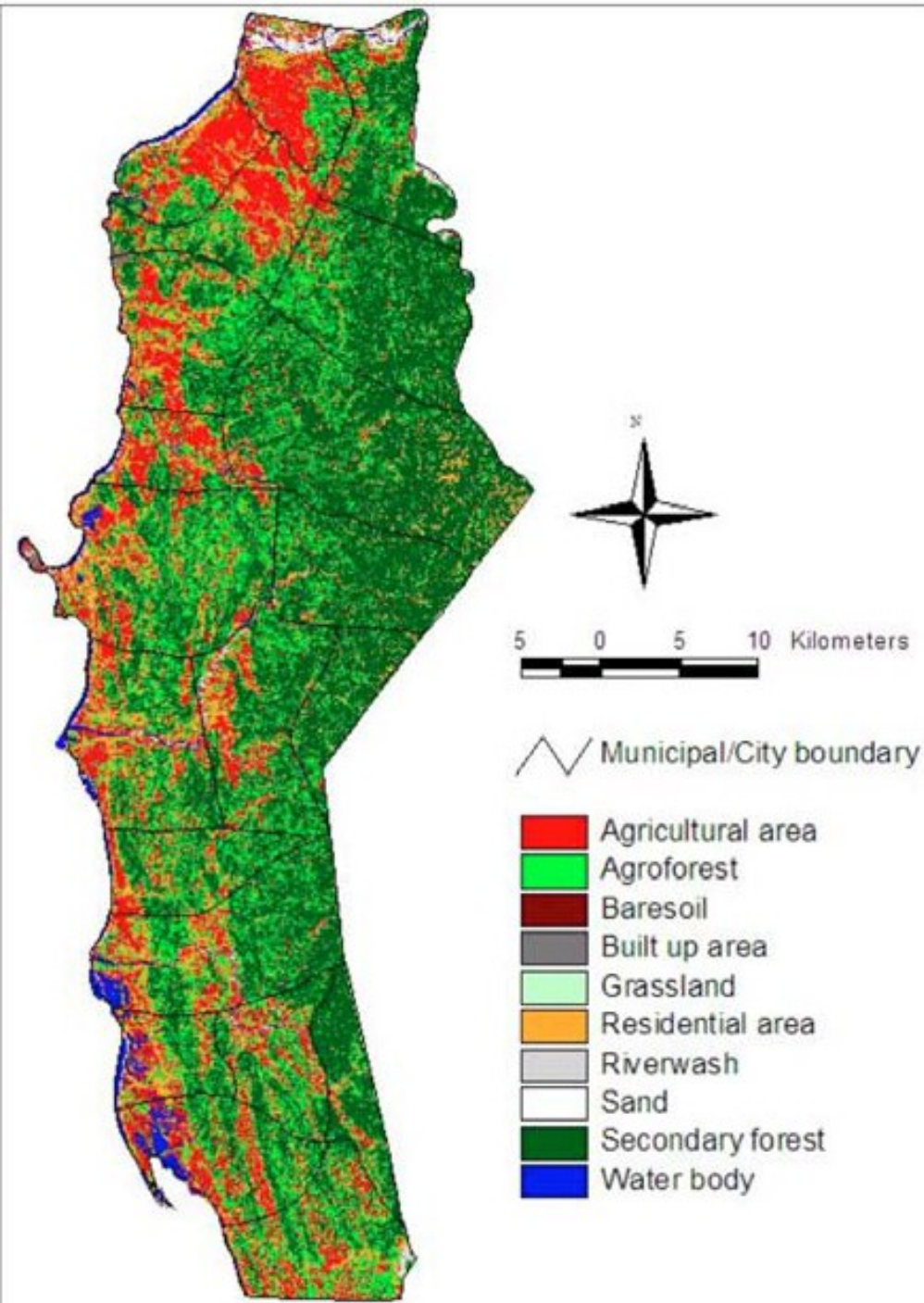


Hierarchický model



Kategorie land use

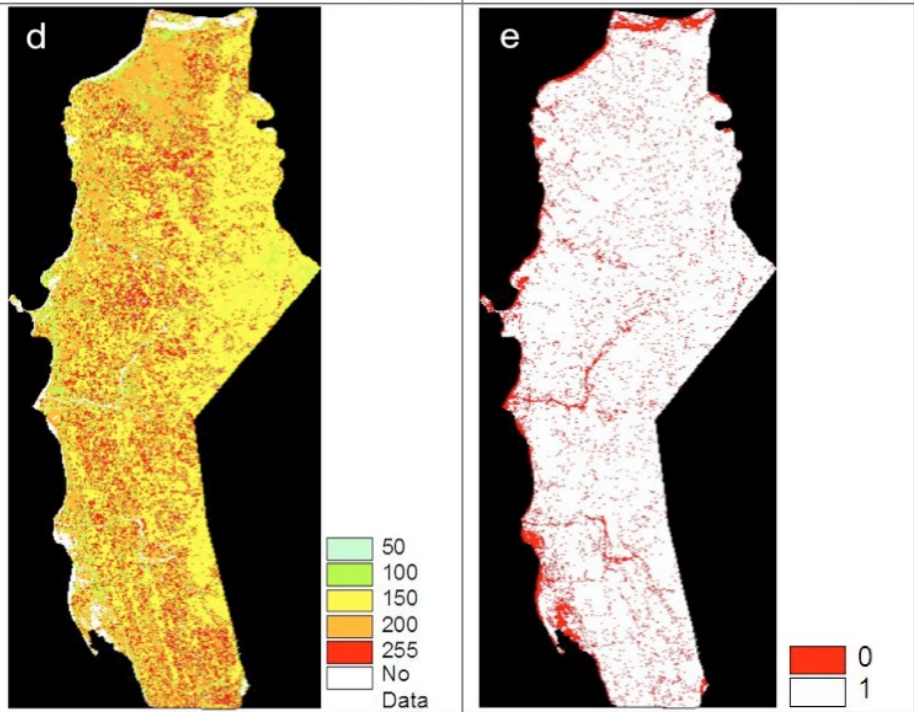
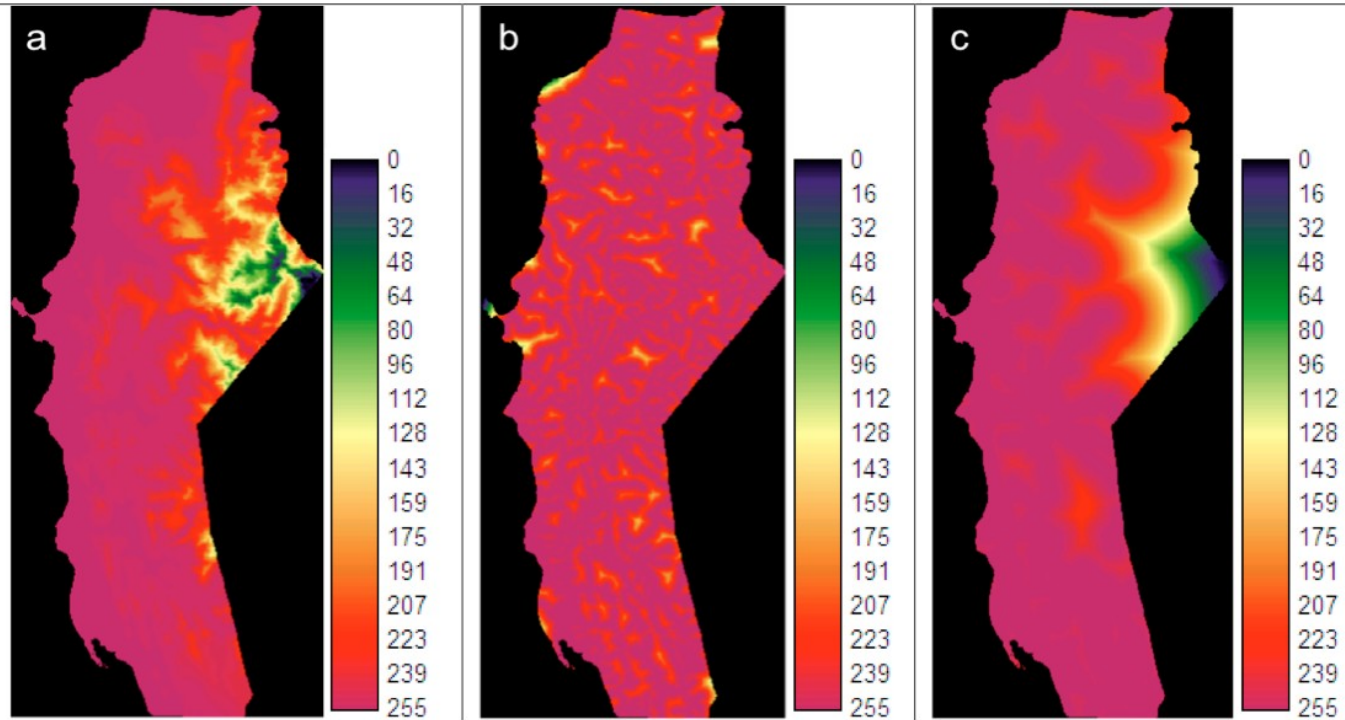
- Land use kategorie pro analýzu kategorických dat a stanovení omezení.
- Mapování individuálních společenstev x využití RS.
- Řízená klasifikace Landsat TM. Trénováno pomocí terénního výzkumu a následně klasifikováno.
- Kontrola kvality modelu (accuracy assessment).





Standardizace faktorů do jednotného měřítka

- **Rozsah 0 – 255 (255 nejvhodnější)**
- **Expertní odhad změny vhodnosti pro jednotlivé faktory.**
- **Faktor nadmořské výšky byl standardizován inverzím způsobem (čím výše, tím hůře) z důvodu výskytu vyššího množství srážek.**
- **Land use byl standardizován po kategoriích (produkční les = 255), řada zemědělských využití – 200, 150, 100, 50, ostatní = 0 (maska).**



Map Names:

- a) Elevation
- b) Distance to river
- c) Distance to road
- d) Land use/cover

Suitability

0 = least suitable
 255 = most suitable

- e) Constraints (value = 0)
 (Boolean mask)



Zastavěné oblasti, písek, vodní plochy mokřady a oblasti do 25 metrů od silnice.

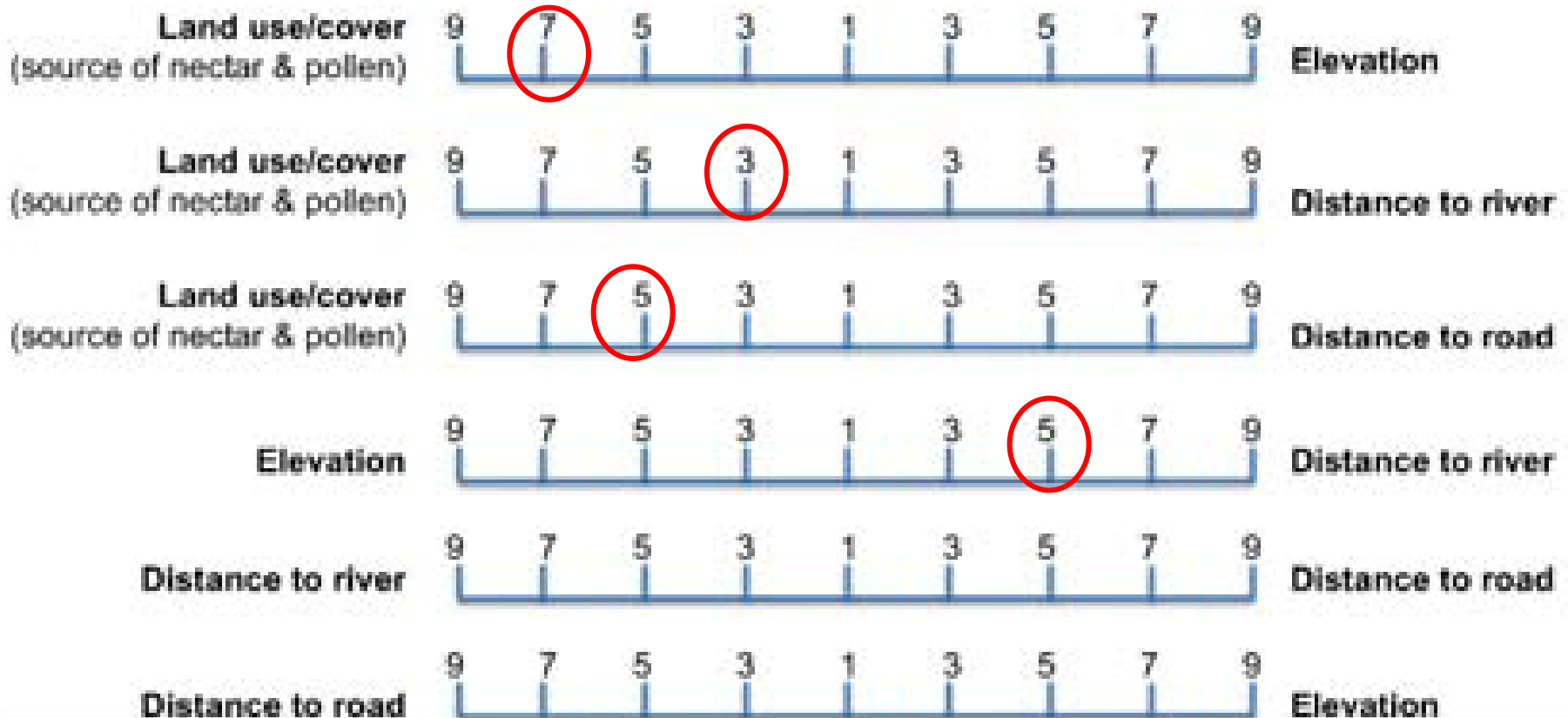
Využití AHP pro určení vah (analytic hierarchy process)

Instruction:

Below are the factors that need to be considered in selecting an ideal apiary site. Compare each of the following pair of the factors and circle the number of your choice along the segment. This process aims to determine the weight of each factor based on existing knowledge, and fair and best judgment.

Wherein:

- 1 Two attributes preferred equally
- 3 Slightly favors one attribute over another
- 5 Strongly favors one attribute over another
- 7 Very strongly favors one attribute over another
- 9 Extreme preference of one attribute over another





Vzájemné srovnání vah kritérií

Factors	Land use	Elevation	Distance to river	Distance to road	Priority vector or weight
Land use	1	7	3	5	0.5650
Elevation	1/7	1	1/5	1/3	0.0553
Distance to river	1/3	5	1	3	0.2622
Distance to road	1/5	3	1/3	1	0.1175

SUMA = 1

Postup výpočtu váhy pro kategorii:

Σ sloupce

Váha pro konkrétní dvojici = hodnota/suma sloupce

Váha celková pro kategorii = průměr vah pro konkrétní dvojice

Kartografické modelování

Následné využití WLC

$$WLC = \left(\sum_{i=1}^n X_i \times W_i \right) \times C$$

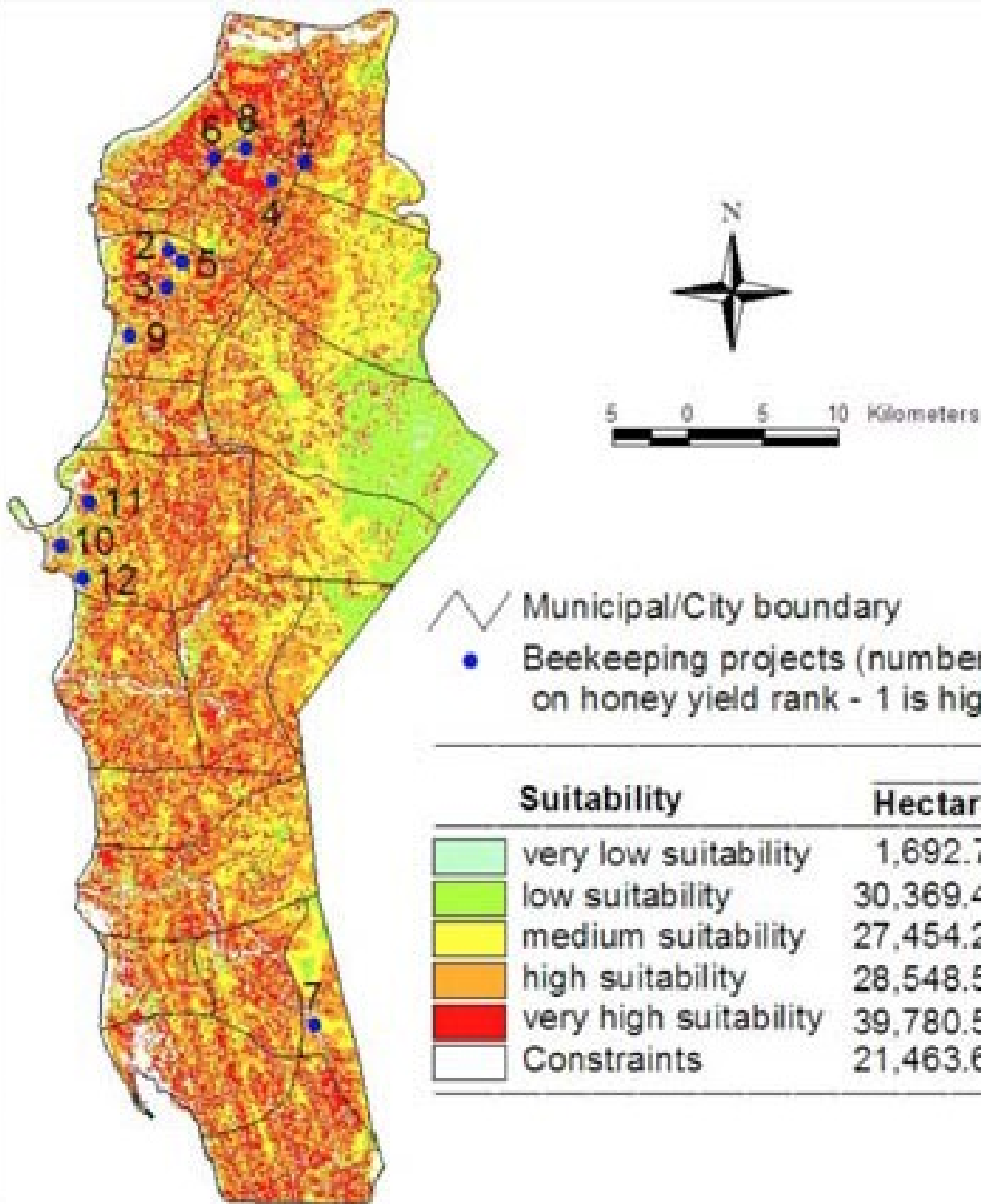
- **Pro výpočet celkové vhodnosti lokality:**

- X – rozhodovací parametry
- W – AHP váhy
- n – počet parametrů
- C – omezení (0=nevhodné, 1=vhodné)

- $S = ((\text{elevation} * 0.0553) + (\text{dist_river} * 0.2622) + (\text{dist_road} * 0.1175) + (\text{luc} * 0.5650)) * \text{cons_boolean}$

- **Následně vytvořeny kvalitativní kategorie pro popis vhodnosti lokalit pro pěstování včel.**

Výsledná mapa vhodnosti



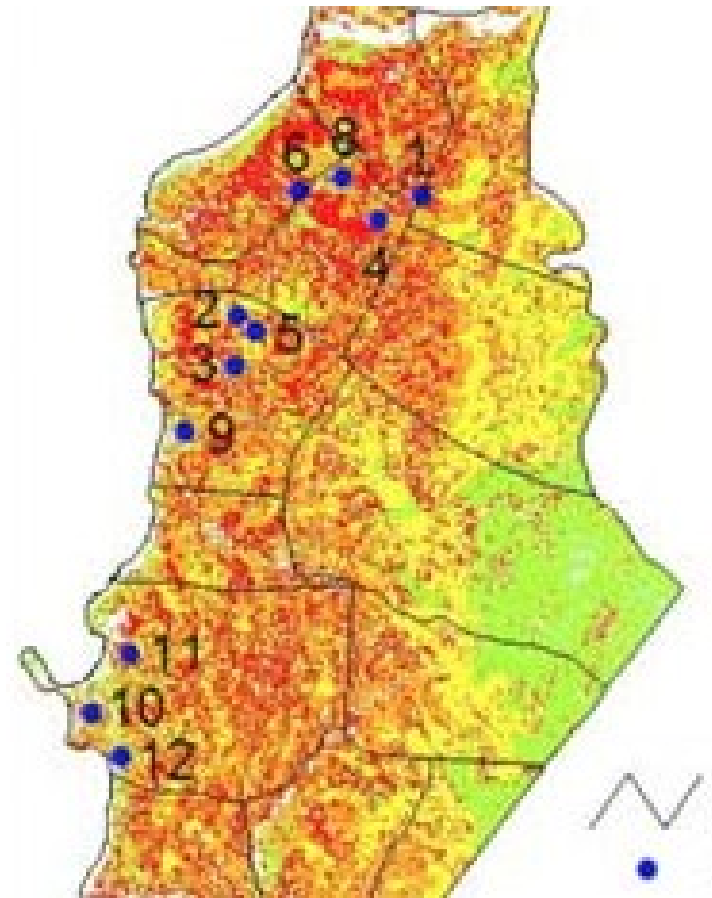
Verifikace výsledků

Má za úkol zhodnotit spolehlivost výsledků.

- **Verifikace kontrolou v terénu** (Ground truth verification)
 - nutno provést terénní průzkum a ověřit navržené oblasti, zda opravdu odpovídají požadavkům a kritériím.
- **Analýza citlivosti** (sensitivity analysis)
- Jak jsou ovlivněny výsledky pokud provedeme:
 - **změníme počet kritérií (snížení x navýšení)**
 - **změníme váhy kritérií**
- Dává změna smysl?
- Odpovídají výsledky realitě?

Verifikace výsledků - příklad

- **Srovnání mapy vhodnosti lokalit pro pěstování včel s existujícími produkčními daty**
- **Omezené množství podkladů s krátkodobým sběrem informací v terénu.**
- **Porovnání současných lokalit s kritérii.**
- **Korelace hodnot.**

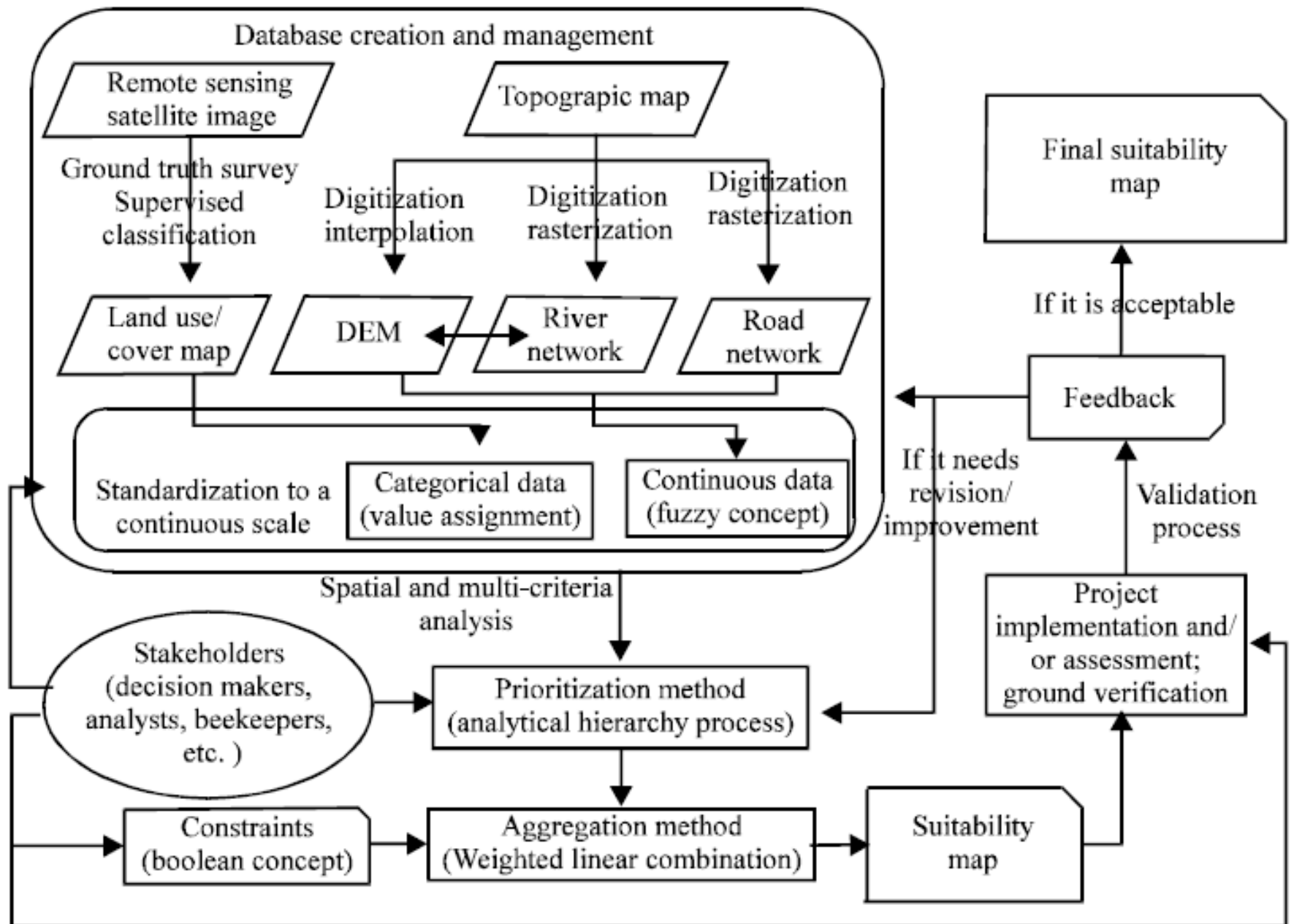


Korelační tabulka

Rank based production rate ^a	Geographic coordinates UTM 51N)		2005 Production rate (kg/colony)	(Suitability value where the project is located)
	x	y		
1	229019	1862524	37.50	252.0000
2	220036	1856655	33.33	240.0000
3	219872	1854181	21.05	222.0000
4	226969	1861279	20.00	214.0000
5	220892	1855846	19.17	211.0000
6	223035	1862736	14.00	204.0000
7	229723	1804923	13.50	194.0000
8	225145	1863452	12.67	204.0000
9	217464	1850916	11.00	123.0000
10	212872	1836852	10.00	146.0000
11	214720	1839716	8.00	151.0000
12	214298	1834668	5.00	49.0000

Pearson product moment correlation coefficient,
r between the production rate and suitability value

0.8010





Použité podklady

- Malczewski, J. 1999. *GIS and Multicriteria decision making*. Wiley.
- Carver, S. 1991. Integrating multicriteria evaluation with GIS. *IJGIS*, 5,3, 321-339.
- Heywood et. al. 1995. Building an exploratory multicriteria modelling environment for spatial decision support. (ed. Fisher) *Innovations in GIS 2*, Taylor and Francis. pp 127-137.
- Jones, C. 1997. *GIS and Computer Cartography*. Longman.