

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Kędziory
p.t. „Przestrzenne zróżnicowanie bonitacji drzewostanów sosnowych w Polsce”**

Wstęp

Wskaźnik bonitacji wzrostowej jest najczęściej stosowaną miarą potencjalnych zdolności produkcyjnych siedliska dla danego gatunku i w związku z tym stanowi podstawową informację służącą do formułowania strategicznych celów gospodarki leśnej. Dokładna ocena produktywności siedlisk jest ważna dla prowadzenia gospodarki mającej na celu trwały i zrównoważony rozwój lasu, ponieważ powinna być podstawowym kryterium uwzględnianym przy podejmowaniu specyficznych dla danych siedlisk i gatunków decyzji gospodarczych dotyczących zarządzania lasami związanymi z wyborem zabiegów hodowlanych, składu gatunkowego, wieku rębności, wielkości etatu oraz prognozowania wielkości zasobów drzewnych. Znaczenie tematyki badawczej podjętej w recenzowanej pracy dla praktyki leśnej i dla rozwoju nauk leśnych jest zatem bezdyskusyjne a wybór tematu pracy jest moim zdaniem bardzo trafny.

Ocena formalna i merytoryczna pracy

Recenzowana praca liczy 185 stron, w tym 8 rozdziałów oraz wykaz bibliografii oraz spisy tabel i rycin.

Dobrym wprowadzeniem w tematykę badań są rozdziały: *Wstęp* i *Przegląd literatury*, w których Doktorant przedstawił stan wiedzy w zakresie tematyki określania produktywności siedlisk, korzystając z dużej liczby pozycji literatury polskiej i zagranicznej, co wskazuje na dobre przygotowanie teoretyczne do przeprowadzenia badań. Spośród informacji zawartych w przeglądzie literatury nie do końca przekonuje mnie definicja bonitacji, przez którą Autor rozumie „wysokość drzewostanu w konkretnym wieku”. Bonitacja może być określana na

podstawie wysokości, natomiast nie można jej utożsamiać z wysokością drzewostanu, ponieważ jest ona zmienną nieobserwowalną wyrażającą produktyjność siedliska. Nie jestem również zwolennikiem twierdzenia, że bonitacja to cecha drzewostanu. Za niefortunne uważam stosowanie w opisie dotychczasowych badań stwierdzenia „udało im się”, które doktorant stosuje w odniesieniu do wyników różnych badań.

Celem pracy, który przedstawiono w rozdziale 3, było zbadanie zależności między warunkami wzrostu i cechami taksacyjnymi a wskaźnikiem bonitacji drzewostanów sosnowych w Polsce i stworzenie modelu zależności bonitacji od wybranych cech drzewostanów oraz czynników środowiska. Celem pracy była także analiza zróżnicowania bonitacji drzewostanów sosnowych w układzie przestrzennym całego kraju.

W rozdziale Materiał badawczy Doktorant szczegółowo opisał wyniki pomiarów pochodzących z wielkoobszarowej inwentaryzacji stanu lasu. W opisie zamieszczono również informacje zaczerpnięte bezpośrednio z instrukcji WISL. Biorąc pod uwagę, że badania dotyczą sosny zwyczajnej, za niepotrzebne uważam umieszczanie w opisie materiału badawczego informacji dotyczących pozostałych głównych gatunków lasotwórczych, ze szczegółowymi informacjami o ich udziale w ogólnej liczbie powierzchni próbnych, udziale w krainach przyrodniczo-leśnych, na siedliskach, w klasach wieku. Dane te zilustrowano między innymi na 10 rycinach i wraz z opisem zajmują aż kilkanaście stron. Po ich lekturze nadal jednak nie wiadomo jaką ilość danych autor wykorzystał w swoich badaniach. Moim zdaniem bardziej istotne byłoby scharakteryzowanie danych empirycznych wykorzystanych w badaniach. Szczegółowe zestawienia całości danych WISL są natomiast zbędne. Moim zdaniem niewłaściwe jest również umieszczenie podrozdziału *Ekologia sosny zwyczajnej* w rozdziale *Materiał badawczy*. Treść tego podrozdziału ma bowiem charakter przeglądu literatury.

Kolejny, 5 rozdział pracy to *Metodyka*. Dopiero w metodyce czytelnik ma okazję uzyskać po raz pierwszy informację o materiale empirycznym wykorzystanym w pracy. W opisie metodyki Autor zamieszcza informację, że w badaniach nie analizowano wskaźnika bonitacji sosny z powierzchni pochodzących z siedlisk wyżynnych, a ponadto wyłączono z analiz krainy VII i VIII. Nie jestem przekonany, co do słuszności takiego rozwiązania, szczególnie w kontekście późniejszego wykorzystania danych do modelowania. Przy budowie

modeli wykorzystujących informacje klimatyczne, geologiczne i glebowe oraz topograficzne, szczególne znaczenie ma bowiem odpowiednio duży zakres zmienności warunków wzrostu, który przez eliminację siedlisk wyżynnych i górskich został znacznie ograniczony. Zgodnie z informacją zawartą w pracy z danych wyeliminowano 525 powierzchni próbnych. Stanowią one ponad 3,3% powierzchni WISL zlokalizowanych w drzewostanach sosnowych, a nie jak to podaje Autor mniej niż 2%.

Do wyliczenia wskaźnika bonitacji zastosowano regionalne modele bonitacyjne opracowane dla poszczególnych krain przyrodniczo-leśnych. Przy podawaniu wartości parametrów modeli (tabela 2) w tytule tabeli powinno być zamieszczone powołanie na źródło, z którego pochodzą, przez co można odnieść wrażenie, że zostały opracowane w ramach prezentowanej pracy. Na stronie 57 znajduje się informacja o usunięciu wartości odstających z wykorzystaniem metody ważonych przestrzennie statystyk opisowych. W tym miejscu pojawia się pytanie, czy współczynniki determinacji modeli opracowanych w ramach prezentowanych badań wyliczono po usunięciu wartości odstających?

W podrozdziale Modelowanie statystyczne przedstawiono między innymi szczegółowy opis większości zmiennych zastosowanych do wyjaśnienia zmienności bonitacji oraz bardzo pomocny w interpretacji wyników opis metod analizy danych. Po szczegółowej analizie kolejnych rozdziałów pojawia się jednak niedosyt związany z brakiem opisu części zmiennych wykorzystanych w modelach.

Kolejny, najbardziej obszerny rozdział to Wyniki. Na początku rozdziału Autor zamieszcza informację, że spośród ogólnej liczby 28739 podpowierzchni próbnych do analizy końcowej wybrano 15518 prób. Następnie na połowie strony Autor powtarza informacje zawarte we wcześniejszych rozdziałach dotyczące odrzucenia powierzchni zlokalizowanych w krainach VII-VIII oraz na siedliskach wyżynnych. W tej części pracy znajduje się również informacja o tym, że do szczegółowych analiz przestrzennych wybrano tylko trzy siedliskowe typy lasu: bór świeży, bór mieszany świeży i las mieszany świeży. Taka selekcja budzi moją wątpliwość, a ponadto informacja ta nie ma charakteru wyników, lecz raczej metodyki lub charakterystyki materiału badawczego. W dalszej części rozdziału wyników na stronie 71 zaprezentowano rozkład wartości wskaźnika bonitacji na wybranych do analizy powierzchniach WISL oraz podano informację o tym, że nie charakteryzuje się on rozkładem

normalnym. Nie podano natomiast informacji, w jakim celu badano normalność rozkładu dla tak dużej próby.

W dalszej części wyników Autor charakteryzuje oraz porównuje wartości wskaźnika bonitacji w krainach przyrodniczo-leśnych. Do porównania wartości bonitacji w krainach zastosowano test Wilcoxon, który jest testem nieparametrycznym służącym do porównywania ze sobą dwóch (tylko dwóch) grupy zależnych. W przypadku porównywania większej liczby grup niezależnych takie rozwiązanie jest niewłaściwe. W związku z brakiem możliwości stosowania analizy wariancji należało w tym przypadku zastosować nieparametryczny odpowiednik analizy wariancji dla zmiennych niezależnych, którym jest na przykład ANOVA Kruskala-Wallisa oraz odpowiednik testu post-hoc w postaci wielokrotnego porównania średnich rang dla wielu prób.

Dlaczego przy porównywaniu wielu prób niewłaściwe jest wielokrotne stosowanie testu dla dwóch grup? Przy założonym poziomie istotności 0,05, przy pojedynczym porównaniu dwóch grup prawdopodobieństwo nie odrzucenia błędnej hipotezy zerowej wynosi 5%. Przy dwóch porównaniach prawdopodobieństwo błędu rośnie do 9,75 % ($1 - 0,95 \times 0,95$), przy trzech 14,3 % ($1 - 0,95 \times 0,95 \times 0,95$), przy czterech 18,6% a przy pięciu 22,6%. Test Wilcoxon zastosowano niewłaściwie również do porównania bonitacji w klasach wieku, na siedliskach oraz różnych formach własności. Szczególnie przy dużej liczbie grup, z którą mamy do czynienia w przypadku 11 porównywanych typów siedliskowych lasu, prawdopodobieństwo uzyskania poprawnej weryfikacji hipotezy zakładającej brak wpływu typu siedliskowego lasu na wskaźnik bonitacji spada do blisko 50%.

W dalszej części wyników przedstawiono przestrzenną charakterystykę wskaźnika bonitacji sosny, w której skupiono się głównie na średnich bonitacjach w ruchomych oknach różnej wielkości. Niejasny jest dla mnie cel analiz z zastosowaniem ruchomych okien o wielkości 100, czy 200 km, które ilustrują zafałszowany obraz kształtowania się bonitacji siedlisk dla sosny zwyczajnej na terenie Polski. W celu ustalenia skali zmienności przestrzennej można zastosować semiwariogramy pozwalające na stwierdzenie w jakiej skali występuje autokorelacja przestrzenna. Dzięki temu możliwe było uniknięcie stosowania całej palety ruchomych okien.

Interesujące są wyniki analizy wskaźnika bonitacji w typach siedliskowych lasu, które pokazują bardzo duży zakres zmienności bonitacji sosny na poszczególnych typach. Zgodnie z instrukcją urządzania lasu, obszary należące do tego samego typu siedliskowego lasu wykazują podobne zdolności produkcyjne i przydatność dla hodowli lasu. Analizy wskaźnika bonitacji na siedliskach pokazują, że na przykład na borze świeżym bonitacje sosny wahają się od około 15 do 35 m, co wskazuje na ograniczoną przydatność typów siedliskowych lasu jako miar produktywności siedlisk. Inny problem polega na tym, że zgodnie z instrukcją kartowania siedlisk leśnych typy siedliskowe lasu są ustalane między innymi na podstawie bonitacji głównych gatunków lasotwórczych, w szczególności sosny zwyczajnej stanowiącej najczęstszy gatunek lasotwórczy, w związku z tym nie jest zaskoczeniem, że wskaźnik bonitacji dla sosny zwyczajnej jest w pewnym stopniu skorelowany z typem siedliskowym lasu. Moim zdaniem dobrym rozwiązaniem byłoby pominięcie w części analiz typów siedliskowych lasu i uwzględnienie w modelach rodzajów podłoża geologicznego i podtypów gleb. Taki kierunek sugeruję przy przygotowaniu wyników badań do druku. Trudno będzie bowiem przekonać recenzentów, szczególnie tych z zagranicy, do typów siedliskowych lasu jako zmiennych wyjaśniających produktywność siedliska.

W podrozdziale modelowanie statystyczne wskaźnika bonitacji sosny, doktorant zamieścił wyniki modelowania bonitacji z wykorzystaniem różnych metod statystycznych. Na początku podrozdziału znajduje się informacja o tym, że w pierwszym kroku analiz zbadano współliniowość zmiennych za pomocą współczynnika VIF i odrzucano cechy o największych wartościach tej miary nadmiarowości. Dbalność o spełnienie założeń modelowania zasługuje na pochwałę, natomiast na przyszłość sugeruję dużą ostrożność przy przedwczesnym eliminowaniu zmiennych z uwagi na nadmiarowość. W dalszych etapach analiz może się bowiem okazać, że zmienne, z którymi wyeliminowana zmienna była skorelowana są nieistotne, natomiast pozbywając się tej zmiennej ograniczamy możliwość pełnego poznania i wyjaśnienia opisywanego zjawiska. Rozumiem jednak przyjęcie takiego sposobu postępowania, który wynikał zapewne z trudności wykorzystania w modelach bardzo dużej liczby współliniowych zmiennych niezależnych.

Niejasny jest dla mnie sposób stosowania w modelach zmiennych jakościowych. Z opisu zawartego w pracy można sądzić, że zmienne te stosowano w postaci tzw. *dummy*

variables, co można przetłumaczyć na język polski jako *zmienne sztuczne*. Pomimo tego, że każdy poziom zmiennej jakościowej jest oddzielną zmienną sztuczną, to jednak w interpretacji wyników, zmienną pozostaje nadal cała grupa zmiennych sztucznych opisujących daną zmienną jakościową, na przykład wszystkie typy siedliskowe lasu. W związku z tym nie potrafię na przykład zinterpretować ryciny 46, z której wynika, że relatywny wpływ lasu mieszanego jest inny niż lasu. Czy nie jest to ta sama zmienna czyli typ siedliskowy lasu? W dalszej części wyników przedstawiono wyniki analizy wpływu różnych zmiennych na kształtowanie się wskaźnika bonitacji uzyskane za pomocą modelu regresji wielokrotnej. Większość z uzyskanych wyników jest interesująca i wydaje się rozsądna, za zaskakujący można uznać jednak negatywny wpływ na kształtowanie się bonitacji nasłonecznienia najzimniejszego kwartału oraz pozytywny wpływ odległości od dużych rzek. Czy nie jest to efekt korelacji przestrzennej z innymi zmiennymi nie wykorzystanymi w modelach?

W dalszej części pracy Autor opisuje wyniki modelowania za pomocą wielowymiarowej adaptacyjnej regresji przy użyciu wielomianów (MARS). W opisie wyników modelowania MARS zastosowano dość niefortunne sformułowania w odniesieniu do cech jakościowych. Z opisu można się między innymi dowiedzieć, że pozytywny wpływ na wskaźnik bonitacji ma budowa pionowa i żyzność gleb, natomiast negatywny własność prywatna i cechy gleb: siedliska bagienne (wilgl: b). W opisie bardziej właściwe byłoby stwierdzenie, że średnia wartość wskaźnika bonitacji rośnie wraz ze zmianą żyzności od siedlisk borowych do lasowych lub jest większy w Lasach Państwowych, niż w lasach własności prywatnej. Podobnie jak w przypadku modelu regresji liniowej, również w przypadku modeli MARS moją wątpliwość budzi ocena relatywnego wpływu zmiennych na wskaźnik bonitacji sosny przedstawiona na rycinie 48, z której wynika, że żyzność LM (las mieszany) i BM (bór mieszany) zajmują drugą i trzecią pozycję pod względem ważności zmiennych, natomiast żyzność L (las) znajduje się na piątej pozycji po zmiennej bio27. Trudno bowiem powiedzieć, że las mieszany wpływa bardziej na bonitację niż las. Obawiam się, że jest to ponownie problem związany z przyjęciem założenia, że poszczególne poziomy zmiennych jakościowych stanowią odrębne zmienne. Interpretację wyników modelowania utrudnia również to, że nie wszystkie zmienne stosowane w modelowaniu zostały opisane w

metodyce. Niejasne jest w jaki sposób została opisana budowa pionowa. Nie rozumiem również dlaczego zmienne ilościowe takie jak liczba drzew, czy wskaźnik zagęszczenia SDI zostały w modelach MARS pogrupowane w przedziały i uwzględnione jako zmienne jakościowe.

Przedstawione uwagi nie mają jednak na celu podważenia poprawności zastosowania metod modelowania statystycznego oraz wagi uzyskanych wyników. Moim zdaniem mogą być natomiast pomocne przy przygotowaniu artykułów do druku oraz mogą stanowić wskazówki przydatne w dalszej pracy badawczej.

Uzyskane wyniki dostarczają wielu cennych informacji o charakterze ekologicznym dotyczących wpływu warunków wzrostu, w tym szczególnie klimatu, na produktywność siedlisk i wzrost sosny zwyczajnej. Interesujący jest między innymi wpływ na wskaźnik bonitacji wieku drzewostanów, wskazujący na stały proces wzrostu produktywności siedlisk, czy wpływ indeksu suszy pokazujący na możliwe zagrożenia dla drzewostanów sosnowych związane z brakiem wystarczającej dostępności wody. Skomplikowana natura opisywanych zjawisk sprawia jednak, że w stosunku do niektórych z wyników należy zachować dużą ostrożność. Trudno bowiem uzasadnić na przykład spadek wskaźnika bonitacji wraz z rosnącym nasłonecznieniem najbardziej mokrego kwartału, który stwierdzono w najmłodszych drzewostanach. W czasie lektury wyników modelowania moje wątpliwości budzi włączenie do zmiennych wyjaśniających liczby drzew i zagęszczenia drzewostanu. Trochę karkołomna wydaje mi się między innymi interpretacja interakcji warunków klimatycznych i zagęszczenia drzewostanu lub liczby drzew na wskaźnik bonitacji.

Wykorzystanie w modelach liczby drzew i zagęszczenia drzewostanu sprawia, że ogranicza się ich zastosowanie tylko do siedlisk zajętych przez drzewostany sosnowe, dla których bonitację można przecież określić przez pomiar wysokości i określenie wieku. Tego typu geocentryczne modele produktywności siedlisk są bardziej przydatne w przypadku określania bonitacji siedlisk dla obszarów nieleśnych, pozbawionych drzewostanu lub obszarów, na których występują inne gatunki. Jeżeli na danym siedlisku występują drzewostany sosnowe to lepsze jest bezpośrednio stosowanie metod fitocentrycznych.

Moim zdaniem lepsze byłoby również podzielenie modeli na te, które uwzględniają współrzędne geograficzne oraz te, które uwzględniają zmienne klimatyczne. Na obszarze Polski występuje bowiem silny związek warunków klimatycznych ze współrzędnymi geograficznymi. Współliniowość tych zmiennych sprawia, że trudno jednoznacznie interpretować, czy zmiana bonitacji to na przykład efekt średniej rocznej temperatury powietrza, sumy opadów i innych wskaźników klimatycznych, czy szerokości lub długości geograficznej.

W końcowej części podrozdziału *Modelowanie statystyczne wskaźnika bonitacji sosny*, przedstawione zostało porównanie testowanych modeli oraz zaprezentowano wyniki walidacji końcowej, w której porównano statystyki kalibracyjne i walidacyjne. Ciekawy jestem, jak Doktorant interpretuje wyższe wartości wskaźnika determinacji uzyskane dla zbiorów walidacyjnych w porównaniu ze zbiorami kalibracyjnymi.

Kolejny podrozdział rozdziału wyniki jest poświęcony modelowaniu przestrzennemu wskaźnika bonitacji sosny. W pierwszej części tego rozdziału przedstawiono zależność reszt modeli zaprezentowanych w poprzednim podrozdziale od wartości obserwowanych. Zastanawia mnie dlaczego wykresy przedstawiające zależność wartości resztowych od obserwowanych nie zostały zamieszczone w poprzednim podrozdziale przy okazji omawiania poszczególnych modeli. Nasuwają się przy tej okazji dwa pytania:

1. Dlaczego na wykresach przedstawiono wartości resztowe względem obserwowanych a nie przewidywanych za pomocą modeli?
2. Jaki związek mają zaprezentowane zależności reszt modeli statystycznych z modelowaniem przestrzennym?

Kolejne podrozdziały zawierają wyniki analizy regresji ważonej przestrzennie w ruchomym oknie (GWR) oraz wyniki analizy głównych składowych w ruchomym oknie. Na tym etapie lektury poczułem się zmęczony ilością zastosowanych metod oraz mnogością ich wariantów i związanych z nią różną interpretacją wpływu zmiennych. Przyznam, że odetchnąłem z ulgą czytając zdanie zamieszczone na końcu rozdziału wyniki, w którym Doktorant informuje, że analizy wykonane dla najczęściej występujących typów siedliskowych lasu nie zostały zamieszczone dla większej czytelności pracy.

Różne warianty metod analizy danych prowadzą do różnej interpretacji wpływu poszczególnych zmiennych. W zależności na przykład od ilości głównych składowych zmienia się lokalne znaczenie poszczególnych zmiennych dla wyjaśniania produktywności siedlisk dla sosny. Dlatego wydaje mi się, że lepsze byłoby wybranie mniejszej ilości metod modelowania i większe skoncentrowanie się na zmiennych, które rzeczywiście decydują o wskaźniku bonitacji sosny. Stosując całą paletę metod modelowania doktorant wykazał ich opanowanie, jednak mnogość metod i różnych interpretacji wyników jest kłopotliwa dla czytelników pracy oraz sprawia, że trudno zdecydować, które z czynników mają najbardziej istotne znaczenie dla produktywności siedlisk dla sosny zwyczajnej w Polsce. W tym miejscu nasuwa się generalna sugestia by w pracach naukowych nie zamieszczać wszystkich wyników analiz przeprowadzonych różnymi metodami, lecz wybrać i omówić te, które uważa się za najbardziej właściwe i trafne. Trudno czytelnie zaprezentować wyniki badań, bez częściowo subiektywnego wyboru metod oraz wyników, które są naszym zdaniem najbardziej adekwatne.

Przedostatnim rozdziałem pracy jest Dyskusja. Doktorant omówił w nim uzyskane wyniki w świetle wyników innych autorów, jak również przedstawił swój punkt widzenia w odniesieniu do metodyki, jak i perspektywy dalszych badań nad bonitacją. Dyskusja jest świadectwem dojrzałości doktoranta jako badacza i jego świadomości co do przeprowadzonych badań.

W podsumowaniu wyników Doktorant przedstawił najważniejsze wyniki odnosząc je do postawionych hipotez badawczych. Uważam to za bardzo dobre rozwiązanie.

W swojej recenzji skupiłem się na zagadnieniach, które budziły moją wątpliwość przyjmując założenie, nie ma potrzeby udzielania wskazówek w odniesieniu do zagadnień, które zostały rozwiązane bezbłędnie. W tym miejscu chciałbym jednak podkreślić zarówno trafność doboru tematyki badań, jak również bardzo dobre opanowanie przez Doktoranta licznych metod analizy danych. Na podkreślenie zasługuje również dociekliwość w dotarciu do prawdy, która objawiała się analizowaniem tych samych zależności pod różnym kątem z zastosowaniem różnych metod analizy danych. Całokształt przeprowadzonych badań moim zdaniem bardzo dobrze wróży Doktorantowi, jako przyszłemu badaczowi, z którego moim zdaniem Wydział Leśny SGGW będzie miał w przyszłości dużo pożytku.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że Pan Wojciech Kędziora podjął się rozwiązania ambitnego i wymagającego zagadania, z którego bardzo dobrze się wywiązał. Dysponując rozległym materiałem empirycznym oraz korzystając nowoczesnych metod statystycznych i narzędzi geoinformatycznych rozwiązał postawiony problem badawczy. Uzyskane w ramach badań wyniki mają bardzo duże znaczenie dla praktyki leśnej, szczególnie dla urządzania lasu, i wzbogacają wiedzę o ekologii sosny zwyczajnej oraz produktywności siedlisk Polski dla tego gatunku. Recenzowana praca stanowi indywidualny, oryginalny dorobek Doktoranta, który wykazał się samodzielnością w uzasadnieniu problemu naukowego, w konstrukcji metody, w przeprowadzeniu badań i w opracowaniu ich wyników. Przedstawiona do oceny praca jest więc świadectwem nabycia umiejętności posługiwania się metodami naukowymi. Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana Wojciecha Kędziory spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003, nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i składam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Wojciecha Kędziory do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Równocześnie wnioskuję do Rady Wydziału Leśnego SGGW o wyróżnienie ocenianej rozprawy.

